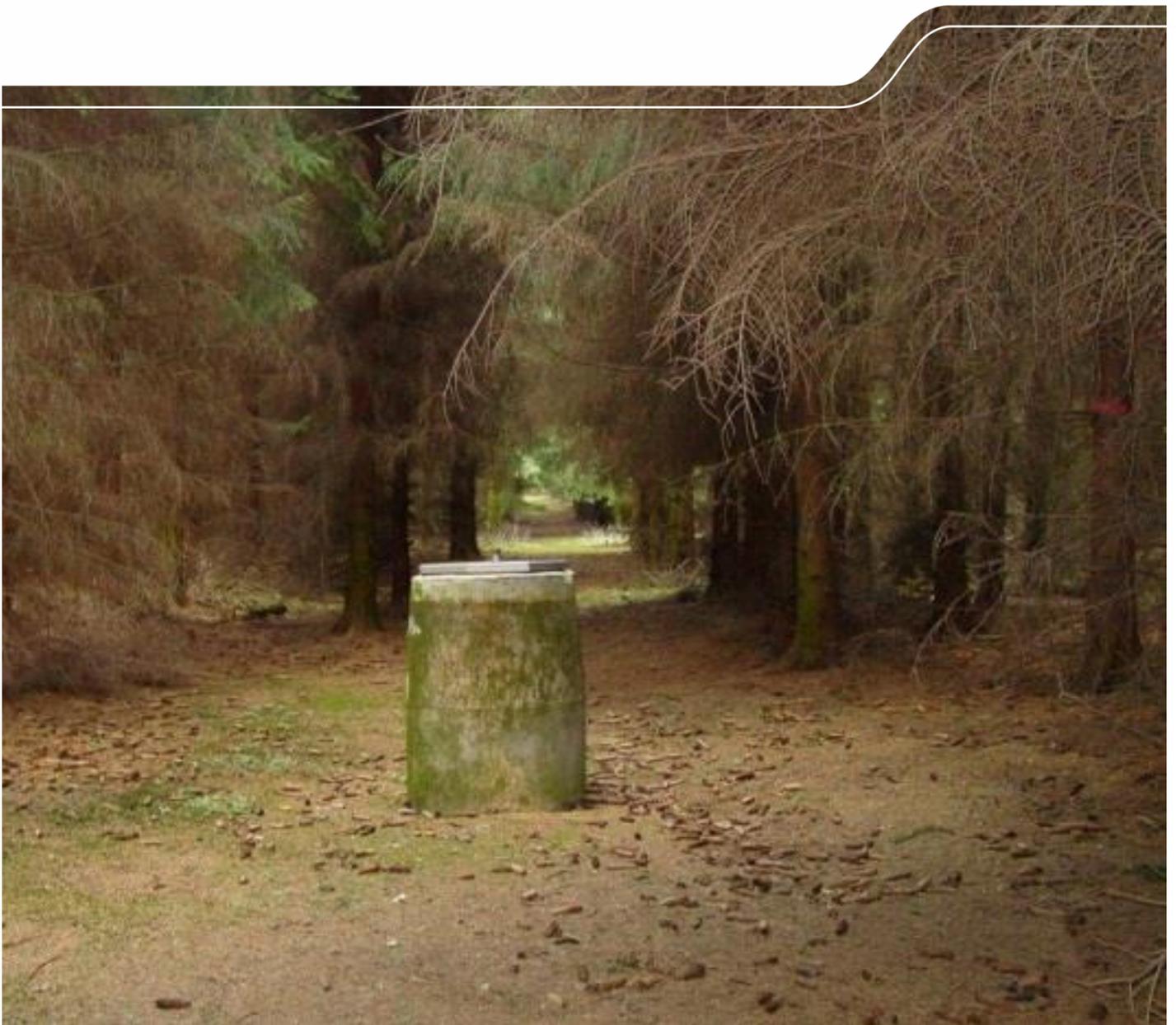




# Trinkwasserschutz in Quellgebieten



# Trinkwasserschutz in Quellgebieten

## Handlungsanleitung zur Erstellung von Fachgutachten

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Zielstellung</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Besonderheiten in Sachsen</b> .....	<b>13</b>
2.1	Quellgebiete zur Trinkwassergewinnung in Sachsen .....	13
2.2	Charakteristik von Quelleinzugsgebieten.....	14
2.3	Aufbau von Sickerleitungsquellen.....	14
2.4	Herkunftsräume des Wassers und Abflussprozesse .....	17
<b>3</b>	<b>Ausweisung der Schutzzonen – Rechtliche und fachliche Grundlagen</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Bemessungsgrundlagen</b> .....	<b>23</b>
4.1	Unterlagen zur Fassungsanlage.....	23
4.2	Unterlagen zum Untersuchungsgebiet.....	25
4.2.1	Einzugsgebiet/Topografie .....	25
4.2.2	Relief/Morphologie.....	25
4.2.3	Hydrografie .....	25
4.2.4	Klimatische Verhältnisse.....	26
4.2.5	Vegetation und Landnutzung.....	26
4.2.6	Schutz- und weitere besondere Gebiete.....	27
4.2.7	Pedologische Verhältnisse .....	28
4.2.8	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse .....	29
4.2.9	Konfliktanalyse der Gefahrenpotenziale .....	31
4.3	Informationsdefizite und Datenerhebung.....	31
4.4	Messdaten und geohydraulische Kennwerte .....	33
4.4.1	Schüttungsmessungen .....	33
4.4.2	Wasserbeschaffenheit .....	34
4.4.3	Tracer- und Isotopenmessungen.....	36
4.4.4	Grundwasserstand .....	38
<b>5</b>	<b>Methoden zur Datenauswertung</b> .....	<b>39</b>
5.1	Schüttungsstatistik und Ganglinienanalyse .....	39
5.1.1	Allgemeine Hinweise .....	39
5.1.2	Schüttungsstatistik.....	39
5.1.3	Auswertung mittels Trockenwetterfalllinie nach MAILLET (1905) .....	42
5.1.4	Weitere Verfahren zur Kennwertermittlung.....	47
5.2	Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung .....	48
5.2.1	Allgemeine Hinweise .....	48
5.2.2	Anwendung des Wasserhaushaltsportals Sachsen.....	49
5.2.3	Anwendung weiterer Verfahren zur Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen .....	52
5.3	Wasserbeschaffenheit .....	54
5.3.1	Allgemeine Hinweise .....	54
5.3.2	Auswertung mittels PIPER-Diagramm .....	59
5.3.3	Auswertung mittels STIFF-Diagramm.....	62
5.4	Tracerhydrologische Methoden .....	64
5.4.1	Allgemeine Hinweise .....	64
5.4.2	Auswertung und Interpretation von Tracerversuchen .....	64
5.4.3	Besonderheiten bei Sickerleitungsquellen .....	65
5.5	Isotopenmethoden.....	66
5.5.1	Allgemeine Hinweise .....	66
5.5.2	Auswertung und Interpretation radioaktiver Isotope ( $^3\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^{85}\text{Kr}$ ) .....	66
5.5.3	Auswertung und Interpretation von stabilen Isotopen ( $^2\text{H}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{15}\text{N}$ ) .....	66
5.6	Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüber-deckung.....	68
5.6.1	Allgemeine Hinweise .....	68

5.6.2	Berechnung des Härtequotienten .....	68
5.6.3	Berechnung nach HÖLTING.....	69
5.6.4	Interpretation von Isotopenergebnissen – Jungwasseranteil .....	71
<b>6</b>	<b>Methoden zur Schutzzonenbemessung .....</b>	<b>72</b>
6.1	Ausweisung Schutzzone I.....	72
6.2	Ausweisung Schutzzone II.....	73
6.2.1	Schutzzonenbemessung mittels Markierungsversuchen .....	73
6.2.2	Schutzzonenbemessung auf der Grundlage des erweiterten MAILLET-Verfahren nach SZYMCZAK (2007) .....	73
6.2.3	Geohydraulische Berechnungsverfahren.....	75
6.2.4	Hydrogeologische Modellierung .....	75
6.2.5	Standortzonenkonzept.....	76
6.3	Ausweisung der Schutzzone III .....	78
<b>7</b>	<b>Gefahrenpotenziale, Schutzbestimmungen, Überwachungsmaßnahmen.....</b>	<b>80</b>
7.1	Mögliche Gefährdungspotenziale für das Grundwasser .....	80
7.2	Hinweise zu Schutz- und Überwachungsmaßnahmen .....	82
7.3	Maßnahmenkonzeption und Empfehlungen zu Überwachungsmaßnahmen.....	84
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>86</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der Trinkwasserschutzgebiete für Sickerleitungsquellen in den sächsischen Naturregionen (LfULG 2013) .....	13
Abbildung 2:	Skizze des konstruktiven Schachtausbaus (nach HGN HYDROGEOLOGIE 2006) .....	15
Abbildung 3:	Schematische Aufsicht zum Aufbau einer Sickerleitungsquelle einschließlich der hydrologischen Abflussprozesse (ARGE ISOTOPENUNTERSUCHUNGEN 2010, 2011b) .....	16
Abbildung 4:	Konzeptionelles Strukturmodell zum Prozessbild von Sickerleitungsquellen .....	18
Abbildung 5:	Quellschüttung – Vergleich zeitlich unterschiedlich aufgelöster Schüttungsganglinien am Beispiel der Quelfassung Langer Grund im Erzgebirge (überarbeitet nach SCHWARZE & ROSS 1996) ..	33
Abbildung 6:	KliWES-Säulen – Kurzübersicht zum Drei-Säulen-Konzept in KliWES .....	50
Abbildung 7:	Typisierung des Grundwassers nach LÖFFLER & MEINERT (2011) .....	59
Abbildung 8:	Durchgang – Tracerhydrologische Kennwerte, Konzentrationsdurchgangskurven mit unterschiedlichen Dispersionskoeffizienten $D_L$ (verändert nach KÄSS 2004) .....	65
Abbildung 9:	Herangehensweise zur Bemessung der Schutzzone .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wasserhaushaltskomponenten nach DIN 4049, Teil 3 .....	19
Tabelle 2:	Überblick zu den in der Praxis am häufigsten eingesetzten künstlichen Tracern. Substanzen, die von BEHRENS et al. (2001) als human- und ökotoxikologisch unbedenklich eingestuft wurden (modifiziert nach TRESKATIS & TAUCHMANN 2013).....	37
Tabelle 3:	Übersicht zur Verteilung, zu den Eigenschaften und zur Herkunft der Umweltisotope .....	37
Tabelle 4:	Übersicht zu Bedeutung, Herkunft und Grenzwerten von wichtigen Wasserinhaltsstoffen .....	55
Tabelle 5:	Typische Stickstoff-15- und Sauerstoff-18-Gehalte des gelösten Nitrats (nach MOTZER 2006).....	67
Tabelle 6:	Bewertungsmaßstab für den Härtequotient nach JORDAN et al. (1989).....	69
Tabelle 7:	Klasseneinteilung nach HÖLTING et al. (1995) .....	70
Tabelle 8:	Bewertung der Grundwassergeschützttheit anhand des Jungwasseranteils (JORDAN 1991) .....	71

Anlagenverzeichnis (siehe separate Dateien)

- Anlage 1 Musterdokumentation konstruktiver Teile einer Quelfassungsanlage QG Syrau für Plauen (Auszug)
- Anlage 2 Fallbeispiel Bemessungsgrundlagen QG Fichtenwald, Vogtlandkreis
- Anlage 3 Beispiel zur Beschreibung der hydrochemischen Verhältnisse
- Anlage 4a SZYMCAK, P. (2007): Bemessung von Trinkwasserschutzzonen in Quellgebieten mittels Isochronenberechnungen auf der Basis von Trockenwettermessungen der Schüttungsraten (Herleitung des erweiterten MAILLET-Verfahrens)
- Anlage 4b Excel-Applet zur Berechnung von Isochronen nach dem erweiterten MAILLET-Verfahren  
→ steht nur als Download unter <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/6359.htm> zur Verfügung

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
ArcEGMO	GIS-gestütztes Einzugsgebietsmodell
ATKIS	Amtliches topografisch-kartografisches Informationssystem
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BeStWag	Hinweise zu Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wasserschutzgebieten
BTX	leicht flüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe <b>B</b> enzol, <b>T</b> oluol und <b>X</b> ylol
BÜK1000	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 1.000.000
BÜK200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 200.000
BR	Biosphärenreservat
LHKW	leicht flüchtige Halogenierte Kohlenwasserstoffe
DIN	Deutsches Institut für Normung
DGM	Digitales Geländemodell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DOC	Dissolved organic carbon (Gehalt an gelösten organischen Kohlenstoff)
DüV	Düngeverordnung
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
EG	Europäische Gemeinschaft
EZG	Einzugsgebiet
FFH	Flora-Fauna-Habitat
GH	Gesamthärte
GrwV	Grundwasserverordnung
GMWL	Global Meteoric Water Line
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermessstelle
GWN	Grundwasserneubildung
HHQ	Höchste Quellschüttung
HRG	Hohlraumgebiet
HÜK	Hydrogeologische Übersichtskartierung Sachsens 1 : 200.000
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klima- veränderung)
KH	Karbonathärte
KliWES	Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten der sächsi- schen Gewässer
KOR50	Karte der oberflächennahen mineralischen Rohstoffe Sachsen im Maßstab 1 : 50.000
LAWA	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LfUG	Landesamt für Umwelt und Geologie
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LSG	Landschaftsschutzgebiet
MNQ	Mittlere niedrigste Quellschüttung in der betrachteten Zeitspanne bzw. Beobachtungsreihe
MoNQ	Monatliche Niedrigquellschüttung
MQ	Mittlere Quellschüttung
NNQ	Kleinste Quellschüttung

NLP	Nationalpark
NP	Naturpark
NSG	Naturschutzgebiet
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PfISchAnwV	Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung
PfISchG	Pflanzenschutzgesetz
PSBM	Pflanzenschutz- und Behandlungsmittel
QG	Quellgebiet
QS	Quellschrot
RaKliDa	Rasterklimadaten (Datenbank)
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
RiStWag	Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten
SächsDuSVO	Sächsische Dung- und Silagesickersaftanlagenverordnung
SächsSchAVO	Verordnung des SMUL über Schutzbestimmungen und Ausgleichsleistungen für erhöhte Aufwendungen der Land- und Forstwirtschaft in Wasserschutzgebieten
SächsVAwS	Sächsische Anlagenverordnung
SächsWG	Sächsisches Wassergesetz
SALKA	Sächsisches Altlastenkataster
SMoCR200	Soil Map of the Czech Republic (Bodenkarte der Tschechischen Republik) im Maßstab 1 : 200.000
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SPA	Special Protection Area (Gebiet mit besonderer Schutzfunktion)
Tab.	Tabelle
TOC	Total organic Carbon (Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TU	Technische Universität
TWL	Trockenwetterfalllinie
TWSG	Trinkwasserschutzgebiet
TWSZ	Trinkwasserschutzzone
UWB	Untere Wasserbehörde
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water
WETTREG	Wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethodik
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WSG	Wasserschutzgebiet
WVU	Wasserversorgungsunternehmen

## Symbole

$A_{EZG}$	[ km <sup>2</sup> ]	Fläche des Einzugsgebietes
$\alpha$	[ - ]	Rezessionskoeffizient des Einzugsgebietes einer Quelfassung
$D_L$	[ m ]	Longitudinale Dispersion
GH	[ °dH ]	Gesamthärte
h	[ cm ]	Wasserstand (Druckspiegelhöhe)
h(t)	[ cm ]	Wasserstand in Abhängigkeit der Zeit
H	[ m ]	wassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters
HHQ	[ m <sup>3</sup> /d ]	größte Quellschüttung
Hq	[ - ]	Härtequotient
K	[ d ]	Speicherrückgangskonstante des Einzugsgebietes einer Wasserfassung
$k_f$	[ m/s ]	Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters, horizontal
KH	[ °dH ]	Karbonathärte
i	[ - ]	Grundwasserdruckgefälle (Gradient)
L	[ m ]	Entfernung der Einzugsgebietsgrenze vom Vorfluter
LF	[ µS/m ]	(elektrische) Leitfähigkeit
M	[ m ]	Mächtigkeit des Grundwasserleiters
M	[ mmol/l ]	Säurekapazität (bei pH 4,3)
MHQ	[ m <sup>3</sup> /d ]	mittlere jährliche Höchstschüttung
MNQ	[ m <sup>3</sup> /d ]	mittlere jährliche Niedrigschüttung
MQ	[ m <sup>3</sup> /d ]	mittlere Quellschüttung
n	[ % ]	absoluter Hohlraumanteil (Gesamtporosität)
$n_d$	[ % ]	drainabler, entwässerbarer Hohlraumanteil (entspricht der effektiven Porosität $n_e$ )
$n_e$	[ % ]	effektiver, entwässerbarer Hohlraumanteil des Grundwasserleiters (effektive Porosität)
NKH	[ °dH ]	Nicht-Karbonathärte
NNQ	[ m <sup>3</sup> /d ]	kleinste Quellschüttung
$Q_m$	[ m <sup>3</sup> /d ]	mittlere Quellschüttung
Q	[ m <sup>3</sup> /s ]	Schüttung bzw. Zuflussrate
$Q_0$	[ m <sup>3</sup> /d ]	Schüttung zum Ausgangszeitpunkt t = 0
$Q_t$	[ m <sup>3</sup> /d ]	Schüttung zum Zeitpunkt t
QSq	[ - ]	Quellschüttungsquotient
R	[ m ]	Entfernung der Wasserscheide von der Quelfassung
S	[ m <sup>-1</sup> ]	realer Speicherkoeffizient eines Grundwasserleiters
$s_{max}$	[ m ]	maximale gemessene Grundwasserabsenkung
T	[ m <sup>2</sup> /s ]	Transmissivität
$\tau_m$	[ s ]	mittlere Verweilzeit des Wassers im Untergrund
$\tau_0$	[ s ]	Verweilzeit des Wassers in der ungesättigten Zone
t	[ s ]	Zeit
$t_0$	[ s ]	Anfangszeit
$t_{cmax}$	[ s ]	Zeitpunkt des Maximums der Tracerkonzentration am Beprobungspunkt
$v_N$	[ m/s ]	Grundwasserneubildungsgeschwindigkeit

$V_a$	[ m/s ]	Abstandsgeschwindigkeit allgemein
$V_{dom}$	[ m/s ]	dominierende Abstandsgeschwindigkeit
$V_{max}$	[ m/s ]	maximale Abstandsgeschwindigkeit
$V_{med}$	[ m/s ]	mediale Abstandsgeschwindigkeit
$V_{mit}$	[ m/s ]	mittlere Abstandsgeschwindigkeit
$V_s$	[ m <sup>3</sup> ]	abflussfähiges Speichervolumen
$V$	[ m <sup>3</sup> ]	Volumen
$x$	[ m ]	Entfernung der 50-Tage-Linie von der Quellfassung

# 1 Veranlassung und Zielstellung

In Sachsen werden über 200 Quellgebiete für die öffentliche Trinkwasserversorgung genutzt. Die Quellgebiete erschließen vorzugsweise in den sächsischen Mittelgebirgen lokale Grundwasservorkommen und leisten einen unverzichtbaren Beitrag zur Trinkwasserversorgung der Bevölkerung.

Aus hydrologischer und fassungstechnischer Sicht stellen die sächsischen Quellgebiete einen Sonderfall der Grundwassernutzung dar. Es handelt sich zumeist nicht um Fassungen natürlicher Quellen, sondern um technisch ausgebaute Wassergewinnungsanlagen im Quellbereich oder im Oberlauf kleinerer Fließgewässer, sogenannte Sickerleitungsquellen oder Drainquellen.

Künstliche Quellenanlagen finden in der Fachliteratur nur geringe Beachtung. Aus diesem Grund bestand der Bedarf einer speziell auf die Eigenschaften von diesen speziellen Quellgebieten ausgerichteten Leitlinie. Die vom Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) 1997 zu dieser Thematik herausgegebene Broschüre wird mit dieser Publikation aktualisiert.

Der vorliegende Leitfaden richtet sich an die zuständigen Wasserbehörden, Wasserversorgungsträger, Ingenieurbüros und an die interessierte Öffentlichkeit. Er zeigt den fachlichen Standard bei der Ausweisung von Trinkwasserschutzgebieten für sächsische Sickerleitungsquellen auf und bietet Hilfestellung bei der Erarbeitung von Fachgutachten. Als Methodensammlung und als Leitfaden zur Durchführung und zur Bewertung der Fachgutachten unterstützt er die Ausweisung von rechtssicheren Trinkwasserschutzgebieten für Sickerleitungsquellen.

Unter Berücksichtigung von praktischen Erfahrungen bei der Erarbeitung von Gutachten für Wasserschutzgebiete zu Sickerleitungsquellen wurde der Schwerpunkt des Leitfadens auf methodische Fragestellungen gerichtet:

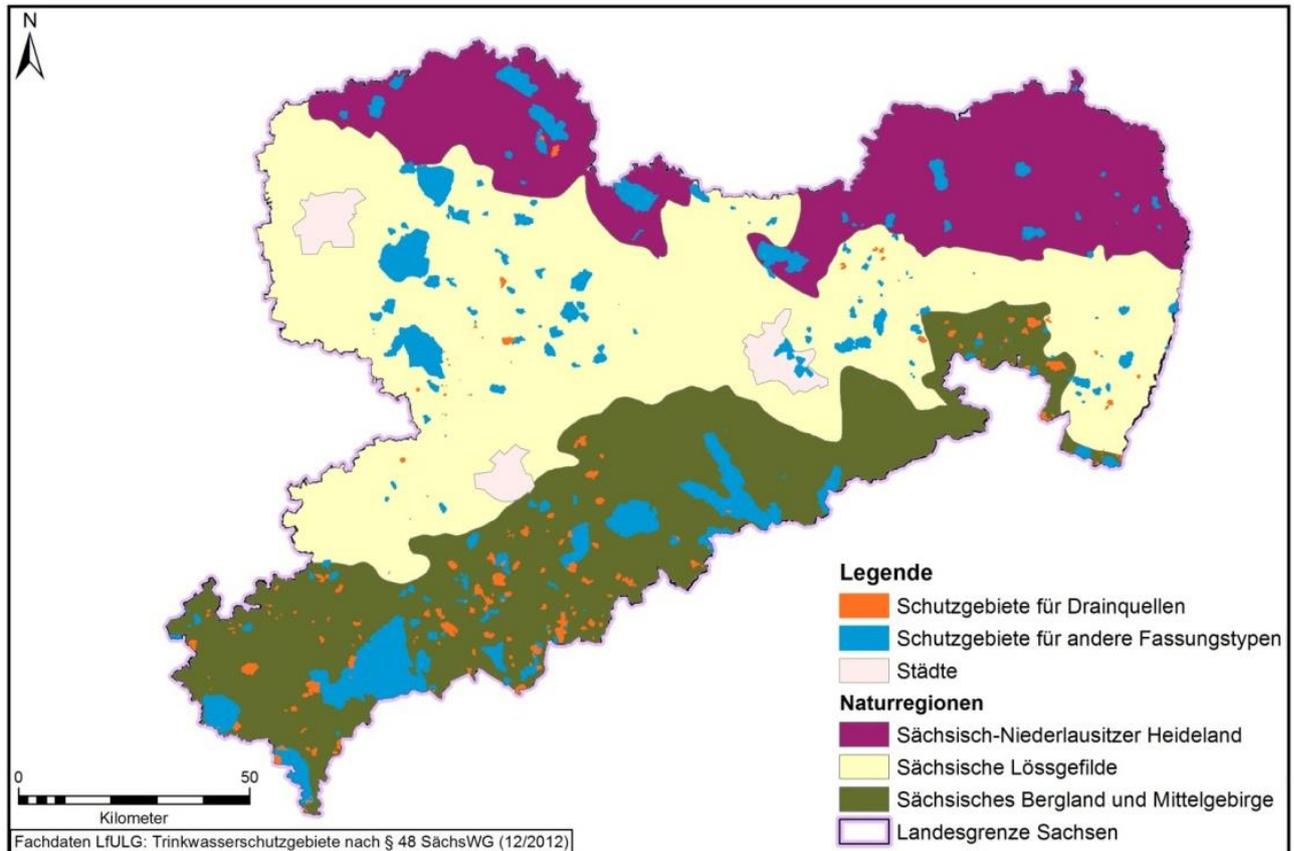
- Natürliche Quellen sind nicht Gegenstand der Ausführungen. Es werden ausschließlich Sickerleitungsquellen behandelt.
- Es werden charakteristische hydrologische und hydrogeologische Prozessbilder für die naturräumlichen Verhältnisse Sachsens beschrieben.
- Aktuelle Fachstandards werden in Bezug zu Sickerleitungsquellen interpretiert und erläutert.
- Die fachlichen Mindestanforderungen an die Datengrundlagen und die Bearbeitungsmethoden zur Ausweisung von Trinkwasserschutzgebieten werden beschrieben und im Zusammenhang mit den Grundsätzen der Verhältnismäßigkeit diskutiert.
- Die geeigneten Methoden zur Schutzzonenbemessung werden für eine praktische Umsetzung in den Grundzügen dargestellt und vergleichend bewertet. Alternative Möglichkeiten bei geringer Datenlage werden diskutiert.
- Es wird die Bewertung von Nutzungskonflikten als Grundlage einer fachlich begründeten Festlegung von Schutzbestimmungen dargestellt.

Die Grundsätze zur Erarbeitung von Fachgutachten zur Ausweisung von Trinkwasserschutzgebieten sind in den Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten (SMUL 2015) erläutert.

## 2 Besonderheiten in Sachsen

### 2.1 Quellgebiete zur Trinkwassergewinnung in Sachsen

Die Quellgebiete, die als Sickerleitungsquellen für die Trinkwasserversorgung genutzt werden, befinden sich überwiegend im Festgesteinsbereich der Mittelgebirge – Erzgebirge, Elstergebirge, Sächsische Schweiz, Oberlausitzer Bergland. Vereinzelt werden auch im Lockergesteinsbereich, insbesondere im sogenannten „Randpleistozän“, Sickerleitungsquellen für die Trinkwasserversorgung genutzt. Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Schutzgebiete für Drain- oder Sickerleitungsquellen in den sächsischen Naturregionen.



**Abbildung 1: Verteilung der Trinkwasserschutzgebiete für Sickerleitungsquellen in den sächsischen Naturregionen (LfULG 2013)**

Quellgebiete wurden Ende des 19. bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts für die lokale Trinkwasserversorgung erschlossen. Sie sind als sogenannte Sickerleitungs- oder Drainquellen in geringer Tiefe technisch ausgebaut. Nach Möglichkeit wurden die Grundwasserfassungen in der Nähe von Ortschaften in Quellbereichen und entlang kleiner Bäche angelegt.

#### Literaturhinweis:

TRESKATIS, CHR. & TAUCHMANN, H. (Hrsg.) (2013): Quellfassungsanlagen zur Trinkwasserversorgung – technische und naturwissenschaftliche Grundlagen für den Bau und Betrieb von Quellfassungen für die Wasserversorgung (DIV Deutscher Industrieverlag GmbH)

## 2.2 Charakteristik von Quelleinzugsgebieten

In der Regel wird der sächsische Festgesteinsbereich für diese Art der Trinkwassergewinnung genutzt. Vereinzelt wurden Fassungen im Lockergesteinsbereich angelegt.

Das Relief der ca. 0,5 bis 5 km<sup>2</sup> großen Quelleinzugsgebiete im Festgesteinsbereich wird durch weitläufige Hangbereiche und Kuppenlandschaften geprägt. Das Klima wird durch ihre Mittelgebirgslage bestimmt. Es fallen Niederschlagsmengen in der Größenordnung zwischen 700 mm bis > 1.000 mm pro Jahr, die Verdunstungsraten sind in Abhängigkeit von der Temperatur < 550 mm pro Jahr.

Der sächsische Festgesteinsbereich wird durch metamorphe Gesteine (vorwiegend Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite) und Magmatite (überwiegend Granodiorite und Granite) gebildet. Daneben kommen auch Sedimentgesteine (Tonsteine, Sandsteine und Konglomerate) vor. Lokal begrenzt wurden in Muldenlagen und Talauen fluviatile Lockergesteine abgelagert. Durch Verwitterungsprozesse sind die Festgesteine im oberen Bereich aufgelockert und zersetzt, in Hanglagen sind diese Verwitterungsbildungen häufig umgelagert (Solifluktuationsbildungen). Im Mittelgebirgsvorland, in Mittel- und Nordsachsen überlagern mächtige Lockergesteinsablagerungen den Festgesteinsuntergrund. Weiterführende Übersichten zur regionalen Hydrogeologie bieten JORDAN & WEDER (1995) sowie PÄLCHEN & WALTER (2008, 2011).

In den Quelleinzugsgebieten befinden sich vor allem feinkörnige Verwitterungsböden. Es überwiegen autochthone Böden mit teilweise kleinräumigen Verlagerungen. Diese bestehen überwiegend aus sandigem oder schluffigem Ton. In den Höhenlagen treten oft Ranker-, Braunerden- und Podsolgesellschaften auf. Vor allem in den unteren Hangbereichen sind Stauwasserböden (Pseudogley, Stagnogley) verbreitet. In den Muldenlagen kommen häufig Gleyböden vor. Auf den Hochflächen sind vereinzelt Moore ausgebildet.

Die Mächtigkeit der Lockergesteinsauflage und die Bodenmächtigkeit hängen von den jeweiligen örtlichen geologischen und geografischen Verhältnissen ab. Innerhalb eines Quellgebietes sind kleinräumige Wechsel der geologischen und bodenkundlichen Verhältnisse möglich.

Die zur Trinkwasserversorgung genutzten Quellgebiete liegen in Bereichen mit lokal erhöhtem Wasserdarbot. Oft handelt es sich um tektonisch stärker beanspruchte Bereiche, weil hier die verstärkte Klüftigkeit eine erhöhte Abflussspende ermöglicht.

In den Quelleinzugsgebieten werden Forst- und Landwirtschaft betrieben. Beeinflussungen durch den regional verbreiteten ehemaligen Bergbau sind möglich. Siedlungsgebiete und Gewerbestandorte liegen in der Regel außerhalb der Einzugsgebiete.

## 2.3 Aufbau von Sickerleitungsquellen

Quellen sind als räumlich eng begrenzte Grundwasseraustritte definiert (DIN 4049, Teil 3, Nr. 3.6.8). Ein Grundwasseraustritt ist nach DIN 4049, Nr. 3.6.7 das natürliche Zutagetreten von Wasser, das dabei von Grundwasser zu oberirdischem Wasser wird. Bauteile einer Fassungsanlage wie z. B. Sickerstränge sind nach LAWA (1995) auch Bestandteil der Quelle.

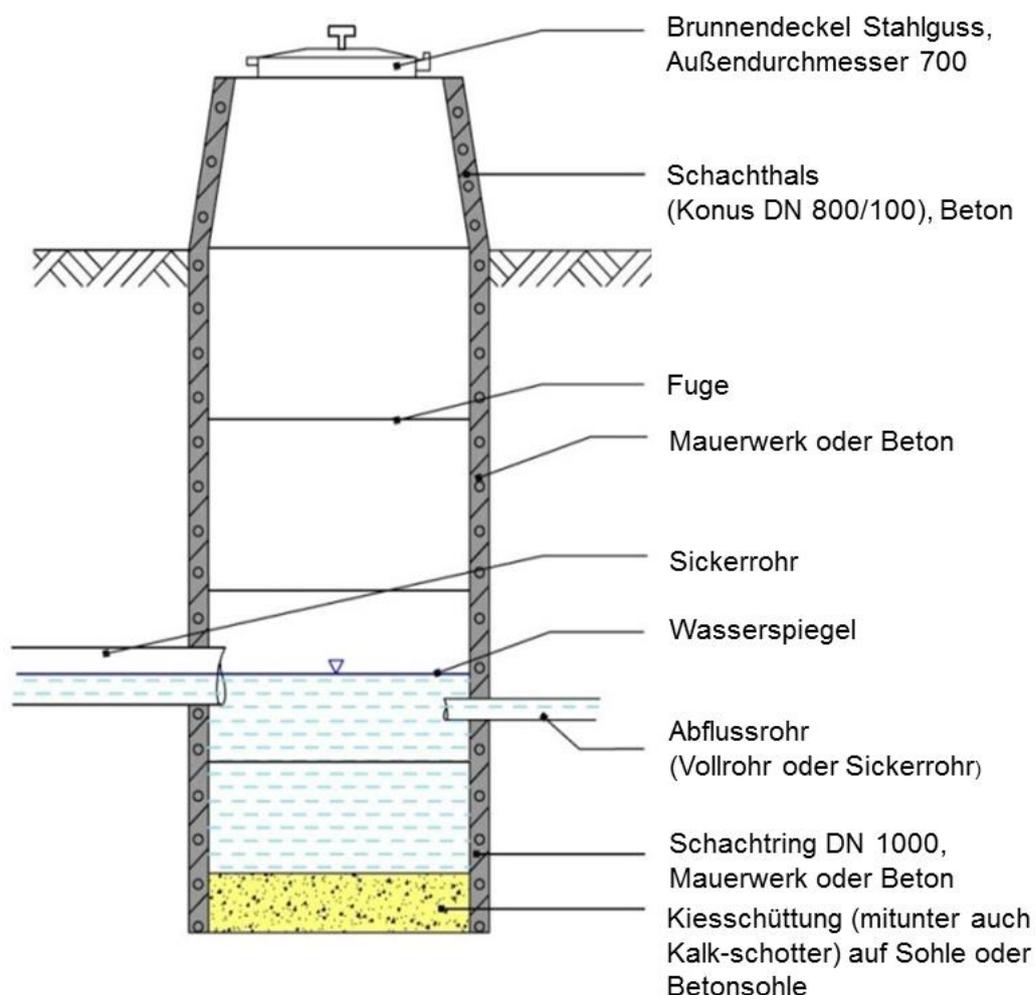
Sickerleitungsquellen können nicht nach der Klassifikation natürlicher Quellaustritte (z. B. Schichtquellen, Stauquellen und Verengungsquellen nach LAWA [1995]) beschrieben werden, sie werden hier als eigen-

ständiger Quelltyp behandelt. **Bei den sächsischen Sickerleitungsquellen handelt es sich um künstlich angelegte Wassergewinnungsanlagen** einschließlich aller fassungstechnischen Anlagenteile für Transport und Zwischenspeicherung im Untergrund bis zur Einspeisungsstelle in das Versorgungsnetz bzw. Wasserwerk.

Im Fassungsbereich von Sickerleitungsquellen befanden sich vor ihrer Errichtung oft diffuse Grundwasser-  
austritte (Quellmulden) oder ein kleines Fließgewässer. Die technischen Fassungsanlagen der Sickerlei-  
tungsquellen bestehen aus mehreren Quellschächten, in die zusätzlich oft Sickerleitungen seitlich einmün-  
den. Die Hauptfassung einer Sickerleitungsquelle befindet sich meist in einer Muldenlage, die einzelnen  
Quellschächte und Sickerleitungen erstrecken sich bis in die oberhalb anschließenden Hangbereiche.

Die Schachtsohle der ca. 2 m bis 10 m tiefen **Quellschächte** (auch Quellschrote genannt) ist in den meisten  
Fällen offen, damit hier Wasser eintreten kann. In älteren Schächten kann zusätzlich über die gemauerte  
Seitenwandung Wasser zu sickern. Schachtneubauten erfolgen mit Betonringen, sodass ein direkter Zufluss  
von Sickerwasser vermieden wird.

Der prinzipielle konstruktive Ausbau eines solchen Quellschachtes ist in der Abbildung 2 dargestellt.

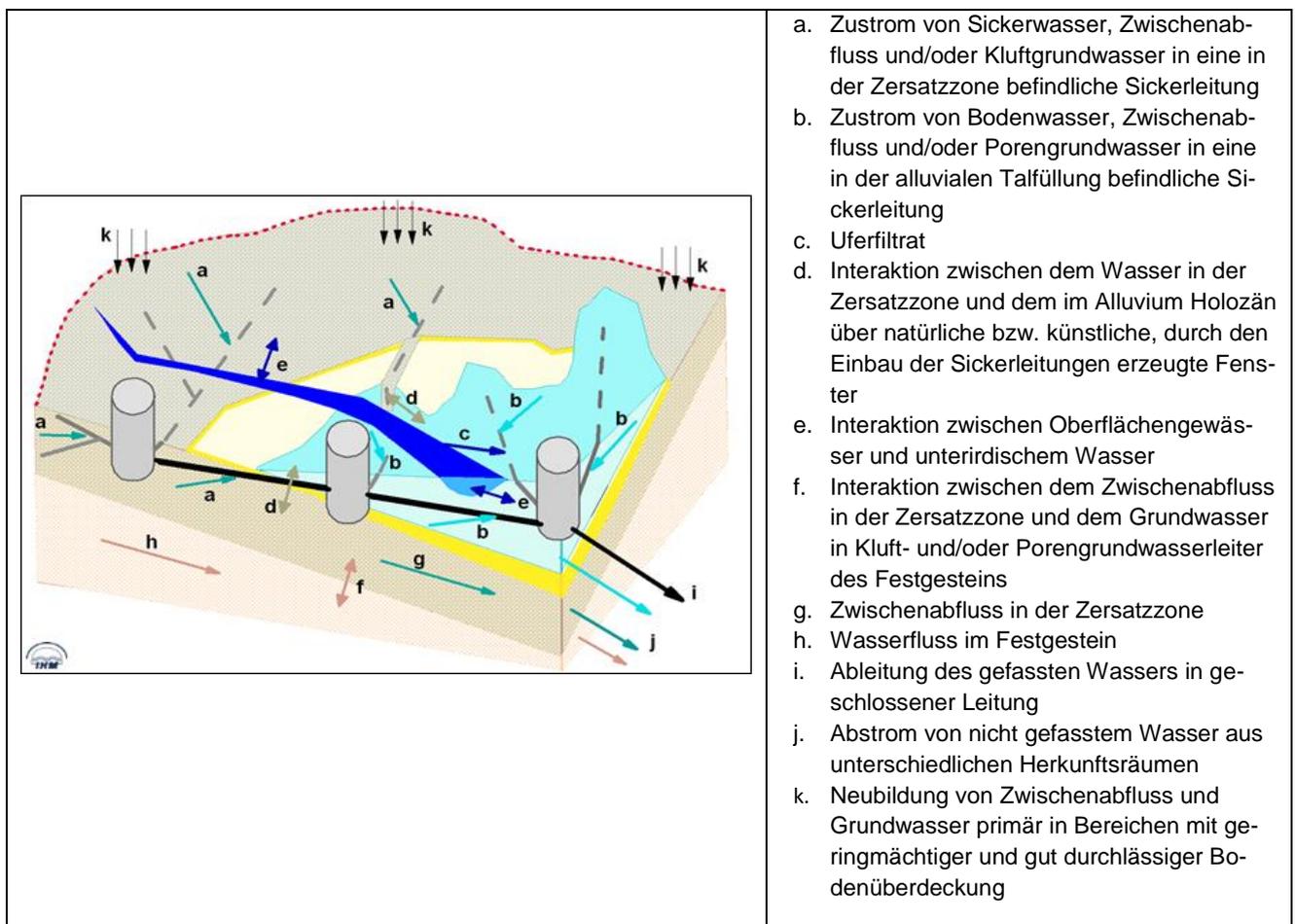


**Abbildung 2: Skizze des konstruktiven Schachtausbaus (nach HGN HYDROGEOLOGIE 2006)**

Perforierte Sickerleitungen, die in die Quellschächte einmünden, vergrößern den Wirkungsbereich der Wassserfassung. Sie sind in wasserführenden Bereichen oberhalb des Festgesteinsuntergrundes in der Lockergesteinsbedeckung (Verwitterungszone, Hangschutt oder Flussablagerungen) angelegt.

Ein Quellgebiet besteht in der Regel aus mehreren Quellschächten mit Sickerleitungen, die über geschlossene Transportleitungen oder weitere Sickerleitungen miteinander verbunden sind. Das Leitungssystem ist in der Regel über mehrere hundert Meter verzweigt und läuft am niedrigsten Punkt des Einzugsgebietes in einem (Haupt-)Sammelschacht zusammen. Vom Sammelschacht wird das gefasste Wasser über geschlossene Leitungen der Aufbereitung im Wasserwerk zugeführt und in das Versorgungsnetz eingespeist. An Verzweigungsstellen und Zwischenabschnitten ermöglichen Kontrollschächte den Zugang zum Leitungssystem.

Der Aufbau einer Sickerleitungsquelle und die Art der Erschließung des unterirdischen Wassers im klüftigen, verwitterten Festgestein werden in Abbildung 3 in einer schematischen Geländeaufsicht verdeutlicht.



**Abbildung 3: Schematische Aufsicht zum Aufbau einer Sickerleitungsquelle einschließlich der hydrologischen Abflussprozesse (ARGE ISOTOPENUNTERSUCHUNGEN 2010, 2011b)**

## 2.4 Herkunftsräume des Wassers und Abflussprozesse

Entscheidend für die Ausweisung von Trinkwasserschutzzonen für Sickerleitungsquellen ist – wie auch für andere Wasserfassungsanlagen – die Kenntnis über die Herkunftsräume und die damit verbundene hydrogeologische, hydraulische und hydrochemische Herkunft des genutzten Grundwassers. Bemessungsgrundlagen (Kapitel 5) und methodisches Vorgehen (Kapitel 6) müssen deshalb bei der Schutzzonenausweisung auf die Gebietspezifität ausgerichtet sein.

Zu betrachten ist stets das gesamte unter- und oberirdische Einzugsgebiet der Sickerleitungsquelle. Bestimmt und beschrieben werden die dazugehörigen Bereiche im Untersuchungsgebiet durch das hydrogeologische Modell, die oberflächigen Standorteigenschaften und das Prozessbild der Abflusskomponenten.

Welche Komponenten maßgeblich zum Abfluss eines Einzugsgebietes beitragen, hängt von den spezifischen Gebietseigenschaften wie Geologie, Bodeneigenschaften, Landnutzung und Morphologie ab. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind die ereignisabhängigen Faktoren wie (Vor-)Bodenfeuchte, Niederschlagsintensität und -dauer, Grundwasserstand. Der Anteil der einzelnen Prozesse und Wasserflüsse ist wegen der wechselnden naturräumlichen Gegebenheiten von Fassung zu Fassung unterschiedlich.

Die Fassungsanlagen wurden in der Regel im Bereich kleiner Fließgewässer und vorhandener Vernäsungsflächen bzw. vereinzelt im Wirkungsbereich von Störungszonen mit günstigeren Bedingungen für Wasserzuflüsse errichtet. Die Interaktion zwischen Fassungsanlage und Oberflächengewässer bzw. hydraulisch wirksamerem Bereich ist oftmals erwünscht, um das verfügbare Dargebot zu erhöhen und/oder zu stabilisieren.

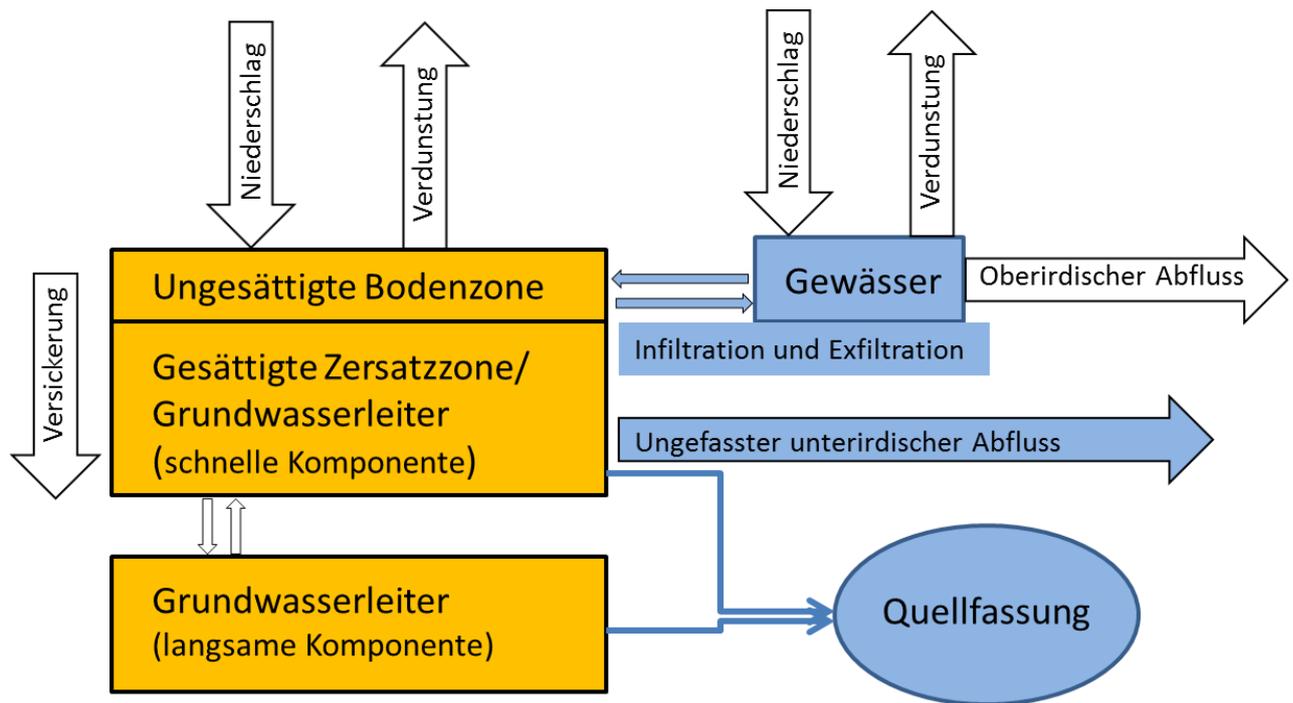
Das kompakte Festgestein, sofern es keine Klüfte und wasserführende Störungen enthält, wirkt als Grundwasserhemmer, auf dem sich in der Auflockerungs- und Zersatzzone (Verwitterungszone) das Sicker- bzw. Hangwasser sammelt. Ist die Zersatzzone durchlässig, kann diese abflusswirksam werden. Trifft zudem ein tieferer Sickerschacht auf eine wasserwirksame tektonische Störungs- oder Kluftzone, wird in der Fassungsanlage auch Kluftgrundwasser gefasst.

Höher gelegene Teile des Quelleinzugsgebietes sind zuweilen nur temporär wasserführend. In abflussarmen Perioden können räumlich differenziert Bereiche zeitweise trockenfallen. Der Zersatz- und Auflockerungshorizont und insbesondere die alluvialen Talauen können insbesondere in den tiefer gelegenen Bereichen des Quelleinzugsgebietes als Grundwasserleiter angesehen werden, der neben dem Zwischenabfluss auch oberflächennahes Grundwasser führt.

In den Hang- und Muldenlagen ist die Zersatzzone meist durch Solifluktionsbildungen und/oder alluviale Lockergesteine überlagert. Diese führen dazu, dass das Grundwasser in der Zersatzzone häufig gespannt ist und zur Ausbildung eines Lockergesteinsgrundwasserleiters führt. Im Bereich eines lokalen Talgrundwasserleiters sind oft die ergiebigsten Sickerleitungsstrecken angelegt. Weil in den alluvialen Muldenlagen vorwiegend wasserstauende Böden vorkommen, ist die Grundwasserneubildung dort meist gering bis äußerst gering. Der Lockergesteinsgrundwasserleiter wird damit primär aus lateral zutretendem Zwischenabfluss und vom Grundwasserabfluss des Einzugsgebietes gespeist.

Durch die dränierende Wirkung der Fassung werden die ehemals meist sehr nassen Talmulden teilweise trockengelegt. Das führt dazu, dass weniger oder überhaupt kein Oberflächenabfluss mehr auftritt. Auch der Zwischenabfluss wird stark reduziert oder verschwindet temporär völlig.

Die Beschreibung der an einer Sickerleitungsquelle beteiligten Wasserhaushaltskomponenten kann abstrahiert durch ein einfaches hydrologisches Strukturmodell für das Quelleinzugsgebiet als Prozessbild dargestellt werden (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Konzeptionelles Strukturmodell zum Prozessbild von Sickerleitungsquellen**

Gemäß dem dargestellten Prozessbild können die folgenden Abflusskomponenten an dem in Sickerleitungsquellen gefassten Wasser beteiligt sein:

- Zwischenabfluss aus verschiedenen Niveaus der ungesättigten Zone
- Porengrundwasser aus der Verwitterungszone
- Porengrundwasser aus einem quartären Talgrundwasserleiter
- eventuell zusätzliche Anteile Kluftgrundwasser aus dem Festgesteinsgrundwasserleiter

Bei der Beschreibung der Abflussprozesse ist auf eindeutige Begrifflichkeiten zu achten, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die hier verwendeten hydrologischen Begriffe entsprechen den Definitionen gemäß DIN 4049 Hydrologie, Teil 1-3 (1992, 1990, 1994). Die wichtigsten Definitionen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Wasserhaushaltskomponenten nach DIN 4049, Teil 3**

Begriff	Definition (gekürzt)	DIN
Oberflächenabfluss	Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) über die Bodenoberfläche unmittelbar zugeflossen ist.	DIN 4049-3, 2.2.24
Sickerwasser	Unterirdisches Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft im Sickerraum (der zum Betrachtungszeitraum kein Grundwasser enthält) abwärts bewegt.	DIN 4049-3, 3.1.3
Zwischenabfluss (Interflow)	Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) aus den oberflächennahen Bodenschichten unmittelbar zugeflossen ist. Der Zwischenabfluss ist gegenüber dem Oberflächenabfluss zeitlich verzögert.	DIN 4049-3, 2.2.25
Grundwasserneubildung	Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser	DIN 4049-3, 3.6.17
Grundwasser	Unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Lithosphäre zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird.	DIN 4049-3, 3.1.2
Grundwasserabfluss	Grundwasservolumen, das einem Grundwasserabschnitt in der Zeiteinheit in dasselbe Grundwasserstockwerk abfließt	DIN 4049-3, 3.6.13
Direktabfluss	Summe aus Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss	DIN 4049-3, 2.2.26
Basisabfluss	Abflussanteil ohne Direktabfluss	DIN 4049-3, 2.2.27
Trockenwetterabfluss	Abfluss nach längerem Zeitraum ohne Effektivniederschlag, der nur aus grundwasserbürtigem Abfluss besteht.	DIN 4049-3, 2.2.29
Grundwasserüberdeckung	Gesteinskörper oberhalb einer Grundwasseroberfläche	DIN 4049-3, 3.3.4
Grundwasserleiter	Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten	DIN 4049-3, 3.3.1
Uferfiltrat	Wasser, das aus oberirdischen Gewässern unmittelbar in den Grundwasserraum eingedrungen ist, ausgenommen durch Versinkung	DIN 4049-3, 3.6.2

Die Quellschüttung ist bei Sickerleitungsquellen zwar meist ganzjährig gegeben, kann in einigen Fällen aber auch periodisch mit Trockenfallen im Sommer oder Frühherbst oder in ausgeprägten Niedrigwasserperioden verbunden sein. Fassungen oder Teile von Fassungen, die oft trockenfallen, werden praktisch nur aus den schnellen Komponenten des Zwischen- und Grundwasserabflusses gespeist und haben einen erheblichen, episodisch dominierenden Anteil an der Quellschüttung. Diese Abflusskomponente weist kurze Verweilzeiten im Einzugsgebiet auf. Der grundwasserbürtige Abfluss hat in der Regel deutlich längere Verweilzeiten. Die Dynamik der abflussbildenden Prozesse im Einzugsgebiet ist damit bedeutend höher als bei großräumigen Grundwasserkörpern mit mächtigen Deckschichten. Die geohydraulischen Verhältnisse sind vorrangig instationär und von den Standortbedingungen sowie der Niederschlagsverteilung abhängig.

Das Wasser aus Sickerleitungsquellen kann demnach ebenfalls in seiner Beschaffenheit größeren Schwankungen ausgesetzt sein. Die qualitativen Veränderungen stehen im engen Zusammenhang mit witterungsbedingten Änderungen der oben genannten Abflussanteile.

Ebenso sind Isochronen (z. B. die 50-Tage-Isochrone) damit im Einzugsgebiet nicht ortsfest, sondern in ihrer Lage von der aktuellen hydraulischen Situation abhängig. Insbesondere der zeitlich schwankende Beitrag der einzelnen beteiligten Herkunftsräume und Fließwege zur Quellschüttung ergeben ein instationäres Verhalten der resultierenden mittleren Abstandsgeschwindigkeiten.

Sickerleitungsquellen haben aufgrund ihrer Oberflächennähe eine geringe natürliche Geschützttheit gegenüber anthropogenen Einwirkungen und sind erhöhten potenziellen Gefährdungen ausgesetzt.

Zusammenfassend müssen folgende Besonderheiten aufgrund des spezifischen Aufbaus von Sickerleitungsquellen bei der Schutzgebietsausweisung beachtet werden:

- Die Sickerleitungen sind in der Regel in der Auflockerungs- und Zersatzzone des Festgesteins verbaut. Somit sind die wichtigsten beteiligten Abflusskomponenten Zwischenabfluss und oberflächennaher Grundwasserabfluss.
- Befindet sich ein Oberflächengewässer im Einzugsgebiet, kann es je nach hydraulischem Gradient zwischen Oberflächengewässer und Fassungsanlage zu saisonal infiltrierenden oder exfiltrierenden Verhältnissen kommen. Infiltriert Wasser aus dem Fließgewässer, so wird von der Quelfassung Uferfiltrat gefasst.
- Liegt die Quelfassungsanlage im geklüfteten Festgesteinsbereich oder im Bereich geologischer Störungszonen, kann durch die Quelfassung teilweise Klutgrundwasser gefasst werden.
- Teile des Quelleinzugsgebietes können temporär trockenfallen. Die hydrodynamischen Verhältnisse sind instationär, somit auch die Grenzlinie der 50-Tage-Isochrone.
- In den Muldenlagen ist die Zersatzzone meist durch Solifluktionsbildungen und/oder alluviale Lockergesteine überdeckt und kann als grundwasserführender Bereich betrachtet werden, der neben Zwischenabfluss auch oberflächennahes Grundwasser führt.
- Mit den variablen hydrodynamischen Verhältnissen einhergehend und auch in Abhängigkeit von der Landnutzung kann die Beschaffenheit des gefassten Wassers hohen Schwankungen ausgesetzt sein.

## 3 Ausweisung der Schutzzonen – Rechtliche und fachliche Grundlagen

Der Ablauf des Verfahrens zur Ausweisung von Trinkwasserschutzzonen ist in den „Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten“ des SMUL (2015) dargelegt.

Die Ausweisung und Festsetzung von Trinkwasserschutzgebieten soll nach § 51 (2) WHG unter Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik erfolgen. Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik sind in Anlage 1 (zu § 3 Nummer 11) des WHG nachzulesen. Für den nachhaltigen Schutz von Trinkwasser aus Quellgebieten dient das **DVGW-Arbeitsblatt W 101** als grundlegende fachliche Anwenderrichtlinie. Ferner sollten u. a. auch weitere Regelwerke, Gesetze oder Verordnungen bei der Ausweisung und Bewertung von Gefahrenpotenzialen Beachtung finden (siehe auch Kapitel 7)

### Anwendung des DVGW-Arbeitsblattes W 101

Für die Erarbeitung der zur Festsetzung eines Wasserschutzgebietes gemäß § 46 (2) SächsWG erforderlichen Unterlagen, insbesondere Karten, Pläne und Gutachten, sind die „Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten“ (SMUL 2015) – speziell Kapitel 4 (Anforderungen an Fachgutachten für Wasserschutzgebiete) und Kapitel 8 (Inhalt und Gliederung von Fachgutachten) – und das DVGW-Arbeitsblatt W 101 (DVGW 2006) die zentrale fachliche Grundlage. Die Empfehlungen des DVGW-Arbeitsblattes W 101 gelten sinngemäß auch für Sickerleitungsquellen.

Das DVGW-Arbeitsblatt W 101 muss den jeweiligen örtlichen Verhältnissen entsprechend differenziert angewendet werden. Dabei ist jedes Wasserschutzgebiet in Bezug auf die geologischen, hydrologischen und

nutzungsspezifischen Gegebenheiten und in Bezug auf Vorbelastungen, Belastungstrends und Sanierungsprioritäten besonders zu betrachten.

Die für die verschiedenen Schutzzonen geltenden Mindestanforderungen an die Größe der Schutzzonen sind durch das DVGW-Arbeitsblatt W 101 (2006) festgelegt und in SMUL (2015) beschrieben.

### Besonderheiten bei Sickerleitungsquellen

Im DVGW-Arbeitsblatt W 101 (2006) wird empfohlen, bei der Bemessung der Schutzzonen trotz unterschiedlicher hydrogeologischer Verhältnisse und unterschiedlicher Grundwasserleitertypen (Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter) nach möglichst einheitlichen Kriterien vorzugehen (DVGW 2006, Kap. 4.1: S.7). Bei komplexen hydrogeologischen Verhältnissen kann die Schutzgebietsbemessung anhand morphologischer, geo- und hydrogeologischer Ersatzkriterien erfolgen. Aufgrund der Besonderheiten im Aufbau und der hydrogeologischen Einordnung der Abflussprozesse ist in sächsischen Quellgebieten die Konstruktion von Hydroisohypsen oder die Anwendung von hydraulischen Berechnungsverfahren in der Regel nicht möglich. Neben den oben genannten Ersatzkriterien, die sich fachlich in die konzeptionelle Beschreibung des Untersuchungsgebietes zum Aufbau des hydrogeologischen Modells bzw. Prozessverständnisses einreihen, muss auch der Aufbau der Grundwasserüberdeckung und ihre natürliche Schutzfunktion berücksichtigt werden.

In der Übertragung der allgemeinen Anforderungen des DVGW-Arbeitsblattes W 101 (2006) an Grundwasserfassungen auf den speziellen Fall der sächsischen Sickerleitungsquellen sind demnach folgende Besonderheiten zu beachten:

- Geschlossene Verbindungsleitungen zwischen den Schroten bis zum untersten Sammelschacht der unmittelbaren Wasserfassungsanlage sollten unter folgenden Voraussetzungen in die Schutzzone I einbezogen werden:
  - Bauliche Ausführung und Lage der Verbindungsleitung ist nur unzureichend bekannt.
  - Der Zustand der geschlossenen Sickerleitung ist bekannt, aber ein Wassereintritt kann nicht vollständig ausgeschlossen werden.
  - Der Wasserzutritt über die Schrote (z. B. offene Kiessohle, undichtetes Mauerwerk) oder ein Wasserzutritt unkontrolliert über die Rohrbettung kann nicht ausgeschlossen werden.
- Geschlossene Verbindungsleitungen vom untersten Sammelschacht zum Wasserwerk oder zu weiteren Verteilungs- oder Aufbereitungsanlagen müssen nicht in die Schutzzone I einbezogen werden.
- Isochronen (z. B. die 50-Tage-Linie für die Zone II) sind im Einzugsgebiet insbesondere von Sickerleitungsquellen nicht ortsfest, sondern in ihrer Lage von der aktuellen hydraulischen Situation abhängig. Insbesondere der zeitlich schwankende Beitrag der einzelnen beteiligten Herkunftsräume und Fließwege zu Quellfassungen ergeben ein extrem instationäres Verhalten der Zuflusskomponenten. Im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen müssen deshalb stets „kritische“ Abstandsgeschwindigkeiten, auch im Hinblick auf mögliche Gefährdungspotenzialen betrachtet werden, wie sie sich in abflussintensiven Zeiten – z. B. nach dem Ende der Schneeschmelze oder nach Starkregenereignissen für die schnellen Abflusskomponenten – ergeben.
- Unter Berücksichtigung der genannten Instationaritäten sollte die Bestimmung der 50-Tage-Linie anhand der Auswertung von Quellschüttungsmessungen über die Fließgeschwindigkeit während der mittleren jährlichen Höchstschüttung (MHQ) erfolgen. Erforderlich sind wöchentliche Messungen der gesamten Quell-

schüttung (einschließlich Überlaufmengen) über drei Jahre, aber mindestens über ein Jahr. Weitere Hinweise sind dem Kapitel 5.1 und Kapitel 6.2.2 zu entnehmen.

- Weil die Sickerstränge fast immer in Tiefen mit weniger als 5 m unter Gelände liegen, entfällt für Quelfassungen die Möglichkeit der Reduzierung oder des Entfallens der Zone II auf Basis des Nachweises (sehr) gering durchlässiger und durchgehend verbreiteter Deckschichten mit einer Mächtigkeit von über 5 m.
- Aufgrund der zumeist hohen Abstandsgeschwindigkeiten kann die Schutzzone II eines Quellgebietes sehr groß sein und im Extremfall bis an die Grenze des oberirdischen Einzugsgebietes heranreichen.
- Wenn aufgrund der heterogenen Abflussanteile eine 50-Tage-Linie nicht ausgewiesen werden kann, sollten entsprechend Standortzonenkonzept zumindest die Flächen, von denen erhöhte potenzielle Gefährdungen des Grundwassers ausgehen können, in die Zone II einbezogen werden, um dem Schutzziel entsprechen zu können. Weitere Hinweise zur Anwendung des Standortzonenkonzeptes sind in Kapitel 6.2.5 erläutert.
- Im Zusammenhang mit Karst- und Kluffgrundwasserleitern weist das DVGW-Regelwerk W 101 auf „Bereiche mit oberflächennaher Bergbautätigkeit“ hin, die hydrogeologisch wie Karst- bzw. Kluffgrundwasserleiter zu bewerten sind. Dieser Fall tritt in sächsischen Quellgebieten relativ häufig auf und ist deshalb stets zu beachten.
- Die Schutzzone III sollte das gesamte unterirdische Einzugsgebiet umfassen. Ist dieses nicht ausgrenzbar, so muss zuerst das oberirdische Einzugsgebiet bestimmt werden. Danach ist fachlich zu belegen, inwieweit ein zusätzlicher unterirdischer Zufluss z. B. über altbergbauliche Anlagen oder Wasserzutritte durch Klüfte und Störungen vorhanden ist, dessen Gefährdungspotenzial für die Wasserfassung von Bedeutung ist. Mit der Prüfung der Wasserbilanz auf Basis der mittleren Gesamtschüttung des QG (Aufbau und die Herkunft der gefassten Abflusskomponenten [oberflächennahes Grundwasser und Zwischenabfluss]) sollte die Größenordnung der unterirdischen Zuflüsse bestimmt werden. Auch der MNQ in Verbindung mit den unterirdischen Abflusskomponenten des jeweiligen Gebietswasserhaushaltes ermöglicht Rückschlüsse auf die Größe des unterirdischen Einzugsgebietes. Ergänzend können Isotopenmessungen (speziell Tritium, ggf. auch tritiogenes Helium) und Markierungsversuche (v. a. mittels Fluoreszenz- oder Salztracern) wichtige Hinweise auf unterirdische Einzugsgebiete liefern, die über das oberirdische Einzugsgebiet hinaus reichen. Sind bedeutende unterirdische Zuflüsse fachlich auszuschließen, kann das morphologisch ausgegrenzte oberirdische Einzugsgebiet mit dem unterirdischen Einzugsgebiet gleichgesetzt werden.
- Befindet sich ein Oberflächengewässer in Quellschrot- oder Sickerleitungsnähe, muss geprüft werden, inwieweit dieses infiltriert und somit zur Gesamtschüttung beiträgt. In diesem Fall muss in Abhängigkeit seines Gefährdungspotenzials für das Quellgebiet das Gewässer bzw. dessen Einzugsgebiet ganz oder zumindest zum Teil zum Quelleinzugsgebiet hinzugefügt und bei der Schutzzonenausweisung berücksichtigt werden.
- Die nach DVGW 2006, Kap. 4.4.2 mögliche Unterteilung der weiteren Schutzzone (Zone III) in Zone III A und III B beruht auf der Annahme, dass die Gefährdung des zu fördernden Grundwassers mit zunehmender Verweilzeit und Mächtigkeit des Grundwasserleiters abnimmt. Bei Sickerleitungsquellen kann dies aufgrund ihres Aufbaus, den zumeist hohen Abstandsgeschwindigkeiten und der geringen Geschütztheit durch die überdeckenden Schichten nicht herangezogen werden.

Die fachliche Vertiefung der geeigneten Methoden zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Sicherleitungsquellgebieten wird in den nachfolgenden Kapiteln vorgenommen.

Zur Bewertung von Konfliktpotenzialen ist ebenfalls das DVGW-Arbeitsblatt W 101 zu beachten, das in Vorbereitung von Nebenbestimmungen grundsätzlich Einzelfallprüfungen vorsieht. Im Einzelfall über die Empfehlung des DVGW-Arbeitsblattes hinausgehende Forderungen sind im Hinblick auf die Rechtssicherheit in Festsetzungsverfahren unter Berücksichtigung der Angemessenheit fachlich nachvollziehbar zu begründen.

## 4 Bemessungsgrundlagen

Für die Erstellung von Fachgutachten zur Ausweisung von Trinkwasserschutzzonen in Quellgebieten sind, wie auch bei anderen Trinkwasserfassungsarten, grundlegende Informationen, Unterlagen und Daten nötig. Neben den administrativen Unterlagen und den allgemeinen Informationen zur Ffassungsanlage ist die detaillierte Beschreibung der naturräumlichen und hydrogeologischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes zum Aufbau des hydrogeologischen Modells ebenso nötig wie die Recherche und ggf. Erhebung (durch zusätzliche Untersuchungen) von hydrologischen, pedologischen und geohydraulischen Parametern und Kennwerten. Diese Informationen tragen zum Verständnis der Abflussprozesse und letztendlich zur fachlich begründeten Ausweisung der Trinkwasserschutzzonen bei.

Je präziser die Datenrecherche, -aufbereitung und ggf. Neuerhebung erfolgt, desto genauer kann das hydrogeologische Modell mit seinen Abflussprozessen des Quellgebietes beschrieben werden. Zu den wichtigen Datengruppen zählen:

- Administrative Unterlagen
- Unterlagen zur Ffassungsanlage
- Naturräumliche und hydrogeologische Verhältnisse des Einzugsgebietes, Angaben zur Vegetation und Flächennutzung
- Messdaten und geohydraulische Kennwerte
- Informationsdefizite

Hinweise zur Auswertung und Interpretation von gemessenen bzw. berechneten Daten im Hinblick auf die Schutzzonenausweisung werden im Kapitel 5 und Kapitel 6 dargelegt. Hinweise zur Datenrecherche sind im Kapitel 5 der „Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten“ (SMUL 2015) gegeben.

### 4.1 Unterlagen zur Ffassungsanlage

Für die Festlegung eines Wasserschutzgebietes sind vorab grundlegende Mindestinformationen zur Ffassungsangabe zu erheben bzw. zu recherchieren. Hierdurch wird die eindeutige räumliche und verwaltungstechnische Zuordnung ermöglicht. Für einige Untersuchungsmethoden zur Schutzzonenabgrenzung sind eine behördliche Genehmigung und/oder die Zustimmung der Grundstückseigentümer einzuholen.

Zu den administrativen Unterlagen gehören neben der gültigen wasserrechtlichen Erlaubnis für die Wasserentnahme aus der Wasserfassung auch die bestätigte Schutzbedürftigkeit, Schutzwürdigkeit und Schutzfähigkeit durch die zuständige Wasserbehörde (vgl. SMUL 2015).

Die Anordnung, Ausdehnung und Teufenlage der Fassungsanlagen stellt die zentrale fachliche Bemessungsgrundlage dar. Die Bauart der Fassungsanlage (Schächte, Leitungen, Überläufe) einschließlich ihrer Zuflussbereiche und aller Kontrollschächte sowie der Verlauf der Sickerleitungen sind mit Ost-, Nordwert (früher: Rechts-, Hochwert), Höhe über HN, Höhe über Gelände und Ausbau zu dokumentieren (Tabellen, Karten z. B. in Form von sog. Steckbriefen, Skizzen des Ausbaus). Soweit recherchierbar sollten dabei auch Baujahr, spätere Umbauten, Erweiterungen und Angaben zu verwendeten Baumaterialien erhoben werden. Entscheidend für die Bemessung von Sickerleitungsquellen sind die Ermittlung der Lage und Abmessungen der eigentlichen Wasserfassung (Sickerschächte, Sickerleitungen). Ist auch durch eine Kamerabefahrung nicht klärbar, welche Anlagenteile Sickerleitungen sind, muss bei der späteren Bemessung vom „worst case“ ausgegangen werden, d. h. alle eventuell geschlitzten/gelochten und undichten Leitungen und Quellschächte müssen als möglicher Zuflussbereich ausgewiesen werden. In der Anlage 1 ist beispielhaft die Dokumentation einer Fassungsanlage enthalten, wie sie als Grundlage für weitere Arbeiten zum Bemessungsvorschlag geeignet ist.

Zur eindeutigen Zuordnung der Fassungsanlage sind folgende Informationen vom Betreiber vorzulegen:

- Name der Fassungsanlage, Betreiber/Besitzer der Anlage
- Verwaltungszugehörigkeit der Fassungsanlage und des gesamten Einzugsgebietes (Gemeinde, Gemarkung, Landkreis, Landesdirektion). Eine etwaige Zugehörigkeit zu mehreren Gebietskörperschaften ist zu beachten und zu benennen. In diesem Falle muss dargelegt werden, welche Wasserbehörde für die Fassungsanlage die federführende ist. Für die Erfassung müssen gegebenenfalls auch Einzugsgebietsbereiche, die nicht auf sächsischem Staatsgebiet liegen, mit untersucht werden.
- Einschätzung der Bedeutung der Quelfassung für die kommunale und regionale Wasserversorgung anhand der aktuellen Wasserversorgungskonzeption. Neben der Entnahmemenge sind hier vor allem alternative Versorgungsmöglichkeiten zu recherchieren.
- Darlegung der Versorgungsstruktur des Versorgungsgebietes
- wasserrechtliche Erlaubnis der Wasserentnahme mit durchschnittlicher und maximaler Wasserentnahme
- aktuelle Lage- und Ausbaupläne der Fassungsanlage (inkl. aller Sickerstränge, vollständiger Verlauf und Ausdehnung) sowie deren Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte
- Topografische Karten und Flurstückskarten im geeigneten Maßstab (1 : 25.000 oder 1 : 10.000), abhängig von der Größe des Einzugs- bzw. Untersuchungsgebietes
- Hydrogeologische Gutachten zu früheren Schutzgebietsausweisungen, Zusammenstellungen aus früheren hydrogeologischen Kreisübersichtsgutachten der DDR, sonstige Fachgutachten zur Wasserfassung

Oftmals sind der vollständige Verlauf und die Ausdehnung der einzelnen Sickerstränge nicht bekannt. Deren Kenntnis ist aber von hoher Bedeutung für die Klassifizierung der Zuflussräume. Folgende ergänzende Untersuchungen sind möglich:

- Die Kontrollschrote müssen vor Ort aufgenommen werden. Sie zeigen die Höhenlage der Sickerleitungen. Meistens liegen hier die Verzweigungsstellen der Sickerleitungen. Durch Einpeilen kann der Verlauf der Sickerleitungen abgeschätzt werden. Die Lage der Sickerköpfe der Quelfassung kann so allerdings nicht festgestellt werden. Mitunter ist der Beginn einer Sickerleitung durch markierte Steine im Gelände gekennzeichnet. Darauf ist bei der Begehung zu achten. Die Länge und mögliche Verzweigungen von Sickerleitungen können in vielen Fällen nur mit Kamerabefahrungen festgestellt werden.

- Bei einer Druckspülung der Fassungsanlage kann die Länge der Leitungsabschnitte bestimmt werden. Die Schüttungsleistung der Quelle wird dadurch ebenfalls verbessert und Verunreinigungen und Verstopfungen können behoben werden. Genauere Informationen können Kamerabefahrungen vor der Druckspülung liefern.
- Metallische Leitungen (kommen in Sickerleitungsquellen/Drainquellen vereinzelt vor) können über induktive Ortungsgeräte lokalisiert werden. Einfache Ortungstechnik ist auch anwendbar, falls ein Metallband bei der Verlegung der Sickerleitung eingebaut wurde.
- Hinweise zum Verlauf von Rohrleitungen können auch über geophysikalische Methoden (Kap. 4.2.8) gewonnen werden.

## 4.2 Unterlagen zum Untersuchungsgebiet

### 4.2.1 Einzugsgebiet/Topografie

Maßgeblich für die Schutzzonenausweisung ist das unterirdische Einzugsgebiet der Fassungsanlage und darin hinein entwässernde (oberirdische) Flächen. Das Einzugsgebiet einer Sickerleitungsquelle erfasst alle relevanten Herkunftsräume des gefassten Wassers.

Das unterirdische Einzugsgebiet ist bei Sickerleitungsquellen häufig nur sehr schwer zu bestimmen. Die Annahme, dass das oberirdische Einzugsgebiet im weitesten Sinne dem unterirdischen Einzugsgebiet entspricht, muss fachlich plausibel begründet werden. Abweichungen (vom oberirdischen und/oder unterirdischen Einzugsgebiet) sind ebenfalls plausibel zu begründen und zu dokumentieren.

Befindet sich die Fassungsanlage im Lockergesteinsbereich, ist es oftmals möglich, das unterirdische dem oberirdischen Einzugsgebiet gleichzusetzen, weil dieses vorwiegend von der Morphologie abhängig ist. Im Festgesteinsbereich ist die Annahme einer Gleichsetzung von unterirdischem und oberirdischem Einzugsgebiet nur dann möglich, wenn der Einfluss von Kluftgrundwasser oder Störungszonen ausgeschlossen bzw. für nicht relevant eingestuft werden kann. Die hydrologische Anbindung an wasserführende Kluft- und Störungssysteme muss demnach ausführlich mittels Wasserhaushaltsbilanzen, Isotopenuntersuchungen und ähnlicher geeigneter Methoden untersucht, beschrieben und begründet werden.

Das ermittelte Einzugsgebiet als Schnittfläche von ober- und unterirdischem Einzugsgebiet ist in einer topografischen Karte im geeigneten Maßstab darzustellen.

### 4.2.2 Relief/Morphologie

Die zu berücksichtigenden Oberflächenformen können aus digitalen topografischen Karten bzw. aus einem Digitalen Geländemodell (DGM) bestimmt werden, für die örtliche Verifizierung von Details sind zusätzlich Geländebegehungen notwendig. Hinweise für eine eindeutige Reliefansprache sind in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AD-HOC AG Boden 2005) enthalten.

### 4.2.3 Hydrografie

Die hydrografischen Verhältnisse im Einzugsgebiet stehen meist in direkter Verbindung zur Quellgebietsfassung und können einen erheblichen Einfluss auf die Quellfassung ausüben. Neben den Oberflächengewässern (Stand- und Fließgewässer) sind auch wasserbauliche Anlagen zu erfassen. Außerdem sind Überleitungen aus bzw. in das natürliche hydrologische Einzugsgebiet der Quellfassung zu beachten.

Weil Karten in der Regel das Gewässernetz nur generalisiert wiedergeben, ist eine genaue Erfassung der Oberflächengewässer bis hin zur Lage und Struktur der Gewässersohle im Gelände vorzunehmen. Witterungsbedingte Zustandsänderungen des Gewässernetzes sind zu beachten, weil sie die vom Quellgebiet gefassten Abflussteile beeinflussen.

Bei Erkundung der Hydrografie des Quellgebietes müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Liegen infiltrierende oder exfiltrierende Verhältnisse zum Oberflächengewässer, ggf. abhängig vom hydraulischen Gradient zwischen dem Vorfluter und ggf. naheliegenden Schächten bzw. Sickerleitungen vor?
- Gibt es versickernde oder trocken gefallene Wasserläufe oder Feuchtfelder?
- Wie hoch ist der Anteil des infiltrierenden Oberflächenwassers in Bezug auf die gefasste Wassermenge im Quellgebiet?
- Welche Beeinträchtigungen können durch das infiltrierende Oberflächenwasser im Quellgebiet hervorgerufen werden?

#### 4.2.4 Klimatische Verhältnisse

Die klimatische Gebietsbeschreibung erlaubt erste orientierende Aussagen zu wesentlichen hydrologischen Vorgängen, auch in Verbindung mit den Informationen zum Vorflutsystem. Wichtige Größen sind der Niederschlag und die Temperatur mit ihrem charakteristischen Jahresgang sowie die Hauptwindrichtungen. Die klimatischen Daten können im weiteren Gutachten bei der Analyse des (Grund-)Wasserhaushaltes und der Einschätzung der Schüttungsmenge bzw. deren Schwankungen hilfreich sein.

Stationsbezogene Klimadaten (Niederschlags- und Klimastationen) können über das **regionale Klimainformationssystem ReKIS** ([www.rekis.org](http://www.rekis.org)) und darin integriert regionalisierte Zeitreihen (gemessen und projiziert) von Klimadaten über die **Rasterklimadatenbank RaKliDa** abgerufen werden.

Zur Ergänzung können weitere Daten aus nächstgelegenen meteorologischen Klima- und Niederschlagsstationen verschiedener Anbieter, ggf. auch privater Personen, deren Daten nicht im ReKIS vorhanden sind genutzt werden. Falls keine Messstationen in der Umgebung zu finden sind, sollte der regionalisierte Klimadatensatz aus ReKIS genutzt werden.

#### 4.2.5 Vegetation und Landnutzung

Die ökologischen Standortansprüche der potenziell natürlichen und der aktuell vorhandenen Vegetation ermöglichen Rückschlüsse auf die Ausprägung bestimmter naturräumlicher Bemessungsgrundlagen wie Klima, Boden, Geologie oder Hydrogeologie. Über das Vorkommen von Zeigerarten kann ein ökologischer Feuchtegrad bestimmt werden (AG Boden 2005). Zur landschaftsökologischen Orientierung kann eine charakterisierende Gebietsbeschreibung auf Grundlage geobotanischer Formationen (WILMANN 2007) hilfreich sein. Die Vegetationsverhältnisse können auch Hinweise zu Existenz oder Ausmaß von durch Altlasten belastete Flächen liefern.

Informationen und Angaben zur Flächennutzung sind zum einen aus Kartenmaterial, Flächennutzungsplänen, Gebietsbegehungen, Gesprächen mit Landwirten und aus vorhandenen Altgutachten zusammenzutragen. Auch die Auswertung von Luftbildern kann Verwendung finden. So können Änderungen in der Dichte und Art des Bewuchses oder der Bodenfeuchte durch lithologische Wechsel der Untergrundbeschaffenheit angezeigt werden. In Luftbildern lassen sich neben den aktuellen Nutzungsgrenzen auch Spuren vormaliger landwirtschaftlicher Nutzungen, der Verlauf alter Wege und überpflügter Täler sowie Geländeeinschnitte erkennen. Im Rahmen der Luftbildinterpretation kann die aktuelle Flächennutzung erfasst und auffällige Ver-

änderungen korrigiert werden. Folgende Kategorien können Anhaltspunkte geben, die durch lithologische Wechsel im Untergrund verursacht werden:

- dichter Bewuchs oder aufgelockerter Bewuchs, z. B. Wechsel in der Kronendichte
- dunklere Bodenfärbung: Hinweis auf Bodenfeuchte
- Unkrautwucherungen: Hinweis auf Änderung des Nährstoffangebotes und der Bodenverdichtung, unter Umständen in Verbindung mit lithologischen Ursachen

Aus Gesprächen mit den Flächennutzern (z. B. Landwirten) sind zudem Angaben zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, Düngung und zu möglicherweise bereits bestehenden Kooperationsverträgen oder Restriktionen in Erfahrung zu bringen. Des Weiteren können diese unter Umständen Angaben zu vorhandenen Dränagen und deren Wirksamkeit machen. Diese können den Wasserhaushalt und das Abflussverhalten im Quelleinzugsgebiet beeinflussen. Bei einer ungünstigen Ausrichtung unter landwirtschaftlichen Nutzflächen mit Abflussrichtung zur Quellfassungsanlage können Dränagen möglicherweise Dünge- und Pflanzenschutzmittel beschleunigt transportieren und somit ein Gefahrenpotenzial in Bezug auf die Trinkwasserqualität des Quellgebietes darstellen.

Weiterhin sind Informationen zu möglichen Gefährdungspotenzialen wie Altlasten, Abwasserentsorgung, Siedlung, Straßenbau zu recherchieren.

#### Literaturhinweis:

MANNFELD, K. & SYRBE, R.-U. (Hrsg.) (2008): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde. Band 257. – 288 S., 1 Kt., Leipzig (Deutsche Akademie für Landeskunde, Selbstverlag).

#### **4.2.6 Schutz- und weitere besondere Gebiete**

Vorhandene Schutzgebiete und weitere besondere Gebiete wie Rohstoff-, Hohlraum- und Tagebaugebiete müssen bei der Beschreibung des Untersuchungsgebietes ebenfalls beachtet werden, weil diese Einfluss auf das Abflussgeschehen oder die Beurteilung von Gefährdungspotenzialen haben. Zusätzlich können durch die bestehenden Rechtsverordnungen mögliche Nutzungskonflikte ausgeschlossen werden oder bezüglich des Grundwasserschutzes Vorteile entstehen. Zu beachtende Flächen des Natur- und Landschaftschutzes sind:

- Naturschutzgebiete (NSG) gem. § 23 Bundesnaturschutzgesetz
- Flächennaturdenkmale (FND)
- Nationalparks (NLP) gem. § 24 Bundesnaturschutzgesetz
- Biosphärenreservate (BR) gem. § 25 Bundesnaturschutzgesetz
- Landschaftschutzgebiete (LSG) gem. § 26 Bundesnaturschutzgesetz
- Naturparks (NP) gem. § 27 Bundesnaturschutzgesetz
- Flora-Fauna-Habitat-Schutzgebiete (FFH-Gebiete) inklusive Fledermausquartieren gem. FFH-Richtlinie 92/43/EWG
- Vogelschutzgebiete (SPA-Gebiete) gem. EG-Vogelschutzrichtlinie 79/409/EWG

Weiterhin sind Hohlraum- und Hohlraumverdachtsgebiete, Tagebauflächen, Steinbrüche, Bergschadensanalysen, bestehende Wasserschutzgebiete und oberflächennahe mineralische Rohstoffvorkommen zu berücksichtigen. Zu den genannten Themen liegen verschiedene digitale Karten des Sächsischen Umweltinformationssystems oder beim Sächsischen Oberbergamt vor (vgl. SMUL 2015).

#### 4.2.7 Pedologische Verhältnisse

Der Boden als oberste natürliche Überdeckung des unterirdischen Wassers übt neben seinen vielfältigen Funktionen im Ökosystem, die zu dessen Entwicklung entscheidend beitragen, eine natürliche Schutzfunktion für das unterirdische Wasser aus. Aufgrund seines Aufbaus (Bodentyp) und seiner Zusammensetzung (Bodenart) beeinflusst er nicht nur die Sickerwassermenge sondern auch die Sickerwasserqualität. Die Schutzfunktion wird neben Bodenart und Bodentyp auch durch dessen Mächtigkeit stark beeinflusst. So nimmt die Schutzfunktion des Bodens für das Grundwasser mit wachsender Mächtigkeit zu. Der Humus- und (Mikro-)Organismengehalt hat vor allem Einfluss auf die Qualität des Sickerwassers. Beispielsweise können Mikroorganismen organische Schadstoffe abbauen und der Humus- und Tongehalt wirkt sich positiv auf das Rückhaltevermögen des Wassers sowie von Schad- und Nährstoffen aus.

Generalisierte Hinweise zur Verbreitung des Bodens in einem Einzugsgebiet liefert das amtliche bodenkundliche Kartenwerk der Bodenkarte Sachsens (BK50) im Maßstab 1 : 50.000. Sie basiert auf Auswertungen vorhandener (Alt-) Datenbestände unter Einarbeitung aktueller Daten. Neben der flächenhaften Verteilung können auch Informationen zum vertikalen Schichtaufbau anhand von Bodenleitprofilen gewonnen werden.

Bei Bedarf, insbesondere bei Inhomogenität des Untersuchungsgebietes empfiehlt es sich gezielte Bodensondierungen für eine präzisere Bodenansprache vor Ort durchzuführen. Grundlage einer nachvollziehbaren Beschreibung nach dem Stand der Technik ist die jeweils aktuelle Bodenkundliche Kartieranleitung.

Neben den Informationen zum strukturellen Aufbau und der Verbreitung des Bodens müssen die geochemischen Eigenschaften betrachtet werden, da die Bodenzone und deren Eigenschaften maßgeblich die Wasserbeschaffenheit des Quellgebietes beeinflusst. Nützliche Hinweise und Karten liefern der Bodenatlas von Sachsen (BSA) im Maßstab 1 : 200.000 und der Nährstoffatlas von Sachsen. Wichtig hierbei vor allem Teil 3 des Bodenatlasses, weil dieser Karten zur Nitratauswaschungsgefährdung und zum Nitratrückhaltevermögen beinhaltet. Ebenso sollten die Wassererosionsklassen bestimmt werden.

#### Literaturhinweise:

Ad-hoc AG Boden (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl., 438 S., 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe mit den Staatlichen Geologischen Diensten).

LfUG [Landesamt für Umwelt und Geologie] (Hrsg.) (1997): Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 2: Standortkundliche Verhältnisse und Bodennutzung. – Materialien zum Bodenschutz, 73 S., Dresden.

LfUG [Landesamt für Umwelt und Geologie] (Hrsg.) (2007): Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 4: Auswertekarten zum Bodenschutz. – Materialien zum Bodenschutz, Erläuterungsheft und Karten, 62 S., Dresden.

LfULG [Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie] (Hrsg.) (2009): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. – 1. Auflage, 83 S., Dresden. → <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11725>

SCHEFFER, F., BLUME, H.-P., SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – Neubearb. und erw. 16. Aufl., 570 S., Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

#### 4.2.8 Geologische und hydrogeologische Verhältnisse

Nach der Bodenzone folgt der Übergang entweder in das Lockergestein oder bei Fehlen desselben direkt in die Verwitterungszone des anstehenden Festgesteines und das unterlagernde unverwitterte Festgestein selbst.

Die Erfassung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse ist elementar für den Aufbau des hydrogeologischen Modells und das Prozessverständnis des Abflussgeschehens im Sickerleitungsquellgebiet. Neben der Art und dem Aufbau des geologischen Untergrundes sind die tektonischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Die für die Quellschüttung relevanten hydrogeologischen Prozesse im Festgesteinsbereich sind von der Gebirgsdurchlässigkeit abhängig. Zur Charakterisierung des Quelltypes und der schutzbedürftigen Flächen im Einzugsgebiet empfiehlt sich eine prozessorientierte Beschreibung. Dafür wichtige Größen sind die Eigenschaften des Grundwasserleiters (u. a. Verbreitung, Mächtigkeit, Ausbildung), die bei Sickerleitungsquellen in der Regel schwer zu bestimmen und heterogen sind.

Die Charakterisierung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse basiert sowohl auf den verfügbaren kartografischen und gutachterlichen Unterlagen als auch den aufschlussbezogenen Auswertungen und Recherchen.

Das geologische Kartenwerk von Sachsen ist zunehmend digital in verschiedenen Blattschnitten und Maßstäben verfügbar. In Sachsen liegen flächendeckend die geologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 50.000 (GK50dig) und die kleinmaßstäbliche geologische Karte der geologischen Basiskartierung für Deutschland (GK25, Maßstab 1 : 25.000) als Arbeitsgrundlage vor. Anhand dieser Kartenwerke und unter Berücksichtigung weiterer geologischer Hinweise und Informationen aus der Gutachten- und Aufschlussrecherche (Abfrage der Aufschlussdatenbank des LfULG) kann der geologische Untergrund meist hinreichend genau beschrieben werden. Für die Anforderung und Eingrenzung von Aufschlussdaten kann die interaktive Karte des LfULG verwendet werden.

Für die Beschreibung der hydrogeologischen Eigenschaften des oberen Grundwasserleiters kann die hydrogeologische Übersichtskarte HÜK200 im Maßstab 1 : 200.000 herangezogen werden. Diese beinhaltet alle wesentlichen Informationen und ist digital mit verschiedenen Themen verfügbar, u. a. Durchlässigkeit, Gesteinsart, Hohlraum, Verfestigung, Schutzpotenzial der Grundwasserüberdeckung.

Seit dem Jahr 2000 wird in Sachsen zudem ein neues digitales hydrogeologisches Kartenwerk (Hydrogeologische Karte HK50) entwickelt, dessen Umsetzung fortlaufend blattschnittweise im Maßstab 1 : 50.000 erfolgt. Schwerpunkt der Bearbeitung sind die Kartenthemen „Hydrogeologische Grundlagenkarte“ und „Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung“. Die hydrogeologische Gebietseinschätzung der Übersichtskarte HÜK200 ist durch die kleinmaßstäbliche GK50 bzw. GK25 für die Ableitung der konkreten geologischen und tektonischen Verhältnisse im Einzugsgebiet einer Wasserfassung zu ergänzen. Dazu gehört die Beschreibung der Sickerleitungsquelle mit den örtlichen Besonderheiten aus hydrogeologischer Sicht, die Aufstellung des hydrogeologischen Strukturmodells (u. a. Erstellung des Hydrogeologischen Modells, Darstellung von Profilschnitten und dessen nachfolgende Parametrisierung wie hydrogeologische Parameter, Geschützhheitsbewertung).

Bezüglich der Grundwassergeschützhtheit nach HÖLTING et al. (1995) sind hierfür insbesondere die Lithologie der Grundwasserüberdeckung und die Grundwasserflurabstände wichtig. Die verfügbaren Informationen zur Grundwassergeschützhtheit der HÜK200 sind aufgrund des großen Bearbeitungsmaßstabes für die kleinräumigen Quellgebiete zu ungenau. Jedoch kann bei Sickerleitungsquellen aufgrund ihres geringen Flurabstan-

des a priori von einem schlechten bzw. quasi nicht vorhandenen Schutz durch die vorhandene Grundwasserüberdeckung ausgegangen werden. Der Härtegrad in den untersuchten Wasseranalysen und Isotopenuntersuchungen kann weitere Hinweise auf die Grundwassergeschütztheit geben (siehe auch Kap. 5).

In der geologischen Landesdatenbank sächsischer Aufschlüsse sind die vorhandenen Aufschlüsse erfasst. Im Internet kann in einer interaktiven Karte (<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/16833.htm>) recherchiert werden, ob Aufschlüsse im Untersuchungsgebiet digital zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe eines Formblattes (<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/7649.htm>) können außer den Grund-, Stamm- und Schichtdaten auch Informationen zu Grundwasserständen, Korngrößenanalysen und Probenergebnissen etc., soweit vorhanden, beim LfULG digital abgefordert werden. Standorte von Grundwassermessstellen, z. B. auch benachbarte natürliche oder gefasste Quellen sowie Grundwasserstände und Quellschüttungsdaten des staatlichen Grundwassermessnetzes können unter [www.grundwasser.sachsen.de](http://www.grundwasser.sachsen.de) in interaktiven Kartenanwendungen abgefragt und die Messwerte direkt exportiert werden. Für die Beschaffenheitsdaten steht eine downloadbare Datenbank mit einer nutzerfreundlichen Oberfläche zur Verfügung.

Im geologischen Archiv des LfULG in Freiberg stehen weitere – nur analog verfügbare – Gutachten, Untersuchungen, Analyseergebnisse usw. sachsenweit zur Verfügung. Ob sich Teile des Bestandes auf das Untersuchungsgebiet beziehen, ist durch eine entsprechende Recherche zu ermitteln.

Aus Altgutachten oder Literaturwerken können neben dem hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) weitere wichtige Informationen wie Eigenschaften des Grundwasserleiters (Porosität, Mächtigkeit, Klüftigkeit), dessen Überdeckung oder Berechnungen zum Schutzpotenzial der Grundwasserüberdeckung entnommen werden. Hierbei ist zu prüfen, inwieweit Werte, die der Literatur entnommen wurden, auf die Verhältnisse des zu untersuchenden Quellgebietes übertragen werden können.

Liegen im Quellgebiet unbekannte, besondere bzw. komplizierte Verhältnisse oder keine bzw. eine geringe geologische Aufschluss- und Informationsdichte vor, so sollte zur Präzisierung der pedologischen, geologischen und hydrogeologischen Bedingungen im Quelleinzugsgebiet die Niederbringung von **Rammkernsondierungsbohrungen** und Durchführung weiterer Untersuchungen in Betracht gezogen werden. Zusätzlich zu den hierdurch gewonnenen Informationen zur Verbreitung, Struktur und Schichtmächtigkeit des Untergrundes können bei Anschnitt der Grundwasseroberfläche Aussagen zum Grundwasserflurabstand und der Grundwasserdynamik getroffen werden.

Anhand von **Bodenschürfen** (falls genehmigungsfähig) lassen sich ebenfalls Aussagen zum Aufbau des Untergrundes treffen. Jedoch sind diese aufwendiger als einfache Rammkernsondierungen. Außerdem können Bodenschürfe ein erhebliches Gefährdungspotenzial für den Betrieb der Sickerleitungsquelle darstellen. Das ist bereits bei ihrer Planung (Lage, Teufe, eingesetzte Maschinen und Betriebsmittel etc.) zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Aufschlüsse können Bodenproben entnommen und laborativ ausgewertet werden. Beispielhaft sei hier die Sieb- und Schlämmanalyse der gestörten Proben genannt, mit deren Ergebnis der Kornverteilungskurve u. a. der Durchlässigkeitsbeiwert, die effektive Porosität und schließlich die Abstands- oder Sickergeschwindigkeit des Wassers im Untergrund abgeschätzt werden kann.

Zur rechnergestützten Auswertung von Kornsummenkurven steht das Programm UK32 des LfULG-Programmsystems UHYDRO kostenlos auf Anfrage zur Verfügung.

Zur Ermittlung von hydraulischen Kennwerten werden klassischerweise **Pumpversuche** angewandt. In Quellgebieten ist dies aufgrund der naturräumlichen und technischen Voraussetzungen nicht möglich.

**Geophysikalische Untersuchungen** und Verfahren werden bei der Ausweisung von Wasserschutzgebieten nur selten ergänzend zur Gebietserkundung herangezogen, weil sie im Verhältnis zum Aufwand bei konkreten Fragestellungen der Schutzgebietsausweisung nur eine begrenzte Aussagekraft haben.

Der methodische Vorteil liegt in den flächenhaften Beurteilungsmöglichkeiten der Untergrundverhältnisse, die weitgehend zerstörungsfrei gewonnen werden können, sofern bereits Grundwassermessstellen, temporäre Grundwassermessstellen oder andere Brunnen vorhanden sind. Der Aufwand für direkte Erkundungsmaßnahmen kann im Einzelfall durch geophysikalische Untersuchungen reduziert werden. Beispielhaft sei hier die Identifikation räumlicher Inhomogenitäten oder die Lageortung von Sickerleitungen genannt. Angewandt werden:

- Elektromagnetik
- Gleichstromelektrik
- Elektromagnetisches VLF-Verfahren (Very Low Frequency)
- Bodenradar

Literaturhinweis:

PÄLCHEN, W. & WALTER, H. (2011): Geologie von Sachsen I. Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. – 537 S., 161 Abb., 16 Tab., 2., korrig. Aufl. – Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)

#### 4.2.9 Konfliktanalyse der Gefahrenpotenziale

Innerhalb des Quelleinzugsgebietes vorhandene und entstehende Gefährdungen können entweder von einem konkreten Objekt ausgehen oder durch das geringe Schutzpotenzial der Grundwasserüberdeckung im Quellgebiet entstehen. Die Konfliktanalyse dient der Feststellung der Gefährdungspotenziale im Quellgebiet und ist das Hauptkriterium zur Beurteilung der Schutzfähigkeit. Im Rahmen der Konfliktanalyse empfiehlt sich die Anlegung eines Gefahrenkatasters zum Quellgebiet. In diesem muss der mögliche negative Einfluss und die Schwere der Auswirkungen auf das gefasste Grundwasser erfasst und gutachterlich bewertet werden. Wichtiges Kriterium zur Gefahreneinschätzung ist u. a. die Lage zur Fassungsanlage des Quellgebietes. Das Gefahrenkataster stellt eine Bestandsaufnahme der bestehenden und möglichen Nutzungskonflikte zwischen Wasserversorgung und anderen Nutzern dar.

Der mögliche Einfluss der Gefahrenquelle auf das gefasste Grundwasser muss fachlich begründet werden.

## 4.3 Informationsdefizite und Datenerhebung

Nach der Recherche und Aufbereitung der vorhandenen Unterlagen ist es nötig, diesen ersten Sachstand zu bewerten und gegebenenfalls weitere Untersuchungen anzusetzen, um die Ausweisung des Trinkwasserschutzgebietes auf einer fundierten Wissensgrundlage zu vollziehen. Dabei ist der Grundsatz zu beachten: Je komplexer die Zuflussbedingungen und je vielfältiger die Gefährdungspotenziale sind, desto höher ist auch der Anspruch auf fundiertes Wissen. Demnach sind neben der Darlegung der erfassten Daten Informationsdefizite durch den Gutachter zu benennen, deren Relevanz zu beurteilen und begründete Vorschläge für die weitere Datenerhebung zu unterbreiten.

Im Folgenden sind mögliche Defizite und deren Behebung genannt. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Einige Methoden zur Datenerhebung sind in den folgenden Kapiteln aufgeführt.

Informationsdefizit	Methodik
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ausbau und Dichtigkeit der Quellschächte gegen drückendes Wasser → z. B. Sanierung der Fugen oder Neubau</li> <li>– Funktionstüchtigkeit und Dichtigkeit der Schachabdeckung</li> <li>– Abschätzung der Lage der Sickerleitungen und Quellschächte anhand der Vegetation und Geländeausbildung</li> </ul>	Geländebegehung
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lokalisation der Sicker- oder Verbindungsleitungen</li> </ul>	Geophysikalische Untersuchungen, Peilstangen-sondierungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Zustand und Funktionstüchtigkeit der Sickerleitungen → z. B. HD-Spülreinigung bei Verstopfungen → ggf. Erneuerung/Instandsetzung</li> <li>– Abschätzung von Lage und Verlauf der Sickerleitungen (ggf. Abgleich mit alten Lageplänen/Bestandsplänen)</li> </ul>	Videokamerabefahrung
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lage und Verlauf der Sickerleitungen und Schrote unter Angabe des Genauigkeitsbereiches</li> <li>– Erfassung der geodätischen Koordinaten und Höhe</li> </ul>	GPS-Einmessung, geodätische Einmessung
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Erfassung der Beschaffenheit von Grund-, Quell- und Oberflächenwässern</li> <li>– Bestimmung Vorort-Parameter</li> <li>– Bestimmung Nitratgehalt (→ Nitratstäbchentests)</li> <li>– Bestimmung Umwelttracerkonzentrationen → siehe Kapitel 5.3 und Kapitel 5.5</li> </ul>	Wasseranalysen
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Durchflusserfassung des Vorfluters bzw. der Sickerleitungen, Schrote, Abläufe → Rückschlüsse u. a. zum Wasserhaushalt</li> </ul>	Abflussmessungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>→ siehe Kapitel 4.4.1 und Kapitel 5.1</li> </ul>	Schüttungsmessungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bestimmung der Durchlässigkeit (<math>k_f</math>-Wert) des Bodens/der ungesättigten Zone</li> <li>– Bestimmung der Sickerzeit bei bekannten Mächtigkeiten</li> </ul>	Infiltrationsmessungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bestimmung hydraulischer Kennwerte, u. a. <math>k_f</math>-Wert, Kornverteilung, Porenraumeigenschaften</li> </ul>	Bodenprobennahme (gestört oder ungestört)
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geologische/hydrogeologische Gebietseigenschaften</li> <li>– Bestimmung geohydraulischer Kennwerte</li> <li>– Wasserstandmessung für bspw. Hydroisohypsenplan (Stichtagsmessungen)</li> <li>– Nachweis der Infiltration/Exfiltration in Abhängigkeit vom Gefälle</li> </ul>	Rammkernsondierungen, Ausbau zu temporären Grundwassermessstellen

Es ist sinnvoll, Informationsdefizite, Vorschläge zu deren Behebung bzw. Alternativen mit dem Wasserversorger und den Behörden zu beraten.

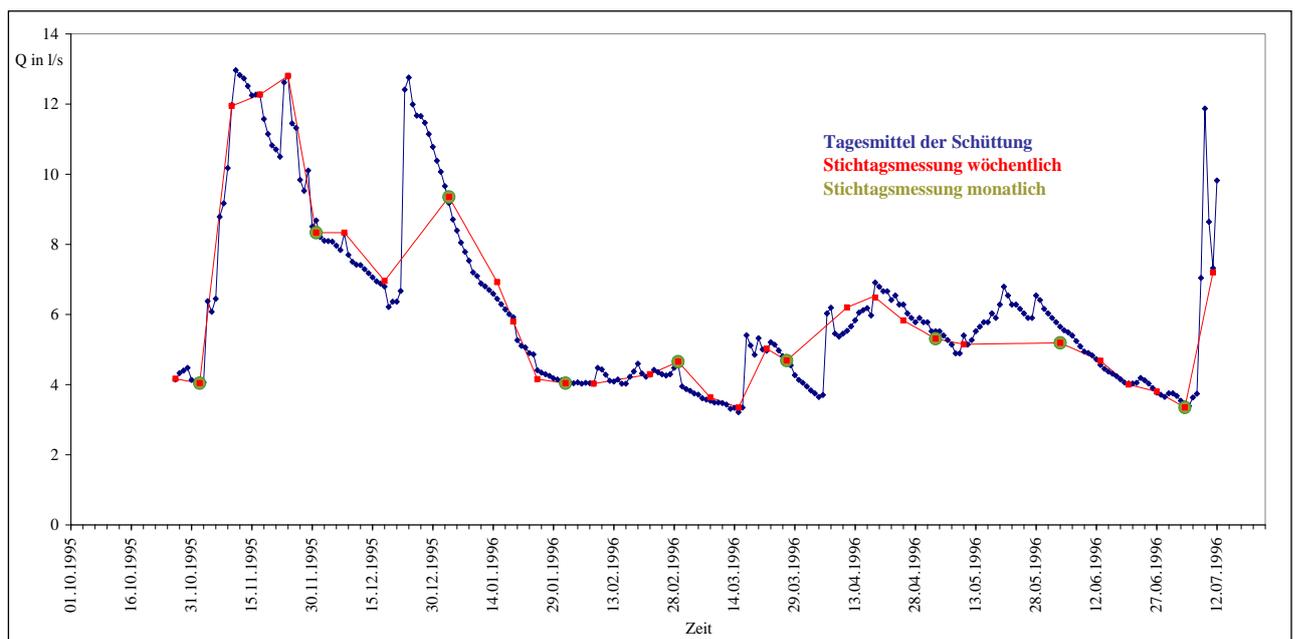
## 4.4 Messdaten und geohydraulische Kennwerte

Anhand der Ergebnisse liegen die Informationen zur Charakterisierung des Untersuchungsgebietes und zur Abschätzung der Wirkung von Gefährdungspotenzialen vor. Evtl. können zusätzliche Messungen zur Qualifizierung dieser Informationen erforderlich werden.

Zu den Standardmessungen in Quellgebieten gehören neben Quellschüttungsmessungen auch Wasseranalysen. Des Weiteren können ggf. Grundwasserstands- oder Quellschüttungsmessungen von naheliegenden staatlichen Messstellen verfügbar sein ([www.grundwasser.sachsen.de](http://www.grundwasser.sachsen.de), vgl. die entsprechenden Hinweise in Kapitel 4.2.8). In früheren Gutachten oder Aufzeichnungen der Erkundung können geohydraulische Eigenschaften der Grundwasserüberdeckung wie Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Sorptionseigenschaften oder das Speichervermögen des Bodens und der geologischen Schichten dokumentiert sein.

### 4.4.1 Schüttungsmessungen

Als Voraussetzung für die Ausweisung des Schutzgebietes sowie die wasserhaushaltliche und geologische Einordnung des Quellgebietes sind Quellschüttungsmessungen durchzuführen. Im besten Falle liegen diese bereits je nach Variabilität der Schüttungsmessung im wöchentlichen bis zweiwöchentlichen Rhythmus für mindestens ein zurückliegendes Jahr – idealerweise jedoch über einen Zeitraum von drei Jahren vor (SMUL 2015). Monatliche Messungen können zwar statistisch ausgewertet werden, jedoch ist das Ergebnis nur wenig aussagekräftig und nicht belastbar, weil nur ein extrem geglätteter Verlauf der Schüttung ohne wirkliche Hoch- und Niedrigwerte registriert wird (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5: Quellschüttung – Vergleich zeitlich unterschiedlich aufgelöster Schüttungsganglinien am Beispiel der Quelfassung Langer Grund im Erzgebirge (überarbeitet nach SCHWARZE & ROSS 1996)**

Anhand qualitativ hochwertiger und langfristiger Schüttungsmessungen lassen sich neben Aussagen zum Abflussgeschehen (unter Berücksichtigung der Niederschlagsereignisse) auch Rückschlüsse zur Verweilzeit, den Speichereigenschaften des Grundwasserleiters oder das Dargebot, das durch die Anlage erschlossen wird, treffen.

Die Messung sollte am Hauptsammelschacht oder an der Zuleitung zum Wasserwerk bzw. Sammelbehälter erfolgen. Sofern getrennte Sickerstränge vorhanden sind, sind diese für die Bestimmung separater Zuflüsse getrennt zu messen. Falls ein Überlauf vorhanden ist, muss dieser mit gemessen werden, um die Gesamtschüttungsmenge des Quellgebietes zu erfassen.

Eine Übersicht zu Messmethoden für die Quellschüttung gibt die Grundwasserrichtlinie, Teil 4 – Quellen (LAWA-ARBEITSKREIS „GRUNDWASSERMESSUNG“ 1995). Für Einzelmessungen bei geringen Abflüssen (bis ca. 5 l/s) ist die Gefäßmessung geeignet. Bei größeren Schüttungsmengen sind auch bei Mehrfachmessungen erhebliche Messfehler unvermeidbar. Kontinuierliche Messeinrichtungen über Registrierung von Wasserstand oder Fließgeschwindigkeit im Gerinne stehen vor Ort selten zur Verfügung, entsprechen aber dem Stand der Technik und sollten zum Einsatz kommen. Häufig wird nur der in das Versorgungsnetz eingespeiste Anteil des Quellwassers registriert (Entnahmemenge). Wird der Überlauf nicht erfasst, so werden vor allem Schüttungmaxima bei Extremregenereignissen nicht erkannt. Weil die Quellschüttung maßgeblich für den Bemessungszustand der Isochronen ist (vgl. Kapitel 5.1), ist die gesamte Quellschüttung (einschließlich Überlauf) zu ermitteln.

Erläuterungen zu den verschiedenen statistischen und grafischen Auswerteverfahren sind im Kapitel 5.1 aufgeführt.

#### 4.4.2 Wasserbeschaffenheit

Unter dem Begriff **Wasserbeschaffenheit** werden alle physikalischen, biologischen und chemischen Parameter zusammengefasst, die sowohl im Zuge der routinemäßigen Roh- und Reinwasseruntersuchungen nach Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) als auch durch zusätzlich angeordnete Untersuchungen (u. a. auch Isotopenbestimmung) erfasst werden.

Die Rohwasseranalysen und somit die Eigenüberwachung der Wasserfassungen sind durch die Wasserversorgungsunternehmen zu gewährleisten. Mindestanforderungen zu Umfang und Häufigkeit der Probenahme bzw. Untersuchung sind in der Anlage 4 der Trinkwasserverordnung (TRINKWV 2001) gelistet. Die Probenahmehäufigkeit richtet sich dabei nach der abgegebenen oder produzierten Wassermenge pro Tag in einem Versorgungsgebiet.

In der Regel liegt die Häufigkeit der durchgeführten Analysen zwischen monatlichen und jährlichen Messungen je nach Untersuchungsgebiet. Bei problematischen Wasserfassungen mit beispielsweise hohen Nitratgehalten oder einer Anfälligkeit für mikrobielle Belastungen sollten mindestens monatliche Analysen vorliegen. Der Untersuchungsumfang der Rohwasseranalysen muss den möglichen Gefährdungspotenzialen entsprechen.

Im Vorfeld zur Erstellung des Fachgutachtens müssen die beim Wasserversorger vorliegenden Untersuchungsergebnisse hinsichtlich ihrer Eignung geprüft werden, um die ggf. erforderlichen weiteren Untersuchungen des Rohwassers festzulegen.

Wenn Befunde vorliegen, die auf mögliche Überschreitungen der Grenzwerte der TrinkwV hindeuten, sollten für effektive Auswertungen (mindestens) vier aktuelle Vollanalysen des Rohwassers saisonal über ein Jahr verteilt sowie weitere Roh- und Reinwasseranalysen der letzten drei Jahre vorliegen. Vorteilhaft sind auch entsprechende Untersuchungen in extremen Witterungssituationen. Durch die jahreszeitliche Verteilung der Vollanalysen und deren Auswertung sollten saisonale Varianzen und Einflüsse sowie mögliche Gefährdungspotenziale in Extremsituationen erkennbar sein.

Voraussetzung für die Interpretation der Ergebnisse ist zum einen die Wasserprobennahme nach allgemein anerkannten Regeln der Technik und zum anderen die Analyse durch ein akkreditiertes und notifiziertes Labor. Die Wasserprobe sollte an allen genutzten Einzelanlagen vor der Vermischung entnommen werden. Für Quellgebiete bedeutet dies, dass, sofern geografisch getrennte Sickerstränge vorhanden sind, die zudem unterschiedlich bewirtschaftet werden, für jeden dieser Sickerstränge eine Probe entnommen werden muss. Diese Untersuchungen können unter anderem auch für die Bestimmung von Abflussanteilen genutzt werden und für die Lokalisierung möglicher Gefährdungspotenziale. Liegt nur ein Hauptsickerstrang vor, kann die Probennahme am Hauptsammelschacht erfolgen.

Zum Untersuchungsspektrum des Quellrohwassers sollten im Wesentlichen die folgenden Parameter gehören:

- Organoleptische Parameter (Vor-Ort-Messung): Färbung, Trübung, Geruch, ggf. Geschmack
- Physikalische Parameter (Vorortmessung): Wassertemperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Redoxpotenzial
- Chemische Parameter (Labormessungen):
  - Hauptelemente: Hydrogencarbonat, Säure-/Basenkapazität, ortho-Phosphat-, Silikat-, Fluorid-, Sulfat-, Chlorid-, Nitrat-, Nitrit-, Ammonium-, Calcium-, Magnesium-, Natrium-, Kalium-, Eisen-, Mangan-Gehalt, DOC
  - Spurenelemente: Chrom, Nickel, Blei, Cadmium, Arsen, Quecksilber, Uran, Zyanid
  - Summenparameter: LHKW (Tetrachlorethen, Trichlorethen etc.), PAK (Benzo(a)pyren, Di-Benz(a,h)anthracen), BTX (Benzol, Toluol, Xylol), MKW (Mineralölkohlenwasserstoffe) – Einsatz nur bei einem entsprechenden Verdacht einer Belastung durch Altlasten (Altablagerungen, Altstandorte, Altdeponien usw.)
  - PSBM: Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte (Wirkstoffe und Metabolite)
- Biologische Parameter (Keime): coliforme Bakterien, Escheria Coli, Koloniezahl bei 22 °C/36 °C, intestinale Enterokokken

Die Erweiterung des Parameterumfanges kann auf Grund von Gefährdungshinweisen erforderlich werden. Hinweise zur Auswertung und Interpretation der Beschaffenheitsdaten von Quellgebieten werden im Kapitel 5.3 gegeben.

#### Literaturhinweise:

- LAWA [Bund/Länderarbeitsgemeinschaft] (Hrsg.) (1993): Grundwasser. Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 3: Grundwasserbeschaffenheit. – Essen (Woeste).
- DVWK [Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.] (Hrsg.) (1990): Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten. – Schriftenreihe des DVWK, Heft 89, Hamburg (P. Parey).
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.) (Hrsg.) (1992): Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben (Grundwasseruntersuchung, Probenahme). – DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Band 128, Hamburg (P. Parey).

#### 4.4.3 Tracer- und Isotopenmessungen

Tracer- und/oder Isotopenuntersuchungen sind in der Hydrogeologie seit vielen Jahren ein wichtiges Mittel zur Herkunftsbestimmung, zur Typisierung von Grundwässern bzw. Grundwasserleitern und zum Nachweis von hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern. Streng genommen handelt es sich bei den Isotopen um natürlich vorkommende Tracer, weil stabile und radioaktive Isotope gelöste Wasserinhaltsstoffe sind. Zu den natürlichen Tracern zählen außer den gelöst vorkommenden Anionen und Kationen, Spurenstoffe bzw. Bio-Tracer (Mikroorganismen). Substanzen, die dagegen gezielt in das Grundwasser eingegeben werden müssen, um unterirdische Fließwege zu erkunden, werden als künstliche Tracer bezeichnet.

Tracer- bzw. Markierungsversuche sind somit aussagekräftige Methoden, um quantitative Informationen über Verweilzeiten, Fließgeschwindigkeiten, Dispersion und andere Grundwassertransportparameter zu gewinnen. Sie eignen sich zur Abgrenzung von Quelleinzugsgebieten, weil sich die Eingabestelle bei einem positiven Nachweis im Einzugsgebiet der Quelfassung befinden muss. Aus den ermittelten Verweilzeiten kann die 50-Tage-Linie ermittelt werden.

Allerdings sind Tracerversuche zeit- und kostenaufwendig. Des Weiteren stellt der Einsatz von künstlichen Tracern einen Eingriff in den Grundwasserleiter dar und ist somit wasserrechtlich genehmigungspflichtig. Gerade in Wasserschutzgebieten sollten sie nur dann eingesetzt werden, wenn es darum geht, Fragestellungen, die durch andere Methoden nicht geklärt werden können, beweiskräftig und quantitativ zu beantworten (TRESKATIS & TAUCHMANN 2013), wie

- in rechtlich strittigen Fällen, wenn eine beweiskräftige Aussage getroffen werden muss, ob sich bestimmte Punkte im Einzugsgebiet einer Quelfassung befinden oder nicht. Dabei hat nur ein positives Tracerergebnis Beweiskraft.
- bei komplexen hydrogeologischen Verhältnissen wie Zuflüssen aus aufgelassenen Bergwerken, Kluft- und Karstgrundwasserleitern.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der Praxis eingesetzten wichtigsten Substanzen von künstlichen Markierungsstoffen (Tracern). Der ideale künstliche Tracer sollte im Grundwasser nicht natürlich vorkommen, ein möglichst niedrige Nachweisgrenze besitzen, im Grundwasserleiter nicht abgebaut oder zurückgehalten werden (konservatives Verhalten) und human- sowie ökotoxikologisch unbedenklich sein (BEHRENS et al. 2001; KÄSS 2004).

**Tabelle 2: Überblick zu den in der Praxis am häufigsten eingesetzten künstlichen Tracern. Substanzen, die von BEHRENS et al. (2001) als human- und ökotoxikologisch unbedenklich eingestuft wurden (modifiziert nach TRESKATIS & TAUCHMANN 2013)**

Tracer-Gruppe	Name	Abkürzung	Chemisches Symbol / Summenformel	Bestimmungsgrenze [ $\mu\text{g/l}$ ]	allgemeine Probleme:	spezifische Probleme	Sorptionsverhalten
Fluoreszenztracer	Uranin	UR	$\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$	$10^{-3}$	empfindlich gegenüber Licht- und Oxidationsmittel, analytische Interferenz zwischen verschiedenen Tracern mit ähnlichen optischen Eigenschaften	Adsorption im sauren Milieu	gut
	Eosin	EO	$\text{C}_{20}\text{H}_6\text{Br}_4\text{O}_5\text{N}_2$	$10^{-2}$		-	gut
	Na-Naphthionat	NA	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_3\text{N}_2\text{SNa}$	$10^{-1}$		analytische (optische) Interferenz mit DOC	gut
Partikel	Fluoreszierende Mikrokügelchen			Nachweis einzelner Partikel ist möglich	aufwendige Analytik und kein konservatives Transportverhalten	-	

Tabelle 3 gibt eine kurze Zusammenfassung zu natürlichen Tracern (Umweltisotope), zu deren Verteilung in der Umwelt und ihrer Herkunft.

**Tabelle 3: Übersicht zur Verteilung, zu den Eigenschaften und zur Herkunft der Umweltisotope**

Element	Isotope	Vorkommen	Eigenschaft	Herkunft und Bemerkungen
Helium	$^3\text{He}$	0,000137 %	stabil	$^3\text{He}$ entsteht durch den Beta-Zerfall von Tritium ( $^3\text{H}$ ).
	$^4\text{He}$	99,999863 %	stabil	
Wasserstoff	$^1\text{H}$ oder D	99,9844 % keine Angabe	stabil	$^3\text{H}$ entsteht natürlich durch Einwirkung kosmischer Strahlung in der Stratosphäre und künstlich als Nebenprodukt der Kernspaltung (z.B. während der Kernwaffentests 1953-1963). $^1\text{H}$ und $^2\text{H}$ sind Bestandteil der Atmosphäre.
	$^3\text{H}$ oder T	möglich, zerfällt	instabil, Halbwertszeit: 12,35 Jahre	
Sauerstoff	$^{16}\text{O}$	99,76 %	stabil	Sauerstoff mit seinen Isotopen ist Bestandteil der Atmosphäre.
	$^{17}\text{O}$	0,04 %	stabil	
	$^{18}\text{O}$	0,20 %	stabil	
Stickstoff	$^{14}\text{N}$	99,634 %	stabil	Stickstoff mit seinen Isotopen ist Bestandteil der Atmosphäre.
	$^{15}\text{N}$	0,366 %	stabil	
Krypton (Auswahl)	$^{85}\text{Kr}$	keine Angabe möglich, zerfällt	instabil, Halbwertszeit: 10,76 Jahre	$^{85}\text{Kr}$ entsteht bei der Kernspaltung von Uran und Plutonium. Durch Kernexplosionen oder während der Wiederaufarbeitung von Brennelementen gelangt es in die Umgebungsluft.

Weil bei den typisch sächsischen Sickerleitungsquellen überwiegend mit jungen, relativ schnell fließenden Wässern zu rechnen ist, eignen sich vorwiegend Deuterium und Sauerstoff-18 zur Altersdatierung. Eingeschränkt kann auch noch Tritium angewendet werden. Besteht eine Anbindung an ein Grundwasserleitersystem, das älteres Wasser führt, kann der Anteil an der Gesamtschüttung ermittelt werden, der eine geringe Grundwassergeschütztheit aufweist.

Die Anwendung der Edelgase Krypton und Helium zur Grundwasseraltersbestimmung in Quellgebieten bereitet insofern Schwierigkeiten, weil die Probennahme unter Luftabschluss erfolgen muss. Befinden sich Grundwassermessstellen in Fassungsnahe, so kann bei günstigen geologischen Gegebenheiten eine Helium-3-Beprobung zur Ergänzung herangezogen werden.

Des Weiteren können für spezielle Fragestellungen bzgl. der Nitratbeeinflussung des Grundwasserkörpers die stabilen Isotope des Stickstoffs und Sauerstoffs in die Untersuchungen einbezogen werden. Die anderen in Tabelle 3 aufgelisteten Umweltisotope können in Ausnahmefällen für spezielle Fragestellungen gemessen werden.

#### Literaturhinweise:

- BEHRENS, H.; BEIMS, U.; DIETER, H.; DIETZE, G.; EIKMANN, T.; GRUMMT, T.; HANISCH, H.; HENSELING, H.; KÄSS, W.; TILKES, F. (2001): Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. – in: Hydrogeology Journal 9: 321 – 325.
- CLARK, I. D., FRITZ, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology. – 352 S., CRC Press/Lewis Publishers.
- COOK, P. G., HERCZEG, A. L. (2000): Environmental tracers in subsurface hydrology. – 529 S., Kluwer Academic Publishers.
- ETCHEVERRY, D., VENNEMANN, T. (2009): Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Umwelt-Wissen Nr. 0930. – 121 S., Bern (Bundesamt für Umwelt).
- KÄSS, W. (1998): Tracing Technique in Geohydrology. – 581 S., Rotterdam (Balkema).
- KÄSS, W. (2004): Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 9. – 2. überarb. Aufl., 557 S., 239 Abb., 43 Tab., 8 Farbtafeln. – Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- KENDALL, C., MCDONNELL, J. J. (1998): Isotope Tracers in Catchment Hydrology. – 839 S., Elsevier.
- LEIBUNDGUT, C.; MALOSZEWSKI, P.; KÜLLS, C. (2009): Tracers in Hydrology, Wiley
- MOOK, W. G. (2005): Introduction to Isotope Hydrogeology. Stable and Radioactive Isotopes of hydrogen, Oxygen and Carbon. – 256 S., Taylor & Francis.

#### **4.4.4 Grundwasserstand**

Sofern im Einzugsgebiet ein aushaltender Grundwasserleiter vorhanden ist, kann die Messung des Grundwasserstandes bzw. des Grundwasserflurabstandes bei hinreichend guter räumlicher Repräsentativität der Messstellen im Zustrom zur Wasserfassung der Erfassung des hydraulischen Regimes bzw. zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung(en) im Einzugsgebiet an einem oder mehreren erfassten Stichtagen dienen.

Bei Vorhandensein von langen Messreihen, bspw. anhand der Daten von Messstellen des Landesmessnetzes, kann ein Rückschluss auf das Abflussverhalten gezogen werden. Ist die Grundwasserstandsmessreihe eindeutig der Grundwasserkomponente im Einzugsgebiet zuordenbar, kann der Grundwasserstandsrückgang während einer Trockenperiode einen Hinweis auf die (durchflusswirksame) nutzbare Porosität des Grundwasserleiters (inklusive Speicherkoeffizient) und die Abflussanteile geben. Im Vergleich mit Normalperioden kann die Grundwasserneubildungsrate ermittelt werden. Zudem kann durch Auswertung des langfristigen Trends die Entwicklung des Grundwasserangebotes beurteilt werden. Sofern aus der Bewertung des vorhandenen Datenmaterials ein weiterer Informationsbedarf als erforderlich angesehen wird, können Rammkernsondierungen, die gleichzeitig der Qualifizierung des hydrogeologischen Modells dienen, als temporäre Grundwassermessstellen ausgebaut werden.

# 5 Methoden zur Datenauswertung

## 5.1 Schüttungsstatistik und Ganglinienanalyse

### 5.1.1 Allgemeine Hinweise

Für die Auswertung von Schüttungsmessungen stehen eine Reihe von schnellen und einfachen Verfahren zu Verfügung, mit deren Hilfe es möglich ist, Abflusskomponenten zu quantifizieren, den Porenraum besser zu beschreiben und das Verhalten des Quelleinzugsgebietes zu charakterisieren.

Wie im Kapitel 4.4 bereits erläutert, ist von der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Schüttungsmessungen/Abflussmessungen sowie vor allem der Länge der zur Verfügung stehenden Zeitreihe abhängig für welche Art von Auswertungen und Interpretationen die Messergebnisse verwendet werden können. So ermöglichen insbesondere lange Zeitreihen mit einer hohen zeitlichen Auflösung das verfügbare Dargebot zu bestimmen und das Verhalten in Extremsituationen einzuschätzen. Eine hohe räumliche Auflösung (Messungen liegen nicht nur für den Sammelschacht, sondern auch für die einzelnen Schächte bzw. Sickerstränge vor) ermöglicht es die Zuflusskomponenten zu bestimmen und über das Reaktionsvermögen auf Niederschlagsereignisse Rückschlüsse auf deren Herkunft (Zwischenabfluss, oberflächennaher Grundwasserzufluss, Kluftwasserzufluss, ...) zu ziehen.

Wenn keine Schüttungsmessungen vorliegen und erst zu Beginn der Erarbeitung des Fachgutachtens durchgeführt werden müssen, steht neben den zusätzlich erforderlichen Kosten für Messgeräte und Personal keine längere Zeitreihe zur Verfügung und die Berechnungsergebnisse können nicht sicher interpretiert werden.

Der Kostenaufwand für die Messungen verringert sich, wenn die Quellschächte und Überläufe gut zugänglich sind und im besten Fall ein automatischer Zähler (Wasseruhr) eingebaut werden kann. Die Auswertung erfolgt in Abhängigkeit von der Fragestellung und kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Man unterscheidet zwischen der statistische Analyse der gemessenen Schüttungswerte und verschiedenen Verfahren der Ganglinienanalyse, bei denen der zeitliche Verlauf der Quellschüttung beachtet wird. Die Verfahren werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 5.1.2 Schüttungsstatistik

Mit der Schüttungsstatistik können erste Aussagen zum Schwankungsverhalten der Schüttung gemacht werden. Des Weiteren kann eine grobe Überprüfung des verfügbaren Dargebots erfolgen. Alle Interpretationen beziehen sich nur auf den Bereich für den die Messung durchgeführt wird. Das bedeutet, dass man mit der Ganglinie für einen Sickerstrang auch nur das vom Strang erfasste Dargebot bewertet. Liegen nur Werte für die Entnahme vor (d. h. der Überlauf wird nicht gemessen), mindert sich die Aussagemöglichkeit zum Dargebot. Ausgewertet werden Schüttungsganglinien der Einzelwerte. Als erstes werden wesentliche Abflusshauptwerte bestimmt:

- Schüttungsmittel  $MQ$
- kleinste Schüttung  $NNQ$
- größte Schüttung  $HHQ$
- (langjährige) mittlere kleinste Schüttung  $MNQ$

Zur Interpretation der Ergebnisgüte muss die Datengrundlage angegeben werden. Bei nur einjähriger wöchentlicher Messung ist die statistische Datengrundlage für weiterführende Interpretationen eher gering. Das Schüttungsmittel zeigt die (langjährige) durchschnittliche Ergiebigkeit an.

Für die Berechnung der Grundwasserneubildung aus dem Dargebot der Quellschüttung sind die Zeiträume geringen Niederschlages relevant. Die niedrigste Schüttung während bzw. am Ende einer Trockenzeit repräsentiert den ungünstigsten Fall und gibt die mindestens zur Verfügung stehende Wassermenge, die aus dem Quellgebiet gewonnen werden kann, an. Sie ist somit ein Maß für den Basisabfluss.

Das Schüttungsmaximum repräsentiert den schnellen Abfluss sowie einen Anteil des Zwischen- und Basisabflusses. Die mittlere Quellschüttungsmenge, gemessen über einen längeren bzw. mehrjährigen Zeitraum, umfasst den Zwischenabfluss und den Basisabfluss. Die langjährige mittlere Schüttungsmenge und die Größe des zugehörigen Einzugsgebietes können der Plausibilisierung der aus KliWES ermittelten Abflusskomponenten dienen.

Ein einfaches Maß für eine hydrometrische Einstufung ist der **Quellschüttungsquotient  $QSq$** . Er ist ein statistisches Maß für den Schwankungsbereich der Schüttung und gibt somit einen Hinweis auf die im Mittel zu erwartende Dauerergiebigkeit sowie auf die Größe und Wirksamkeit des zur Wasserfassungsanlage entwässernden Speichers. Voraussetzung ist hier, dass die bewerteten Messwerte den Gesamtzufluss repräsentieren (Summe der Messungen aus den Einzelschächten oder Messung aus dem Sammelschacht). Kleinere Quotienten weisen infolge der starken Schüttungsunterschiede stark vom Niederschlag abhängige Zuflüsse auf, während sich bei Quellen, die vorwiegend aus Kluftgrundwasserleitern gespeist werden, mit ausgeglichener Schüttungsverhalten relativ hohe Quotienten ergeben.

Der Quellschüttungsquotient lässt sich aus den statistisch ermittelten Hauptwerten berechnen:

$$QSq = \frac{NNQ}{HHQ}$$

$QSq$  [ - ] ... Quellschüttungsquotient

$NNQ$  [m<sup>3</sup>/d] ... niedrigster Quellschüttungswert

$HHQ$  [m<sup>3</sup>/d] ... höchster Quellschüttungswert

Werden zu kurze Messreihen ausgewertet, wird das Ergebnis möglicherweise verfälscht und kann nur unter der Voraussetzung erfolgen, dass die Messung in einem hydrologisch mittleren Jahr durchgeführt wurde (Vergleich des aktuellen Jahres mit mittleren langjährigen Kennwerten naheliegenden Pegeln oder Grundwassermessstellen).

Anhand des berechneten Schüttungsquotienten sind erste Aussagen zur Grundwassergeschüttheit möglich. Nach HÖLTING (2009) signalisieren Schüttungsverhältnisse von **unter 1 : 10** ungünstige und Werte zwischen **1 : 1 bis 1 : 10** gute Geschüttheitsbedingungen für das Grundwasser.

Generell kann aus dem berechneten Schüttungsquotienten und der durchgeführten statistischen Analyse folgendes abgeleitet werden:

- Je kleiner der Schüttungsquotient, desto schlechter ist der natürliche Schutz der grundwasserüberdeckenden Schichten.
- Niedrige Schüttungsquotienten (d. h. große Unterschiede zwischen Vorereignis- und Maximalschüttung) deuten auf ein Einzugsgebiet mit vorwiegend punktueller, direkt in das System infiltrierender Neubildung.
- Ein kleiner Schüttungsquotient kann durch größere Anteile Direktabfluss z. B. bei Hochwasser verursacht werden.
- Je durchlässiger die Deckschichten, desto größer sind die Schüttungsschwankungen.
- Das Ausmaß der Schüttungsänderung ist neben den Gebietseigenschaften auch von den Merkmalen des jeweiligen Niederschlagsereignisses wie Niederschlagsdauer und -intensität, Bodenvorfeuchte abhängig.

### Ganglinienanalyse

Wesentliches hydrogeologisches Merkmal von Quellen ist die Größe ihrer Schüttung, d. h. das sich pro Zeiteinheit ansammelnde Grund- bzw. Sickerwasser. Ähnlich dem Abfluss oberirdischer Gewässer schwanken auch die Schüttungsmengen saisonal und lokal bei Betrachtung verschiedener Quellstränge bzw. Sickerleitungsabschnitte. Diese Schwankungen hängen im Wesentlichen von den Niederschlägen und Infiltrationsverhältnissen im Einzugsgebiet und dessen Größe ab.

Durch die Betrachtung einzelner Abflusskomponenten wird eine Bestimmung der Herkunftsräume des Wassers möglich. Die Ganglinienseparation kann anhand verschiedener hydrologischer Verfahren grafisch oder rechnerisch erfolgen:

- Bestimmung des grundwasserbürtigen Abflusses anhand der Trockenwetterfalllinie, z. B. nach MAILLET (1905)
- statistische Berechnung über geeignete Abflusshauptwerte, z. B. nach WUNDT (1958)
- kontinuierliche Bestimmung von Abflusskomponenten, z. B. über das Programm DIFGA

Liegen ausreichend zeitlich nah beieinander liegende Schüttungsmessungen vor, so können erste Aussagen anhand der gemeinsamen Darstellung von Schüttungsganglinien mit Niederschlagsganglinien oder Ganglinien von Gewässerpegeln bzw. Grundwassermessstellen erfolgen. Aus der Gegenüberstellung von Niederschlag und Abflüssen kann auf die Speicher- und Leitereigenschaften der Herkunftsräume geschlossen werden (LAWA „Grundwassermessung“ 1995), wobei die eindeutige Trennung der Abflusskomponenten (bspw. Direkt- und Basisabfluss) nur schwer möglich ist, weil die Teilprozesse zeitlich überlagert ablaufen.

Auch hier ist zu beachten, dass die Häufigkeit der Messung die Aussagefähigkeit beeinflusst. Die Auswertung von monatlich gemessenen Ganglinien kann im Ergebnis nur die etwaige Größenordnung bzw. die tendenzielle Richtung angeben, weil die meisten Quellgebiete einen sehr variablen Schüttungsverlauf mit schnellen Reaktionen auf Niederschlagsereignisse zeigen.

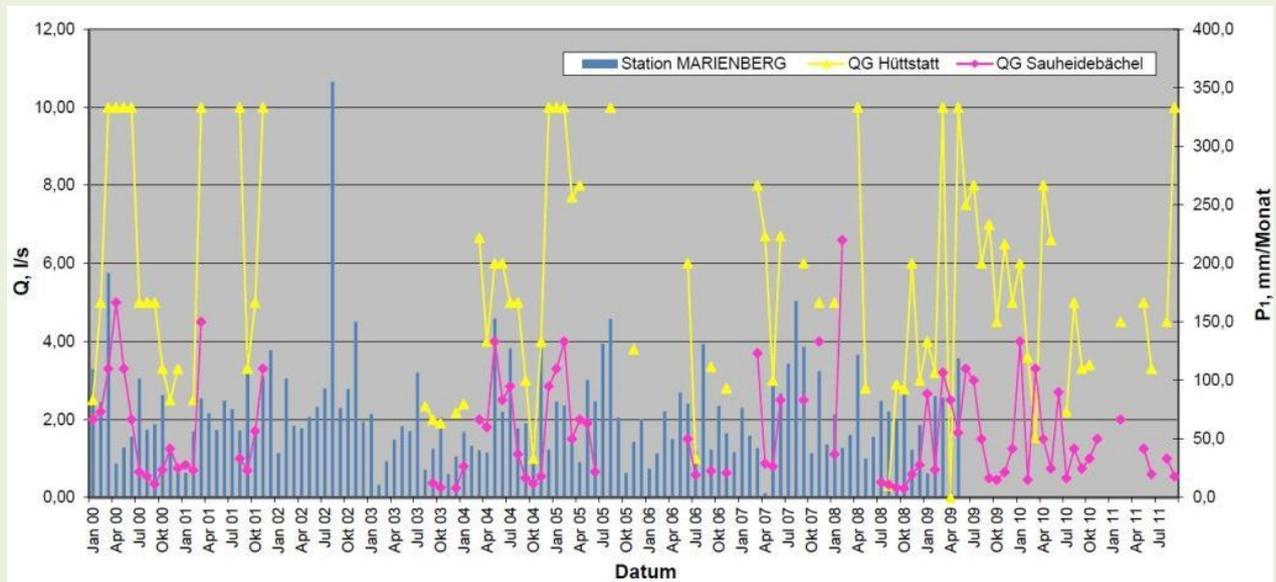
Bei gesonderter Erfassung der einzeln abzweigenden Sickerstränge oder Sickerleitungen kann eine Analyse der Speicherräume für Teileinzugsgebiete erfolgen.

In der Regel wird die Schüttung relativ schnell auf Niederschlagsereignisse reagieren. Das bedeutet, dass nach einem Starkregenereignis mit einer geringen Verweilzeit zu rechnen ist. Sind die Reaktionen in der Quellschüttung eines Gebietes eher verhalten, so kann dies auf eine gute Speicherkapazität des Grundwasserleiters deuten. Eine verminderte Reaktion (kaum merkbarer Schüttungsrückgang) während nieder-

schlagsarmer Perioden kann ein Hinweis auf in Sickerleitungen infiltrierendes Oberflächenwasser (Bachwasser) oder die bestehende Interaktion mit einem (ergiebigen) Kluftsystem sein. Letzteres weist auf eine ältere Grundwasserkomponente hin.

### Praxisbeispiel QG Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn, Achternweg (G.E.O.S. 2013)

Gegenüberstellung der Ganglinien der Quellschüttungen des QG Hüttstatt und des QG Sauheidebächel sowie der Niederschlagsganglinie der Station Marienberg



Die Grafik zeigt, dass zeitnah bzw. mit nur sehr geringer Zeitverzögerung die Quellschüttung nach einem Niederschlagsereignis zunimmt und bei dessen Ausbleiben ebenso schnell wieder abnimmt. Diese nachweisbare Abhängigkeit ist typisch für die vorliegenden Sickerleitungsquellen.

### 5.1.3 Auswertung mittels Trockenwetterfalllinie nach MAILLET (1905)

Die Trockenwetterfalllinie oder auch der Trockenwetterabfluss wird definiert als der Abfluss, der nach einer längeren Zeitspanne ohne abflusswirksame Niederschläge entsteht. Es kann berechtigt angenommen werden, dass dieser nur aus grundwasserbürtigem Abfluss gebildet wird.

MAILLET (1905) formulierte folgende Gleichung, die den exponentiellen Verlauf der meisten Trockenwetterfalllinien beschreibt:

$$Q_t = Q_0 * e^{-\alpha * \Delta t} \text{ [ m}^3/\text{d ] mit } \alpha = \frac{1}{K} \text{ [ d}^{-1} \text{ ]}$$

$Q_t$  ... (langjähriger) Basisabfluss zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$  in [ m<sup>3</sup>/d ]

$Q_0$  ... maximaler Basisabfluss (Abfluss/Schüttung zum Ausgangszeitpunkt) nach der Grundwasserneubildung zum Zeitpunkt  $t = 0 = t_0$  in [ m<sup>3</sup>/d ]

$\alpha$  ... Leerlauf-, Auslauf- bzw. Rezessionskoeffizient; entspricht dem Anstieg der Regressionsgeraden [ 1/d ]

$K$  ... Rückgangskonstante, Kehrwert von  $\alpha$  [ d ]

$\Delta t$  ... Anzahl verstrichener Tage ( $\Delta t = t - t_0$ ) [ d ]

Allgemein gilt, dass ein steilerer Verlauf der Trockenwetterfalllinie eine schnelle Entleerung und demzufolge auf ein geringes Rückhalte- oder Retentionsvermögen der Grundwasserleiters bzw. eine schnelle Abflusskomponente hinweist. Im Gegensatz dazu zeugt ein flacherer Verlauf der Trockenwetterfalllinie von einer größeren Speicherkapazität und einem höheren Retentionsvermögen des Grundwasserleiters.

Je länger die Messreihe, desto höher wird die Aussagekraft der ermittelten Parameter.

Wird die vorgenannte Gleichung nach MAILLET nach der Rückgangskonstante umgestellt, so gilt:

$$K = \frac{-(t-t_0)}{(\ln(Q_t) - \ln(Q_0))} \text{ [ d ]}$$

$K$  ... Rückgangskonstante [ d ]

$t - t_0$  ... Anzahl verstrichener Tage seit Beginn der Messung [ d ]

$Q_t$  ... Basisabfluss zum Zeitpunkt  $t$  in [ m<sup>3</sup>/d ]

$Q_0$  ... maximaler Basisabfluss nach der Grundwasserneubildung zum Zeitpunkt  $t_0$  in [ m<sup>3</sup>/d ]

Die Rückgangskonstante  $K$  ist die gebräuchlichste hydrologische Größe. Sie gibt die Verweilzeit des Grundwassers bzw. der Abflusskomponente im Untergrund an. Die Rückgangskonstante steht auch in unmittelbarem Zusammenhang zur Halbwertszeit. Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der sich ein exponentiell mit der Zeit abnehmender Wert halbiert hat. Im betrachteten Speichermodell wäre das die Halbierung der Ausgangsspeicherfüllung oder des anfänglichen Abflusses aus dem Speicher. Es gilt:

$$T_{1/2} = \ln 2 * K = \frac{\ln 2}{\alpha}$$

$T_{1/2}$  ... Halbwertszeit [ d ]

$K$  ... Rückgangskonstante [ d ]

$\alpha$  ... quellenspezifische Auslaufkonstante [ 1/d ]

Bei logarithmischer Transformation der Gleichung nach MAILLET verläuft der Schüttungsrückgang in Form einer Geraden. Die Darstellung kann somit auch in halblogarithmischer Form erfolgen.

Aus dem Anstieg der Geradengleichung kann der Rezessionskoeffizient bzw. die Rückgangskonstante bestimmt werden (DYCK & PESCHKE 1995). Oft unterscheiden sich die Rückgangskonstanten für Winter- und Sommerhalbjahre (OTNES & RAESTAD 1978).

Neben der Rückgangskonstante und des Rezessionskoeffizienten können mit dem Verfahren nach MAILLET auch Aussagen zum abflussfähigen Speichervolumen und der effektiven Porosität gewonnen werden. Hierfür sind jedoch Angaben zur Grundwasserleitermächtigkeit im Einzugsgebiet nötig. In Sickerleitungsquellgebieten, die typischerweise eine sehr heterogene Verbreitung des wasserführenden Gesteinsbereiches im Einzugsgebiet aufweisen, ist die Größe der Grundwasserleitermächtigkeit meist nicht repräsentativ bestimmbar. Daher wird hier auf die Darstellung der Berechnung verzichtet.

### Besonderheiten bei Sickerleitungsquellgebieten

Das Speicherverhalten in einem Quelleinzugsgebiet kann mit Hilfe der Quellschüttungsganglinie unter der Bedingung ausgewertet werden, dass das Einzugsgebiet einem **Einzellinearspeicher** entspricht. Dabei wird angenommen, dass der Speicherinhalt proportional zum Abfluss reagiert. Voraussetzung hierbei ist die unveränderliche Geometrie des Speicherraumes.

Es ist möglich, anstelle der Trockenwetterfalllinie die Abflusskomponentenseparation anhand eines Zeitraumes mit geringem Abfluss (z. B. die Abflussperiode nach der Schneeschmelze) und ohne Niederschlagsereignis durchzuführen. Der Ansatz des Einzellinearspeichers inklusive exponential verlaufendem Leerlaufen in Anlehnung an die Gleichung nach MAILLET kann auch bei kürzeren Messreihen für die Berechnung der Rückgangskonstante verwendet werden. Die ermittelte Rückgangskonstante beschreibt dann einen vom Zwischenabfluss und/oder der schnellen Grundwasserkomponente beeinflussten Wert.

In die Berechnung gehen alle Werte des Zeitraumes nach der höchsten Quellschüttung bis einschließlich zum niedrigsten Wert, dem Auslaufen der Kurve, ein. Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, erfolgt die Auswertung ohne die maximalen Werte einer Quellschüttung. Diese Werte repräsentieren einen großen Anteil des Oberflächenabflusses. Eine Abtrennung vom benötigten Zwischenabfluss ist nach dieser Methode nicht möglich.

Die Parameter der Gleichung nach MAILLET können in den Sickerleitungsquellgebieten wie folgt zugeordnet werden:

- $Q_t$  als Abflusskomponente, die aus Zwischen- und/oder der schnellen Grundwasserkomponente zusammengesetzt ist
- $Q_0$  als maximale Schüttungsmenge zu Beginn der Messung (bspw. nach der Schneeschmelze)
- $\Delta t = t - t_0$  als Zeitspanne der gemessenen Trockenwetterperiode
- $\alpha$  als quellenspezifische Leerlauf-, Auslauf- bzw. Rezessionskonstante
- $K$  als quellenspezifische Rückgangskonstante des Abflussspeichers

Weiterhin ist es möglich, für Sickerleitungsquellen getrennte Speicherräume der Teileinzugsgebiete der einzelnen abzweigenden Sickerleitungen bzw. Sickerstränge zu analysieren. Werden gesonderte Schüttungsmessungen an den Verzweigungen durchgeführt, so können die Rückgangskonstanten dieser Bereiche ermittelt werden. Unterschiedliche Rückgangskonstanten für die einzelnen Teileinzugsgebiete sind möglich.

Vom Prozessbild her ist zu erwarten, dass die Teileinzugsgebiete durch mehrere zusammengesetzte Einzelspeicher modellhaft beschrieben werden können. Einen Speicherraum stellt der bodennahe Hangwasserleiter dar. Die Zersatzzone und das geklüftete Festgestein stellen weitere Speicher dar. In der Trockenwetterfalllinie ist die Superposition der verschiedenen am Gesamtabfluss beteiligten Einzellinearspeicher durch eine Krümmung erkennbar (STRAYLE 1970). Wenn die Trockenwetterfalllinie bzw. die Rückgangskurve nicht darstellbar ist, kann zur Beschreibung eine Kopplung mehrerer Einzelspeicher sinnvoll sein.

Befinden sich in der näheren Umgebung der Quellfassungsanlage Grundwassermessstellen, so können Messwerte des Grundwasserstands vergleichend ausgewertet werden, sofern die folgenden Bedingungen beachtet werden:

- Die Grundwasserstandsmessreihe muss der Grundwasserkomponente im gemessenen Abfluss eindeutig zuordenbar sein.
- Es muss mindestens eine einjährige wöchentliche Grundwasserstandsmessreihe vorliegen.
- Von den gemessenen Grundwasserständen muss die geodätische Höhe des Wasserstands in dem Quellschrot subtrahiert werden, welcher der Grundwassermessstelle am nächsten liegt.

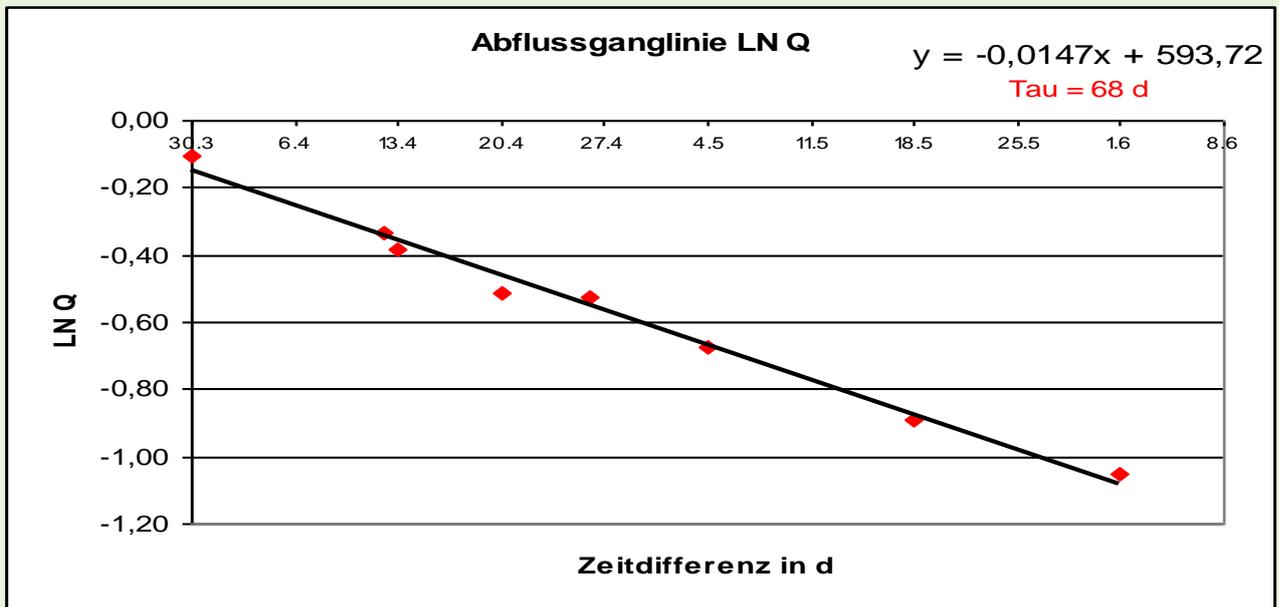
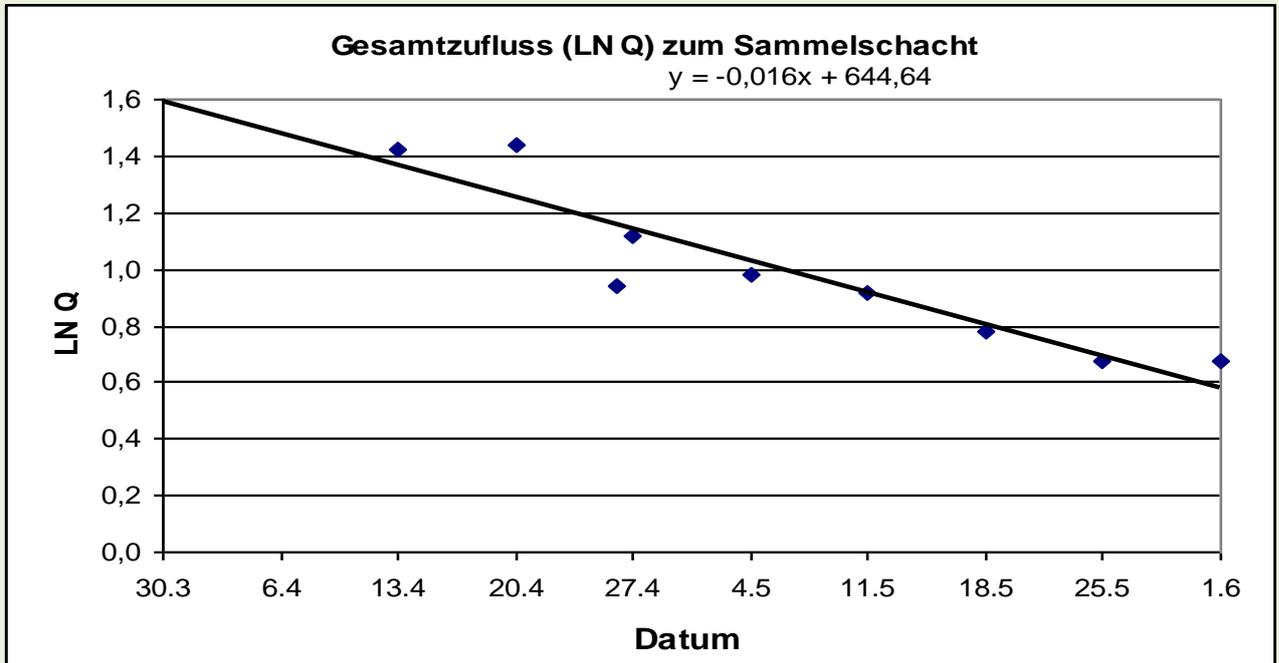
Voraussetzung der Auswertung ist die Betrachtung des Grundwasserleiters als Einzellinearspeicher. Nur dann kann angenommen werden, dass sich die Quellschüttungsmenge proportional zum Wasserstand verhält.

Im Normalfall entsprechen die gemessenen Grundwasserstände ungespannten Verhältnissen. Das bedeutet, dass sich die Grundwasserstandsmessreihe nur dann mit einem Einzellinearspeichermodell auswerten lässt, wenn die Änderungen des Grundwasserstands sehr klein sind im Vergleich zur korrigierten Grundwasserstandshöhe.

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, muss eine weitere Korrektur stattfinden. Die korrigierte Grundwasserstandshöhe wird dann in das GIRINSKIJ-Potenzial  $\Phi = h^2/2$  umgerechnet, bevor sie halblogarithmisch über der Zeit aufgetragen werden kann (BUSCH et al. 1993).

**Praxisbeispiel QG Markt (ARGE Isotopenuntersuchungen 2011)**

Im Quellgebiet Markt wurde anhand der gemessenen Schüttungen am Sammelschacht eine Trockenperiode identifiziert. Die ca. wöchentlich gemessenen Werte der Gesamtschüttung sind logarithmisch zum Datum aufgetragen. Vergleichend wurde die Rückgangskonstante aus gemessenen Grundwasserständen der nahegelegenen Grundwassermessstelle abgeleitet.



K = 62,5 d

K = 68 d

#### 5.1.4 Weitere Verfahren zur Kennwertermittlung

##### Monatliche Niedrigwasserabflüsse (MoNQ-Verfahren nach WUNDT [1958])

Bei der Anwendung des Verfahrens nach WUNDT (1958) werden auf stochastischem Weg die mit dem direkten Abfluss (Oberflächenabfluss) vermischten Niedrigwasserabflüsse (monatliche NQ-Werte = MoNQ) auf den Grundwasseranteil reduziert. Für die Ermittlung der Verteilungsfunktion der Grundwasserabflüsse mittels MoNQ-Werten werden hinreichend lange und kontinuierlich gemessene Beobachtungsmessreihen >10 Jahre benötigt. Die MoNQ-Werte werden der Größe nach geordnet, ihre Summenhäufigkeit ermittelt und in einem linearen bzw. halblogarithmischen Koordinatensystem dargestellt. Es wird eine lineare Regressionsgerade durch die Punktwolke erzeugt. Diese gilt als Trennlinie für den reinen Grundwasserabfluss entsprechend der Grundwasserneubildung. Die Fläche unter der Geraden entspricht dem am Schnittpunkt der Mittelordinate der linearen Regressionsgerade mit der Kurve ermittelten MoNQ-Werte. Die Grundwasserneubildung kann für  $n = 31$  Tage abgelesen werden.

Dieses auf Abflussstatistiken beruhende Verfahren von WUNDT (1958) ist, wie andere Abflussstatistikverfahren (z. B. KILLE 1970; DEMUTH 1993) auch, auf langjährige Messreihen mit kurzen Zeitintervallen ausgerichtet. In der Regel werden Tageswerte benötigt. Analyseergebnisse, die mit zweiwöchig oder monatlich gemessenen Abflusswerten durchgeführt werden, sind nicht wirklich belastbar.

##### Au-Linienverfahren nach NATERMANN (1951)

Die grafische Separation ist die einfachste Methode, um Abflusskomponenten anzusprechen. Relativ weit verbreitet ist das Verfahren nach NATERMANN (1951). Die Abtrennung von Direkt- und Basisabfluss ist jedoch formal, weil die Separierung der Ganglinie noch nach prozesshydrologischen Kriterien erfolgt. Die Ergebnisse sind deshalb eher als fundierte Schätzwerte einzustufen. Vorteilhaft ist, dass so schon bei kurzen Messreihen orientierende Informationen zum Prozessbild gewonnen werden können. Wenn die Datengrundlage für exaktere Verfahren nicht ausreicht, kann eine Anwendung für Quellen sinnvoll sein.

##### Differenzganglinienanalyse DIFGA (SCHWARZE 1985)

DIFGA stellt ein rechnergestütztes Verfahren zur kontinuierlichen Bestimmung von Abflusskomponenten unter der Annahme von parallel geschalteten Einzellinearspeichern dar. Mit diesen Einzellinearspeichern werden bis zu drei unterschiedlich schnelle Abflusskomponenten und der Direktabfluss bestimmt. Die Separation ist mit einem Wasserhaushaltsmodell gekoppelt. DIFGA ist konzipiert für mehrjährige Abflussreihen in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten. Das Verfahren wurde bereits in zahlreichen Einzugsgebieten des Erzgebirges und anderen Regionen sowie für die anthropogen unbeeinflussten Pegel mit langjährigen Abflussreihen angewendet (siehe auch [www.wasserhaushaltportal.sachsen.de](http://www.wasserhaushaltportal.sachsen.de)). Unter Berücksichtigung dieser Erfahrungen kann es auch für kürzere Messreihen als Interpretationshilfe genutzt werden. Sind Schüttingsdaten in täglicher Auflösung für einen Zeitraum von zwei bis drei Jahren vorhanden, kann DIFGA auch in Quelleinzugsgebieten angewendet werden.

Auf der Grundlage dieser Daten können durch gebietsspezifisch vorliegende Daten die Ergebnisse spezifiziert werden (z. B. mit dem erweiterten MAILLET-Verfahren). Mit Hilfe eines Regionalisierungsverfahrens wurden die sächsischen DIFGA-Ergebnisse zur Berechnung des Wasserhaushaltes in der Säule A des Wasserhaushaltsportals Sachsen auf ganz Sachsen übertragen (vgl. Kapitel 5.2.2).

## 5.2 Wasserhaushalt und Grundwasserneubildung

### 5.2.1 Allgemeine Hinweise

Die Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate ist eine besonders wichtige Komponente, um das Wasserdargebot zu ermitteln und die Bewirtschaftung der Wasserfassung zu bewerten. Durch den Vorgang der Grundwasserneubildung wird der Grundwasservorrat eines Einzugsgebietes in Menge und Beschaffenheit wesentlich beeinflusst.

Nach DIN 4049-3 wird Grundwasserneubildung (GWN) als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ bezeichnet, also die Sickerwassermenge, die die Grundwasseroberfläche erreicht. Wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung in einem Quellgebiet haben demnach

- der Niederschlag (Art, Dauer, abhängig von Relief, Luv-/Lee-Lage),
- die Evapotranspiration (abhängig von Temperatur, Sonnenscheindauer, Bewuchs, Wind, Exposition),
- indirekt der oberirdische Abfluss (abhängig von Boden, Gestein, Bewuchs, Hangneigung, Versiegelung),
- die Bodeneigenschaften, die Bodenbedeckung, der Befestigungsgrad, das Gefälle,
- die Sickergeschwindigkeit in der ungesättigten Zone (abhängig von Boden, Gestein, Bewuchs).

Der Prozess der Grundwasserneubildung besteht aus der flächenhaften Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschlagswässer und der örtlich begrenzten Grundwasserneubildung durch infiltrierendes Wasser aus Oberflächengewässern. Bezogen auf die jeweils relevanten Standortbedingungen im Einzugsgebiet sind auch unterirdische Zu- und Abflüsse (z. B. Kluftgrundwasserzutritte) zu berücksichtigen. Üblicherweise erfolgt die Angabe der Grundwasserneubildung für den obersten Aquifer. Im Fall der flächenhaften Grundwasserneubildung in Quelleinzugsgebieten handelt es sich um niederschlagsgespeistes Sickerwasser, das die ungesättigte Bodenzone einschließlich eventuell vorhandener Stauwasserbereiche (temporär wassererfüllte Horizonte auf stauenden Zwischenschichten) verlässt, in der ungesättigten Zone ggf. zeitweise Zwischenabflussanteile abgibt, die Grundwasseroberfläche erreicht und damit in Grundwasser übergeht. Die Grundwasserneubildung ist somit ein Teil der Sickerwasserrate.

Die Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen und der Grundwasserneubildung ist auf verschiedenstem Wege möglich. Nachfolgend sind die gängigsten Methoden zur Abschätzung aufgelistet:

- Wasserhaushaltsmodelle: rechnergestützte Simulation für das Einzugsgebiet oder Verwendung vorausberechneter, sachsenweit verfügbarer Daten
- Ganglinienanalyse: grafische und rechnerische Bestimmung aus Quellschüttungsdaten (vgl. Kapitel 5)
- Abschätzung aus Schlüsselkurven, z. B. KRAFT/SCHRÄBER oder KRAFT/SZYMCZAK (entspricht der empirischen Auswertung von Langzeituntersuchungen; anschließende grafische Auswertung und Übertragung auf Untersuchungsgebiet möglich)

Die Klimatische Wasserbilanz als simpelste Methode wird in Sachsen wegen der landesweit vorliegenden Daten zum Wasserhaushalt nicht empfohlen.

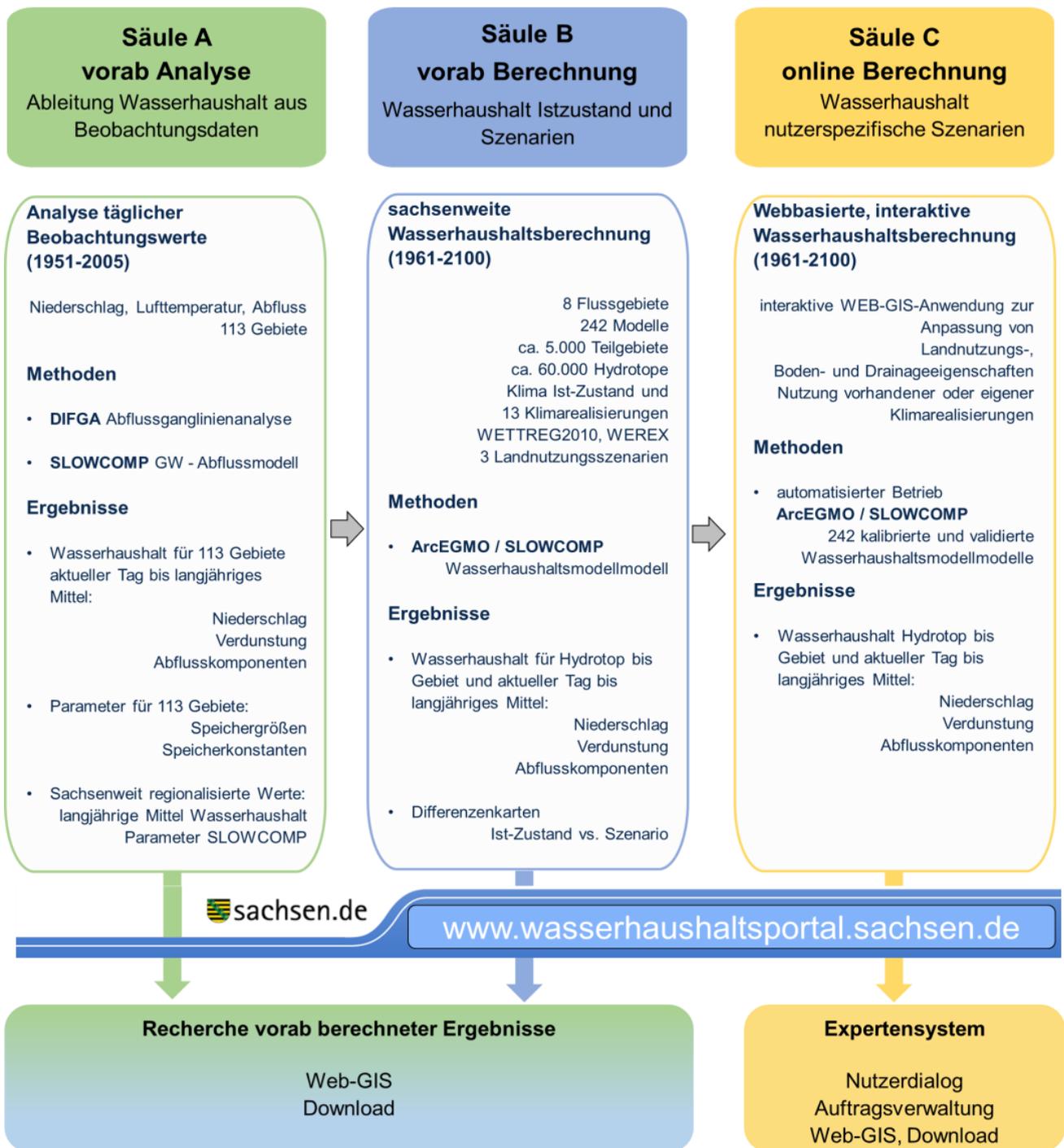
Arbeitsgrundlage in Sachsen bilden die Ergebnisse, die im Wasserhaushaltsportal Sachsen online zur Verfügung gestellt werden. Die methodische Herangehensweise und Anwendungshinweise für sächsische Quellgebiete werden in Kapitel 5.2.2 kurz dargelegt. Alle weiteren genannten Möglichkeiten der Berechnung

oder Abschätzung können zur Plausibilisierung der Ergebnisse vergleichend herangezogen werden. Dazu zählen neben den verschiedenen Abschätzungsverfahren auch ältere Wasserhaushaltsmodellergebnisse wie die des Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD), des LfULG-Grundwassermodells GEOFEM-2004 oder STOFFBILANZ (Modul Wasserbilanz).

### 5.2.2 Anwendung des Wasserhaushaltsportals Sachsen

Das Wasserhaushaltsportal Sachsen stellt sachsenweit Daten für einzelne Wasserhaushaltskomponenten sowohl für den Istzustand (1951–2005 bzw. 1961–2010) als auch für ausgewählte Zukunftsszenarien (2011–2100) bereit. Die Ergebnisse der Analysen und Berechnungen können online über das Wasserhaushaltsportal ([www.wasserhaushaltsportal.sachsen.de](http://www.wasserhaushaltsportal.sachsen.de)) in interaktiven Karten betrachtet, aber auch einzugsgebietsweise als dbf- bzw. pdf-Dateien oder GIS-kompatible Shapefiles heruntergeladen werden.

Um die Komplexität der auf den Wasserhaushalt wirkenden Prozesse zu erfassen, wurde in KliWES ein Drei-Säulen-Konzept entwickelt. Dieses beruht auf stufenweise angeordneten, sich gegenseitig stützenden, aber voneinander unabhängigen Ensembles von Berechnungsverfahren der Wasserhaushaltskomponenten. Abbildung 6 veranschaulicht das Drei-Säulen-Konzept zusammenfassend.



**Abbildung 6: KliWES-Säulen – Kurzübersicht zum Drei-Säulen-Konzept in KliWES**  
 ([www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/10888.htm](http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/10888.htm))

**Drei-Säulen-Konzept: Eingangsdaten und Berechnungsgrundlagen**

Die **Säule A** beinhaltet das DIFGA-Verfahren zur Analyse von Durchflussreihen der Jahre 1951–2005. Das Differenzganglinienerfahren DIFGA teilt die langjährigen, täglichen Abflussganglinien in die Abflusskomponenten Direktabfluss sowie schneller und langsamer Grundwasserabfluss auf. Der Ansatz basiert auf dem Einzellinearspeichermodell. Grundlage der Analysen sind Messwerte. Die Ergebnisse der Separation können für die Plausibilisierung von Wasserhaushaltsmodellen herangezogen werden. Die Analysen wurden für ausgewählte, anthropogen weitgehend unbeeinflusste sächsische Pegelzugsgebiete mit ausreichend langen Durchflussmessreihen durchgeführt. Die ermittelten Abflusskomponenten und Rückgangskonstanten

konnten durch Anwendung hydrogeologischer Ansätze und Formulierung physikalisch begründeter Zusammenhänge zwischen den in DIFGA ermittelten Modellparametern und den geohydraulischen und morphologischen Eigenschaften eines Gebietes für nicht berechnete Gebiete regionalisiert werden. Die Grundlagen dieser geohydraulischen und physikalischen Zusammenhänge sind in SCHWARZE et al. (1999) sowie HENNIG & SCHWARZE (2001) dargelegt. **Die Ergebnisse der Säule A spiegeln den „quasinatürlichen“ Wasserhaushalt ohne anthropogene Beeinflussungen wider.**

Die Modellparameter Speicherkonstante des schnellen und langsamen Grundwasserspeichers ( $CG1$ ,  $CG2$ ) und Speicherobergrenze für den schnellen Grundwasserspeicher ( $SG1_{grenz}$ ) der DIFGA-Analyse fließen für weitere Berechnungen in das Grundwasserabflussmodell SLOWCOMP im Modellverbund der Säule B ein.

In der Säule B wird der Wasserhaushalt für ganz Sachsen sowohl für den klimatischen Istzustand (1961–2010) als auch für ausgewählte Klima- und Landnutzungsszenarien (1961–2100) berechnet. **Das Modell ArcEGMO berechnet den „beeinflussten“ Wasserhaushalt unter Berücksichtigung von Talsperren, Wassereinleitungen und -entnahmen.** Die Bergbaugebiete und der Elbeschlauch wurden aufgrund von besonderen Gegebenheiten nicht modelliert.

Als Ergebnisse der Modellkopplung von ArcEGMO und SLOWCOMP sind flusseinzugsgebietsbezogene Wasserhaushaltsgrößen ( $P$ ,  $ETR$ ,  $RS$ ,  $RG1$ ,  $RG2$ ,  $GWN$ ) als Monats- und Jahresmittelwerte für den Istzustand (1961–2010) und ausgewählte Klimaszenarien (2011–2100) online im Wasserhaushaltsportal Sachsen abrufbar. Die Modellierung erfolgte auf Basis einer Hydrotopeninteilung, über deren angenommene Eigenschaften man sich in Säule C informieren kann.

Die **Säule C** ermöglicht auf der Grundlage der Modelle in Säule B online über die eigenständige Änderung von Landnutzung, Bodenparameter, Klimadaten die spezifische Berechnung des Wasserhaushaltes in beliebigen Teileinzugsgebieten. Die Abfragen werden ad hoc berechnet und dem Nutzer über einen Internetlink zur Verfügung gestellt.

#### Literaturhinweise:

- LfULG (2011): KliWES – Kernkomponente. 67 S., Schriftenreihe des LfULG, Heft 44/2011, Dresden.  
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15110>
- LfULG (2012): KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen. Auswahl von Klimaszenarien. 58 S., Dresden.
- LfULG (2013): KliWES – Nebelkorrektur. 71 S., Schriftenreihe des LfULG, Heft 16/2013, Dresden.  
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12169>
- LfULG (2016): Wasserhaushalt im Wandel von Klima und Landnutzung. 136 S., Schriftenreihe des LfULG, Heft 8/2016, Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/26146>
- PFÜTZNER, B. (2013): ArcEGMO Modelldokumentation. – <http://www.doku.arcegmo.de> (Stand: 2013, abgerufen am 01.12.2013) – ISBN 3-00-011190-5.

### 5.2.3 Anwendung weiterer Verfahren zur Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen

#### Weitere Wasserhaushaltsmodelle: STOFFBILANZ, GEOFEM, HAD

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Wasserhaushaltsmodelle zur Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen in Sachsen genutzt. Diese Modelle beruhen meist auf empirischen oder konzeptionellen Ansätzen. Einige Modelle beschreiben den Wasserkreislauf z. T. auf der Grundlage physikalisch begründeter Algorithmen.

Die Modelle GEOFEM-2004 und STOFFBILANZ, Modul Wasserbilanz, sind empirisch-konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle. Sie berechnen langjährige mittlere Wasserhaushaltsdaten (Gesamtabfluss-, Direktabfluss-, Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsrate, GEOFEM-2004 mit kurzfristigen und langfristigen Anteilen) auf Basis der Zeitreihe 1961–1990 (GEOFEM-2004) bzw. 1961–2010 (STOFFBILANZ) für den Locker- und Festgesteinsbereich in Sachsen. Die Modelle arbeiten mit digitalen Grunddatensätzen (DWD-Niederschlagsdaten 1961–1990 bzw. 1961–2010, Geländemodell DGM25, ATKIS-DLM25) sowie mit hydrogeologischen und bodenkundlichen Daten aus den digitalen Übersichtskarten HÜK200 und BÜK200. Die berechneten Daten zur Grundwasserneubildung schließen die Zwischenabflüsse in der ungesättigten Zone nicht ein, diese werden gesondert berechnet. Beide Wasserhaushaltsmodelle arbeiten rasterbezogen mit sogenannten Berechnungseinheiten von 500 x 500 m. Die berechneten Wasserhaushaltsdaten sind **langjährige mittlere Jahreswerte** und erlauben keine Aussage zum Jahresgang der Abflusskomponenten oder zu kurzfristigen Ereignissen. Die Daten zur Grundwasserneubildung sind auf den oberen Grundwasserleiter nach HÜK 200 bezogen. In die Berechnungen mit GEOFEM-2004 gehen zusätzlich die in der HÜK 200 ausgewiesenen bindigen Deckschichten ein. Schichtmächtigkeiten, Grundwasserflurabstände, Zuflüsse in das Untersuchungsgebiet, Wasserentnahmen und urbane Kanalisation werden in den Modellen nicht berücksichtigt.

Bei der Ermittlung und Auswertung des Wasserhaushaltes mit diesen GIS-gestützten, gerasterten Modellen ist folgendes zu beachten:

- Ergebnisse von STOFFBILANZ sind über das Wasserhaushaltsportal Sachsen verfügbar.
- Das Modell GEOFEM-2004 wurde seit 2012 durch die Ergebnisse im Wasserhaushaltsportal abgelöst. Alte verfügbare Berechnungen wurden mit dem Versand durch das LfULG mit spezifischen Hinweisen zu deren Verwendung versehen und können zu Vergleichszwecken noch herangezogen werden.
- In beiden Modellen sind nur Aussagen zum Istzustand der verwendeten Klimadatenreihe möglich. Änderungen des Grundwasserhaushaltes unter sich verändernden Rahmenbedingungen (z. B. Klima, Landnutzung) sind nicht möglich. Es ist zu prüfen, ob die Eingangsdaten (z. B. Landnutzung) noch den Standortbedingungen entsprechen.
- Beide Modelle berechnen langjährige mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltsgrößen. Somit sind keine Aussagen zum Jahresgang der Abflusskomponenten oder zu kurzfristigen Abflussereignissen möglich. Diese spielen jedoch in Sickerleitungsquellgebieten meist eine entscheidende Rolle. Ersichtlich wird dies anhand der meist schnellen Reaktion der Quellschüttung auf Witterungsereignisse.

Der **Hydrologische Atlas von Deutschland** kann als Standardkartenwerk für Deutschland angesehen werden, in dem nicht nur Wasserhaushaltsdaten erfasst bzw. berechnet sind, sondern auch kartografische Übersichten zu gewässerkundlichen Grunddaten, den Themenbereichen Hydrometeorologie, oberirdische Gewässer, Bodenwasser, Grundwasser und zum Themenkomplex Hydrologie-Ökologie-Mensch zusammengefasst sind. Er wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

(BMUB) herausgegeben. Der HAD liefert deutschlandweit mittlere langjährige Wasserhaushaltsdaten (u. a. (un-)korrigierter Niederschlag, potenzielle Verdunstungshöhe als Gras-Referenzverdunstung, tatsächliche Verdunstung, Gesamtabfluss, Grundwasserneubildung) auf Grundlage der Klimareihe 1961–1990 in einem 1 x 1-km-Raster. Aufgrund der groben Aufteilung hat er für die Berechnung des Wasserhaushaltes in Sickerleitungsquellen nur eingeschränkte Aussagekraft.

### Schlüsselkurven

Das Verfahren zur Ableitung der Grundwasserneubildung über sogenannte Grundwasserspendenschlüssel wurde von KRAFT & SCHRÄBER (1982) entwickelt und später durch KRAFT & SZYMCAK (1993) weiterentwickelt. Grundlage dieses Verfahrens sind die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Geologie, der Niederschlagshöhe und der Grundwasserneubildung. Um das Verfahren anwenden zu können, muss der korrigierte Gebietsniederschlag, die Geologie und der Zerrüttungsgrad des Gesteins, möglichst mit konkreten Werten der Transmissivität belegt, vorliegen.

Bei dem Verfahren ist zu beachten:

- Neben dem Niederschlag und dem anstehenden Gestein werden keine weiteren neubildungsfördernden Standortfaktoren wie Gefälle, Bodennutzung, Wasserflächenanteil berücksichtigt.
- Grundwasserhaushalt wird losgelöst von seiner Einbettung in den Gesamtwasserhaushalt betrachtet.
- Schlüsselkurven basieren auf einer empirischen Modellvorstellung, die die zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht mittels entsprechender Gleichungen nachbildet.
- Es sind nur Aussagen zum Istzustand möglich. Änderungen des Grundwasserhaushaltes unter sich verändernden Rahmenbedingungen (z. B. Klima, Landnutzung) sind nicht oder nur eingeschränkt möglich (LfUG 2008).

### Modellierung

Die **Simulation des Wasserhaushaltes** mit Hilfe von frei verfügbaren oder kommerziellen Modellen (z. B. BOWAM, AKWA-M, WaSiM-ETH, MIKE-Produkte) ist ebenfalls möglich. Meist übersteigt der Aufwand jedoch den Nutzen stark. Zudem sind in den seltensten Fälle alle erforderlichen Eingangsdaten in entsprechend erforderlicher Auflösung verfügbar.

Zusammenfassend müssen folgende Sachverhalte bzw. Fragestellungen bei der Interpretation und Modellvergleiche berücksichtigt werden:

- Die Ergebnisse der DIFGA-Analyse, -Regionalisierung und der Wasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO und SLOWCOMP liegen für die sächsischen Flusseinzugsgebiete vor. Die Einzugsgebiete der sächsischen Quellen sind in vielen Fällen kleiner oder befinden sich mitunter in mehreren Flusseinzugsgebieten. Über Säule C kann man sich im Wasserhaushaltsportal die zugrunde liegenden Hydrotope ansehen und ggf. über Änderung von Landnutzungs- und/oder Bodenparameter weitere Anpassungen vornehmen.
- Wasserhaushaltsmodelle verwenden neben unterschiedlichen oder unterschiedlich definierten Parametern mitunter auch verschiedene Zeitreihen als Eingangsdaten. Bei Gegenüberstellung verschiedener Ergebnisse ist dies zu beachten, damit die Ergebnisse und ggf. auftretende Unterschiede bewertet werden können.
- Wasserhaushaltsgrößen werden durch unterschiedliche Berechnungsalgorithmen oder nur empirisch bestimmt. Eine kritische Gegenüberstellung und Bewertung möglicher Fehlerquellen ist angebracht, um die Plausibilität von Ergebnisse prüfen zu können.

- Empirische Modelle liefern nur langjährige, mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltsgrößen. Eine Abbildung des Jahresgangs der Abflusskomponenten oder Aussagen zu kurzfristigen Abflussereignissen ist nicht möglich. Diese spielen jedoch in Sickerleistungsquellen meist eine entscheidende Rolle.
- Bei der Neumodellierung ist zu beachten, dass die Grundwasseroberfläche sehr oberflächennah ist und Standardwerte aus Kartenwerken zu Fehlinterpretationen führen, weil dort zumeist die Eigenschaften des anstehenden Festgesteins wiedergegeben sind. Quellgebiete nutzen häufig Hanggrundwasserleiter und/oder kleinräumig verbreitete Talgrundwasserleiter.
- In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Modellen als mögliche Schwankungsbreite bei der Schutzgebietsausweisung berücksichtigt werden können, sofern die Ergebnisse plausibel sind.
- Die Lage des Quellgebietes im Flusseinzugsgebiet ist zu beachten. Es treten räumliche Schwankungen der Wasserhaushaltskomponenten in Abhängigkeit von z. B. Landnutzung und Vegetation auf.

#### Literaturhinweise:

- BMU [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit] (Hrsg.) (2001, 2002, 2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – 1.-3. Lieferung, Bonn.
- GEBEL, M.; HALBFAß, S.; BÜRGER, S.; UHLIG, M. (2012): STOFFBILANZ Modellerläuterungen. – 63 S., Dresden (Gesellschaft für angewandte Landschaftsforschung bR).
- LfUG (2008): Fachkonzept zur Berechnung des Wasserhaushalts für den Fest- und Lockergesteinsbereich in Sachsen mit dem Schwerpunkt Grundwasserhaushalt („Grundwasserhaushalt Sachsen“). – 183 S., Dresden.
- LfULG (2009): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. – 1. Aufl., 83 S., Dresden.  
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11725>

## 5.3 Wasserbeschaffenheit

### 5.3.1 Allgemeine Hinweise

Die Auswertung der chemischen, physikalischen, biologischen und organoleptischen Ergebnisse der Rohwasseranalysen von Quelfassungen kann vielfältige Hinweise auf Eigenschaften des Quellgebietes oder Gefährdungspotenziale geben. In einem ersten Arbeitsschritt ist ein Vergleich der Parameter mit der aktuellen **Trinkwasserverordnung** (TrinkwV 2001) und den darin enthaltenen Grenzwerten zu mikrobiologischen (Anlage 1 der TrinkwV 2001) und chemischen Parametern (Anlage 2 der TrinkwV 2001) sowie weiteren Indikatorparametern (Anlage 3 der TrinkwV 2001) vorzunehmen, um Grenzwertüberschreitungen auszuschließen bzw. festzustellen.

Im weiteren Verlauf der Analyse der hydrochemischen Daten können aufgrund der Höhe der Gehalte einzelner Inhaltsstoffe bzw. Parameter Rückschlüsse auf den Einfluss von Oberflächengewässern, die Herkunftsräume des Quellwassers oder Gefährdungspotenzialen gezogen werden. In Tabelle 4 sind die wichtigsten zum Untersuchungsumfang nach TrinkwV (2001) gehörenden Parameter zusammengefasst.

Die Auswertung der chemischen, physikalischen und biologischen Parameter lässt erste Hinweise auf mögliche Verschmutzungen durch industrielle/häusliche Abwässer oder durch landwirtschaftliche Betriebsführung zu. Somit sind auch Rückschlüsse zur Grundwassergeschütztheit und der Grundwasser- bzw. Sickerwasserverweilzeit möglich. Des Weiteren können Interaktionen mit nahegelegenen Oberflächengewässern abgeleitet werden.

**Tabelle 4: Übersicht zu Bedeutung, Herkunft und Grenzwerten von wichtigen Wasserinhaltsstoffen**

Parameter	Bedeutung und Herkunft	Grenzwert nach TrinkwV (2001)
Farbe, Trübung, Geruch, Geschmack	<p>Trübungserscheinung nach (Stark-)Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze sind Anzeichen für eine geringe Filterwirkung der Grundwasserüberdeckung und eine wesentliche Beeinflussung der Quelfassung durch Zwischenabfluss. Hinweis auf die Nutzung von oberflächennahem Grundwasser mit geringen Verweilzeiten. Ein natürlicher Schutz des Grundwassers vor potenziell von der Oberfläche eindringenden Schadstoffen fehlt.</p> <p>Die subjektiv bestimmte Ansprache des Quellwassers anhand organoleptischer Parameter kann auf externe Verunreinigungen hinweisen</p>	für den Verbraucher annehmbar und ohne abnormale Veränderungen
Temperatur	<p>Hohe Temperaturschwankungen treten bei geringer Grundwasserüberdeckung mit kurzen Verweilzeiten auf. Sie können aber auch Hinweis auf eindringendes Oberflächenwasser oder anthropogene Einflüsse sein.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– saisonale Temperaturabhängigkeit ist typisch für Flachwasserfassungen</li> <li>– unterirdische Zuflüsse</li> </ul>	kein Grenzwert
Elektr. Leitfähigkeit (LF)	<p>= Maß für Gesamtmineralisation (Summe der gelösten Salze) des Quellwassers in Abhängigkeit vom umgebenden Gestein</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– geringe LF (z. B. 180-770 mg/l) ist charakteristisch für oberflächennahes, innerhalb der Auflockerungszone zirkulierendes, junges Wasser, geringe LF ist ein Hinweis auf relativ geringe Stoffkonzentrationen (Sulfat, Nitrat, Calcium, Chlorid mit meist anthropogen Ursprung)</li> <li>– hohe LF können Hinweis auf Gewässerverunreinigungen, Kluftgrundwasser oder geologische Besonderheiten (z. B. Salz- oder Gipsvorkommen) sein</li> <li>– Vergleich der LF von Quellwasser und Oberflächenwasser gibt Hinweis auf mögliche Nutzung bzw. Infiltration von Uferfiltrat</li> </ul>	LF bei 25 °C: 2790 µS/cm
pH-Wert	<p>Quellwässer in Sachsens Mittelgebirgen liegen im sauren bis neutralen pH-Bereich. Ursache hierfür sind die geologischen Verhältnisse (z. B. Granite, Quarze), der atmosphärische Eintrag oder die Vegetation (hoher Waldbestand). Der pH-Wert unterliegt schnellen Veränderungen und beeinflusst das Lösungsverhalten sowie die Bindungsform vieler Wasserinhaltsstoffe, z. B. die Komplexbildung potentiell toxischer Metalle.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– niedrige pH-Werte z. B. durch Verwitterung sulfidischer Erzkomponenten</li> <li>– hohe pH-Werte - Siedlungsgebiete</li> </ul>	6,5–9,5
Sauerstoff	<p>Der Sauerstoffgehalt ist wichtig für hydrochemische Beurteilung anderer Parameter. In der Regel gesättigte Verhältnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– reduzierende Verhältnisse sind möglicherweise durch anthropogene Belastungen, z. B. Abwässer, Deponiesickerwässer bedingt</li> </ul>	kein Grenzwert
Gesamthärte (GH), Karbonathärte (KH)	<p>Die Wasserhärte wird durch den Gehalt an Calcium- und Magnesiumsalzen bedingt. Die Gesamthärte entspricht der Summe aus Karbonat- und Nichtkarbonathärte, wobei die Karbonathärte durch Calcium- und Magnesiumsalze der Kohlensäure gebildet wird.</p> <p>Der Härtequotient korreliert mit der Verweilzeit des Grundwassers und erlaubt einfache Rückschlüsse auf die Grundwassergeschüttheit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– günstige Verhältnisse liegen vor, wenn die KH nur einen geringen Anteil an der GH ausmacht</li> <li>– in der Regel niedrige Härte</li> </ul>	keine Grenzwerte
Calcium, Magnesium	<p>Gehalt hängt entscheidend von der Petrografie und dem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Grundwassers ab. In Quellwässern treten relativ hohe Konzentrationen auf. Das Calcium/Magnesium-Verhältnis ist geeignet, um unterschiedliche geologische Herkunftsräume zu identifizieren.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– höhere Magnesiumgehalte können von Überdüngungen und von fäkalen</li> </ul>	keine Grenzwerte

Parameter	Bedeutung und Herkunft	Grenzwert nach TrinkwV (2001)
	oder industriellen Abwässern stammen	
Eisen, Mangan	<p>Sind in Quellwässern aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt anzutreffen, weil reduzierte Fe<sup>2+</sup>- und Mn<sup>2+</sup>-Ionen wasserlöslicher sind. Im Kontakt mit Luftsauerstoff (am Quellaustritt) sind ockerfarbige Ablagerungen (z. B. Eisen(III)-Hydroxid) zu erkennen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Gehalte: reduzierende Verhältnisse</li> <li>– hohe Gehalte sind meist geogen bedingt, z. B. durch benachbarte Erzgänge bei Stollenwasserfassungen</li> <li>– niedrige Gehalte (Spuren): sauerstoffreiches Quellwasser</li> </ul>	<p>Fe<sub>gesamt</sub>: 0,2 mg/l Mn: 0,05 mg/l</p>
Natrium, Kalium	<p>Natrium und Kalium sind im natürlichen Quellwasser meist nur in geringen Konzentrationen vorhanden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– höhere Werte können auf geologische Besonderheiten, z. B. Salzlinsen oder Tongesteine hinweisen</li> <li>– höhere Gehalte können durch anthropogene Verunreinigungen wie Fäkalien, Deponiesickerwässer, Wintersalzstreuung oder Auswaschung von Kali-Düngersalzen entstehen</li> </ul>	<p>Na: 200 mg/l K: kein Grenzwert</p>
Chlorid, Sulfat	<p>Sulfat ist ein terminaler Elektronenakzeptor, wenn weder Sauerstoff, Nitrat, Mangan(IV) oder Eisen(III) vorhanden sind (Sulfatreduktion). Hohe Gehalte können geogenen oder anthropogenen Ursprungs sein.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– geogene Sulfatquellen: z. B. Braunkohlevorkommen, Moore und Gipslagerstätten</li> <li>– anthropogene Sulfatquellen: z. B. Auswaschung von Dünger, Rauchgase, industrielle Abwässer oder Deponieabwässer</li> <li>– geogene Chloridquellen: z. B. Salzdolinen</li> <li>– anthropogene Chloridquellen: z. B. Winterstreusalze, Mineraldünger oder (fäkal) Verunreinigungen</li> </ul>	<p>Cl: 250 mg/l SO<sub>4</sub>: 240 mg/l</p>
Phosphat	<p>Im natürlichen Quellwasser liegen meist sehr geringe Konzentrationen vor. Die Ausnahme können Moorwässer mit hohen Phosphatgehalten bilden. Phosphat dient als Nährstoff bei biologischen Abbauprozessen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Phosphatgehalte sind häufig anthropogen verursacht, z. B. durch versickernde häusliche Abwässer oder Düngemittelauswaschungen</li> <li>– erhöhte Phosphatgehalte können ein Anzeiger für anthropogene Belastungen und ein Kriterium für eine unzureichende Bodenfiltration sowie den Einfluss von Oberflächenwasser sein</li> </ul>	<p>PO<sub>4</sub>: kein Grenzwert</p>
Nitrat	<p>Nitrat ist ein sehr sensibler Parameter mit Untersuchungserfordernis. Nitrat ist ein terminaler Elektronenakzeptor, wenn kein Sauerstoff mehr vorhanden ist (Denitrifikation).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Nitratwerte zeigen die anthropogene Beeinflussung der Grundwassers und lassen Rückschlüsse auf die Geschüttheit des Sickerwassers und dessen Verweilzeit zu</li> <li>– hohe Nitratgehalte sind häufig durch Düngung landwirtschaftlicher Nutzflächen im Einzugsgebiet hervorgerufen; treten aber auch durch die Versickerung von Abwässern, Deponiewässern oder durch flächenhafte Emissionen durch Kraftverkehr auf</li> <li>– hohe Nitratgehalte lassen auf junges Wasser mit hohem (schnellen) Zwischenabflussanteil schließen</li> <li>– niedrige Nitratgehalte lassen auf Nutzung von tieferen Grundwasserressourcen schließen</li> </ul>	<p>50 mg/l</p>
Ammonium, Nitrit	<p>Beide Stoffe sind im Regelfall im natürlichen Quellwasser praktisch nicht vorhanden. Ammonium und Nitrit entstehen als Zwischenprodukt der Nitratreduktion. Für die Bewertung der Stoffkonzentration ist der Sauerstoffgehalt des Wassers zu</p>	<p>NH<sub>4</sub>: 0,5 mg/l NO<sub>2</sub>: 0,5 mg/l</p>

Parameter	Bedeutung und Herkunft	Grenzwert nach TrinkwV (2001)
	berücksichtigen.  <ul style="list-style-type: none"> <li>– sind Indikatoren für massive anthropogene Belastungen, z. B. häusliche Abwässer, Fäkalien, Jauche</li> <li>– entstehen unter oxidativen Verhältnissen durch die Oxidation von exkrementalen Eiweißverbindungen</li> <li>– können unter reduktiven Verhältnissen auch durch die Reduktion von Nitrat entstehen</li> <li>– Mikroorganismen oxidieren Ammonium zu Nitrat, was zum Anstieg der Nitritgehalte führt</li> </ul>	
Aluminium	Gewinnt in der Wasserversorgung zunehmend an Interesse seit erkannt wurde, dass durch sauren Regen im Boden gebundenes Aluminium freigesetzt werden kann. In sächsischen Quellgebieten sind häufig höhere Gehalte anzutreffen.  <ul style="list-style-type: none"> <li>– sächsische Quellen besitzen meist einen leicht sauren pH-Wert, der zur Lösung von Aluminiumverbindungen führt</li> <li>– mögliche Quellen sind: durch Pyritverwitterung, Erz- oder Uranbergbau versauerte Grundwässer oder kristalline Gesteine (z. B. Gneise), Feldspatverwitterung</li> </ul>	0,2 mg/l
Arsen	Erhöhte Arsenkonzentrationen im Grundwasser sind an sedimentäre Eisenerzlagertstätten, Schiefer und Tone, Sulfidminerale (Pyrit) bzw. an kohlige Substanzen gebunden. Vor allem in Gebieten mit geothermischer Aktivität können die Arsenkonzentrationen im Grundwasser hoch sein. Haldeneinfluss vor allem in der Nähe von Braunkohlenabraumkippen bzw. historischen Erzbergbauhalden	0,01 mg/l
Uran	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Beeinflussungen durch den Uran-Bergbau der WISMUT möglich</li> <li>– Geogen bedingt</li> <li>– Verwendung von U-haltigen Phosphaten zur Düngung</li> </ul>	Uran
TOC/DOC-Verhältnis	Gesamtheit des organisch gebundenen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten Kohlenstoffanteils (DOC) davon. TOC gilt als Maß für die Belastung des Wassers mit organisch-chemischen Substanzen, die meist anthropogenen Ursprungs sind.	TOC: ohne abnormale Veränderungen
Mikrobiologische Belastungen	Mikrobielle Belastungen wie koliforme Keime oder Escheria Coli sollten im Trink- und Quellwasser nicht vorhanden sein. Ihr Vorhandensein ist daher ein Nachweis für den Kontakt mit Fäkalien, sodass eine Verunreinigung mit anderen Krankheitserregern nicht ausgeschlossen ist. Mögliche Ursachen können sein:  <ul style="list-style-type: none"> <li>– Versickerung von ungeklärten Abwässern oder diffuse Ableitung von ungeklärten häuslichen Abwässern</li> <li>– Ausbringung von Gülle oder Festmist auf landwirtschaftlichen Nutzflächen</li> <li>– Tier- oder Wildbestand, der bei ungesicherten Fassungsanlagen (z. B. in Wäldern) nahe an diese herantreten kann</li> <li>– vereinzeltes Auftreten von geringen Kolonienzahlen ist häufig bei Flachwasserfassungen anzutreffen (die Herkunft ist nicht immer eindeutig klärbar)</li> </ul>	Escheria coli: 0/ 100 ml Enterokokken: 0/ 100 ml Coliforme Keime: 0/ 100 ml

Je nach Problemstellung müssen weitere Wasserinhaltsstoffe einbezogen werden. Mögliche Stoffgruppen sind potenziell toxische Schwermetalle und Metallverbindungen (z. B. Blei, Cadmium, Kupfer), Pflanzenschutz- und Pflanzenbehandlungsmittel oder branchenspezifische organische Verbindungen (z. B. LHKW und andere Kohlenwasserstoffverbindungen). Von den radioaktiven Stoffen kommen – z. B. wegen geologisch bekannter Aureolen im Granit und dessen Kontakthöfen im Westerzgebirge und Vogtland – Radon und Uran in Frage. Zur Qualitätssicherung der durchgeführten Analytik sind Ionenbilanzen ein wichtiges Kontrollinstrument.

### Praxisbeispiel QG Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn und Achternweg (G.E.O.S. 2013)

Es folgt eine Gegenüberstellung der relevanten Beschaffenheitsparameter (rot gekennzeichnet sind Grenzwertunter- bzw. -überschreitungen).

**Tabelle 6: Relevante Beschaffenheitsparameter der QG Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn, Achternweg (nach G.E.O.S. 2013)**

Parameter	QG Hüttstatt	QG Sauheidebächel	QG Goldborn	QG Achternweg	Grenzwert nach TrinkwV
	2005, 2008, 2011: Minimum - Maximum				
pH-Wert	5,7 - 6,0	4,6 - 4,8	5,4 - 5,8	5,5 - 5,6	6,5 - 9,5
LF [ $\mu$ S/cm]	90 - 168	85 - 96	168 - 250	104 - 114	2500
GH [ $^{\circ}$ dH]	1,6 - 2,8	1,2 - 1,4	2,4 - 4,0	1,8 - 2,1	-
O <sub>2</sub> [mg/l]	10,2 - 10,7	10,2 - 12,8	9,4 - 11,3	9,1 - 10,4	-
SO <sub>4</sub> [mg/l]	23,6 - 31,8	27,7 - 32,3	36,6 - 38,0	33,6 - 37,6	240
Cl [mg/l]	2,50 - 23,4	1,80 - 2,19	20,8 - 48,0	2,00 - 2,10	250
NO <sub>3</sub> [mg/l]	8,05 - 9,50	5,90 - 6,97	6,95 - 9,00	8,08 - 9,20	50
Fe [mg/l]	0,02 - 0,26	0,02 - 0,03	< 0,02	< 0,02 - 0,04	0,02
Mn [mg/l]	< 0,02 - 0,03	0,17 - 0,21	< 0,02 - 0,04	< 0,02	0,05
Al [mg/l]	0,07 - 0,25	1,11 - 1,72	< 0,02 - 0,14	0,03 - 0,05	0,2

Die untersuchten Rohwässer zeigen charakteristische Eigenschaften von oberflächennah, innerhalb der Verwitterungs- und Zersatzzonen saurer kristalliner Gesteine zirkulierendem, jungen Grundwassers. Dazu gehören:

- geringe Gesamtmineralisation (= geringer Gehalt an gelösten An- und Kationen)
- geringe Gesamthärte, die ein überwiegend weiches Wasser belegt
- saurer pH-Wert
- fehlendes Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, wodurch relativ hohe Gehalte an freier und kalkaggressiver Kohlensäure auftreten
- hoher Sauerstoffgehalt

Die geringen Nitratwerte weisen darauf hin, dass keine anthropogene Belastung aus der Landwirtschaft vorliegt. Die Einzugsgebiete liegen nahezu vollständig im Kriegswaldgebiet (Ausnahme QG Hüttstatt). Der Grund für die über dem Grenzwert liegenden Mangan- und Aluminiumgehalte im QG Sauheidebächel ist der niedrige pH-Wert. Diese Werte sind dennoch unkritisch und typisch für die Bedingungen im Festgesteinszersatzbereich. Aufgrund des geringen Anteils der Grundwassermenge im Rohmischwasser zusammen mit den anderen Quellgebieten spielen die Überschreitungen keine Rolle. Sporadisch treten in allen Fassungsbereichen koliforme Keime und z. T. Enterokokken auf, was für diese Fassungsart und deren Standortbedingungen durchaus typisch ist.

Die teilweise vorhandenen Unterschiede der Rohwässer der vier Quellgebiete entsprechend den lokalen Standortbedingungen weisen auf die unterschiedlichen Herkunftsräume des gehobenen Wassers hin. Ebenso sind die Schwankungen einzelner Inhaltsstoffe normal und entsprechen den spezifischen Fassungsbedingungen.

### 5.3.2 Auswertung mittels PIPER-Diagramm

Mit der Ionenbilanzrechnung unter Einbeziehung der oben genannten Hauptkationen und -anionen sind die Grundlagen zur Klassifizierung und Typisierung gegeben. Die einfachste Form der Typisierung ist die Benennung des Wassers nach dem Vorkommen der Hauptinhaltsstoffe (Anionen und Kationen > 25 mmol%) in der Reihenfolge ihrer Größenanteile. Jedoch ist die grafische Typisierung anhand von Mehrstoffdiagrammen geeigneter, um eine komplexe Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse vorzunehmen und zeitliche Entwicklungen bzw. Veränderungen durch geogene oder anthropogene Einflüsse zu erkennen.

Das PIPER-Diagramm ist wohl die bekannteste Darstellungsform zur Klassifizierung und Auswertung von Grundwässern bzw. deren Hydrochemie. Anhand der Darstellung in einer gekoppelten Dreiecks- und Rhombendarstellung können Wasserproben typisiert und verglichen werden. Zusätzlich sind aus der Sortierung der Datenpunkte in den Teildiagrammen Entwicklungstrends ableitbar. Zur Darstellung der Anionen und Kationen müssen die Gehalte der Probe in Äquivalentkonzentrationen umgerechnet werden. Der Vorteil des PIPER-Diagramms liegt in der Möglichkeit der gleichzeitigen Darstellung sehr vieler Analysen.

Die Typisierung kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. So nutzen FURTAK & LANGGUTH (1967) den Lösungsinhalt, der jedoch wenig sinnvolle Aussagen zur Schutzzonenausgrenzung beisteuert. In Anlehnung an LÖFFLER & MEINERT (2011) kann eine Typisierung anhand der Herkunftsräume erfolgen. LÖFFLER legte 1972 eine hydrochemische Typisierung für den norddeutschen Lockergesteinsraum vor, die auch im Bereich der sächsischen Quellgebiete angewandt werden kann. Somit können anhand der hydrochemischen Daten Aussagen zum Grundwasseralter und der Grundwassergeschütztheit gewonnen werden.

LÖFFLER klassifizierte die Wässer unter Beachtung des Härtequotienten (nach WANDT [1960] und ROTHER [1966]) sowie des Magnesiumoxid-Calciumoxid-Verhältnisses (nach SCHLINKER 1964, 1969). Abbildung 7 zeigt die hydrochemische Typisierung nach LÖFFLER & MEINERT (2011).

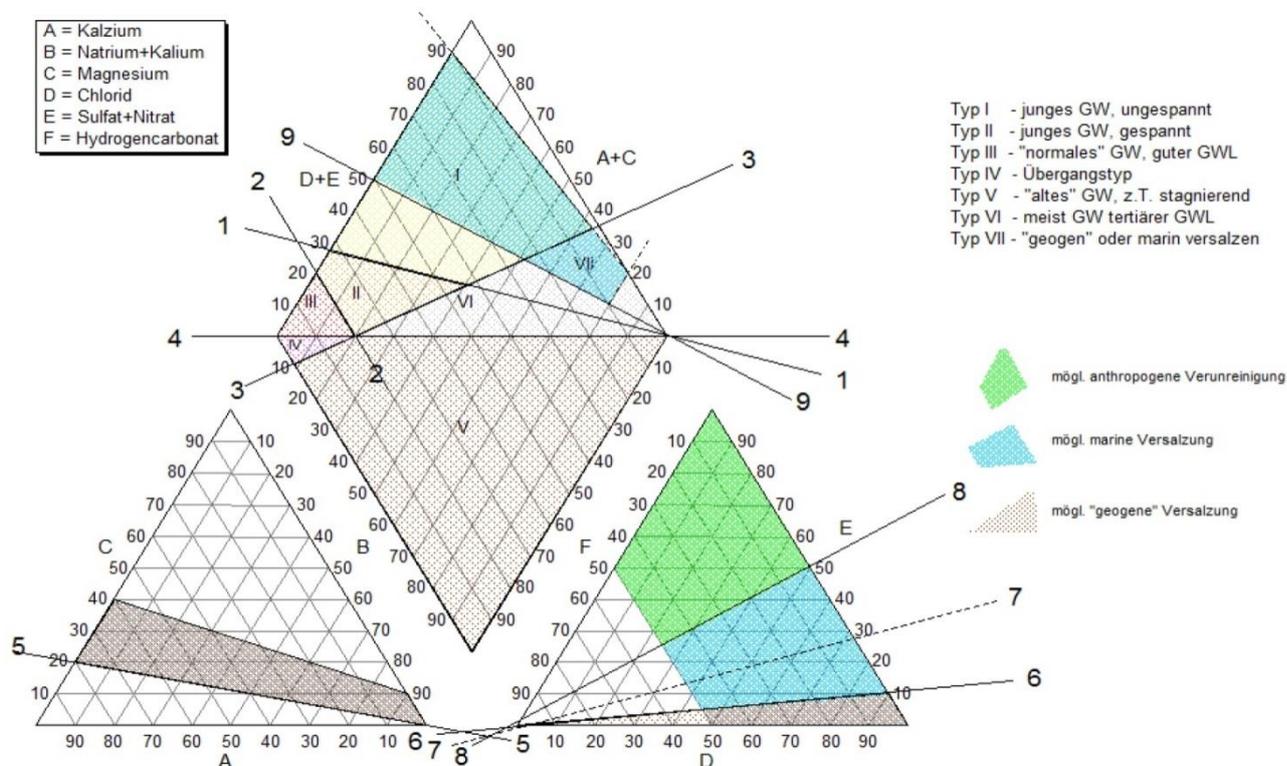


Abbildung 7: Typisierung des Grundwassers nach LÖFFLER & MEINERT (2011)

Dabei sind die Grundwassertypen (I bis VII) und bezifferten Trennlinien (1 bis 9) nach LÖFFLER wie folgt zu interpretieren:

- Grundwassertyp I: luftbedecktes, ungespanntes, junges Grundwasser, d. h. es ist noch der unmittelbare Einfluss der Neubildung (Versickerung, Uferfiltrat, Infiltrat) zu erkennen
- Grundwassertyp II: zum großen Teil gespanntes, jedoch noch relativ junges Grundwasser, d. h. Übergangstyp zwischen luftbedeckten und älteren gespannten Grundwasser (oft an der Basis relativ mächtiger unbedeckter Grundwasserleiter zu finden, die von schluffigen Horizonten durchzogen werden)
- Grundwassertyp III: normal gespanntes Grundwasser; es sind noch der Einfluss der Neubildung und gute Durchflussverhältnisse erkennbar, jedoch ist das Wasser schon relativ lange im Boden
- Grundwassertyp IV: Übergangstyp von Typ II zu Typ V
- Grundwassertyp V: „sehr“ altes Grundwasser, d. h. Grundwasser, das durch einen zeitlich sehr langen Fließweg, durch Abflussbehinderung, Stagnation oder durch den Einfluss von „geogenen“ Tiefenwasser gekennzeichnet ist. Diese Wässer besitzen grundsätzlich unterschiedliche  $\text{NaHCO}_3$ -Gehalte.
- Grundwassertyp VI: undefinierter Bereich, der aber meist von Analysen aus tertiären Grundwasserleitern belegt wird
- Grundwassertyp VII: „geogen“ oder marin versalzene Wasser
  - Linie 1: Linie des Härtequotienten  $Hq = 2,8$  (nach WANDT liegt oberhalb der Linie das luftbedeckte und unterhalb das gespannte Grundwasser),
  - Linie 2: nach WANDT liegt unterhalb (links) der Linie das gespannte Grundwasser und oberhalb (rechts) der Übergangstyp von luftbedeckt zu gespannt,
  - Linie 3: nach WANDT liegen oberhalb der Linie die Analysen des „normalen“ Grundwassers,
  - Linie 4: unterhalb dieser Linie besitzt das Grundwasser stets  $\text{NaHCO}_3$ -Gehalt,
  - Linie 5: Linie der  $\text{MgO}/\text{CaO}$ -Relation von 0,2 (nach SCHLINKER weist  $\text{MgO}/\text{CaO} \geq 0,2$  auf den Einfluss „geogener“ Tiefenwässer, d. h. oberhalb der Linie ist mit Versalzungsgefahr zu rechnen),
  - Linie 6: Linie  $\text{Cl} : \text{SO}_4 = 1 : 0,1$  (nach ROTHER weist  $\text{SO}_4/\text{Cl} \geq 0,1$  auf marine und  $< 0,1$  auf „geogene“ Versalzungstendenzen. Gleiche Bedeutung wie Linie 7),
  - Linie 7: Linie  $\text{Cl} : \text{SO}_4 = 1 : 0,4$  (nach SCHLINKER weist  $\text{SO}_4/\text{Cl} \geq 0,4$  auf marine und  $< 0,1$  auf „geogene“ Versalzungstendenzen. Gleiche Bedeutung wie Linie 6),
  - Linie 8: Linie  $\text{Cl} : \text{SO}_4 = 1 : 1,04$  (nach SCHLINKER ist bei  $\text{SO}_4/\text{Cl} \geq 1,0$  mit anthropogener Verunreinigung, d. h. also oberhalb der Linie 8, zu rechnen),
  - Linie 9: Linie des Härtequotienten  $Hq = 1,0$  (nach ROTHER ist oberhalb dieser Linie mit marinem Einfluss zu rechnen).

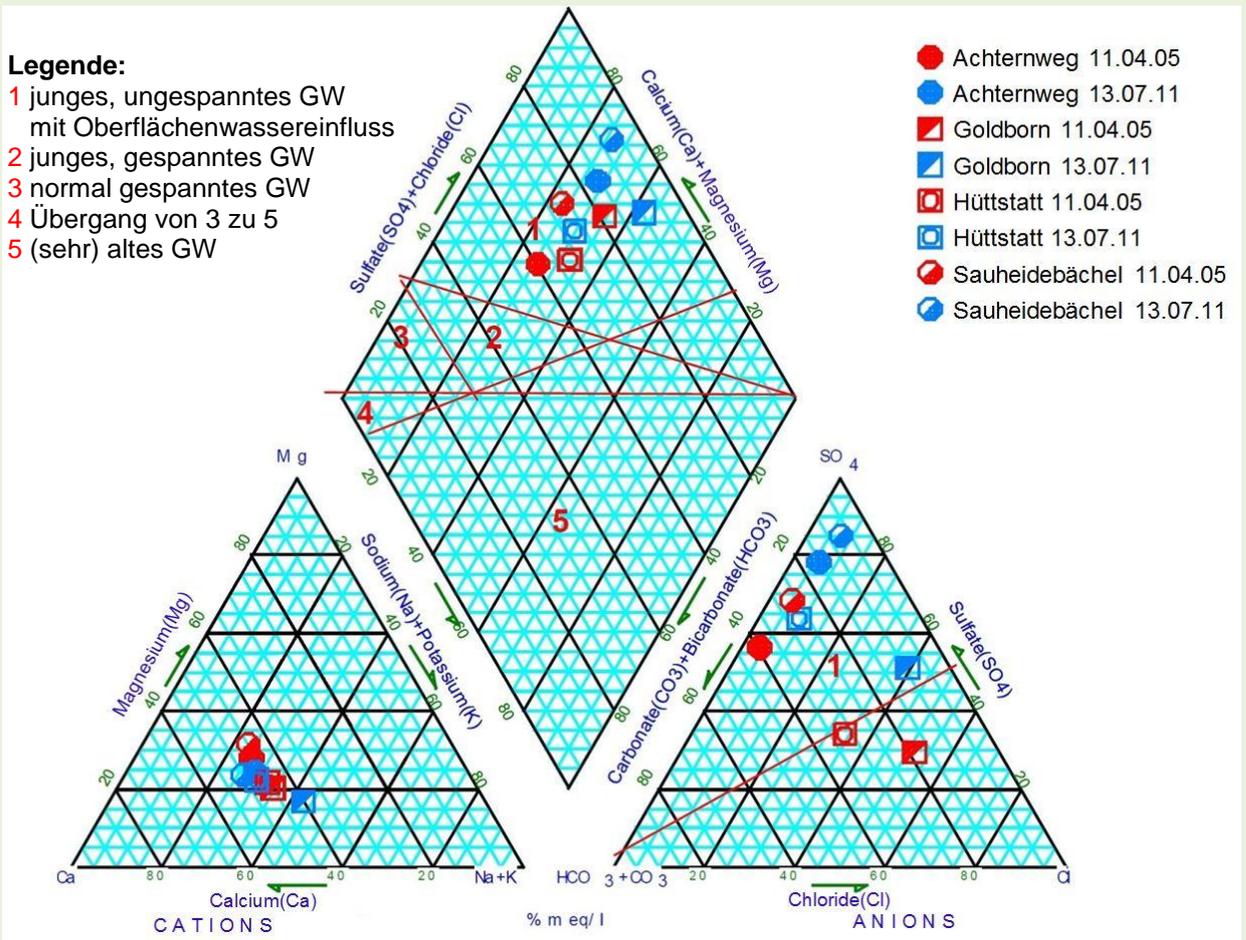
Für die Einordnung von Sickerleitungsquellgebieten in Sachsen können einige Vereinfachungen getroffen werden, weil z. B. mit keiner marinen Versalzung zu rechnen ist. Weiterhin lassen sich anhand der Darstellung im PIPER-Diagramm je nach Probennahmedichte und Analyseergebnissen weitere Aussagen ableiten:

- Vergleich der Zusammensetzung von Oberflächen- und Grundwasserproben möglich → Rückschluss auf die mögliche Beeinflussung durch Uferfiltrat bzw. infiltrierendes Oberflächenwasser
- Vergleich von verschiedenen Teil-Einzugsgebieten möglich

- Rückschlüsse auf die Grundwasserherkunft bzw. das Grundwasseralter
- Vergleich mit Referenzanalysen für bekannte typische Verhältnisse möglich
- zeitliche oder saisonale Veränderungen werden bei ausreichender Probennahmedichte deutlich
- sind keine Veränderungen oder Abweichungen sichtbar, so werden konstante Wasserqualitätsverhältnisse angezeigt

Die vereinfachte Darstellung und Grundwassertypisierung ist im folgenden Beispiel aufgeführt.

### Praxisbeispiel QG Hüttstatt Sauheidebächel, Goldborn, Achternweg (G.E.O.S. 2013)



Die Darstellung der Analysen (2005 und 2011) im PIPER-Diagramm unter Verwendung einer vereinfachten Typisierung nach LÖFFLER (1972) belegt eine genetische Zuordnung des Quellwassers als junges, ungespanntes Wasser. Das entspricht den natürlichen Voraussetzungen.

Der hohe Anteil an Sulfat bei den Anionen (z. T. > 70 %) ist ebenfalls ein Indiz für die sehr oberflächennahen Wasservorkommen mit geringer Verweildauer.

### 5.3.3 Auswertung mittels STIFF-Diagramm

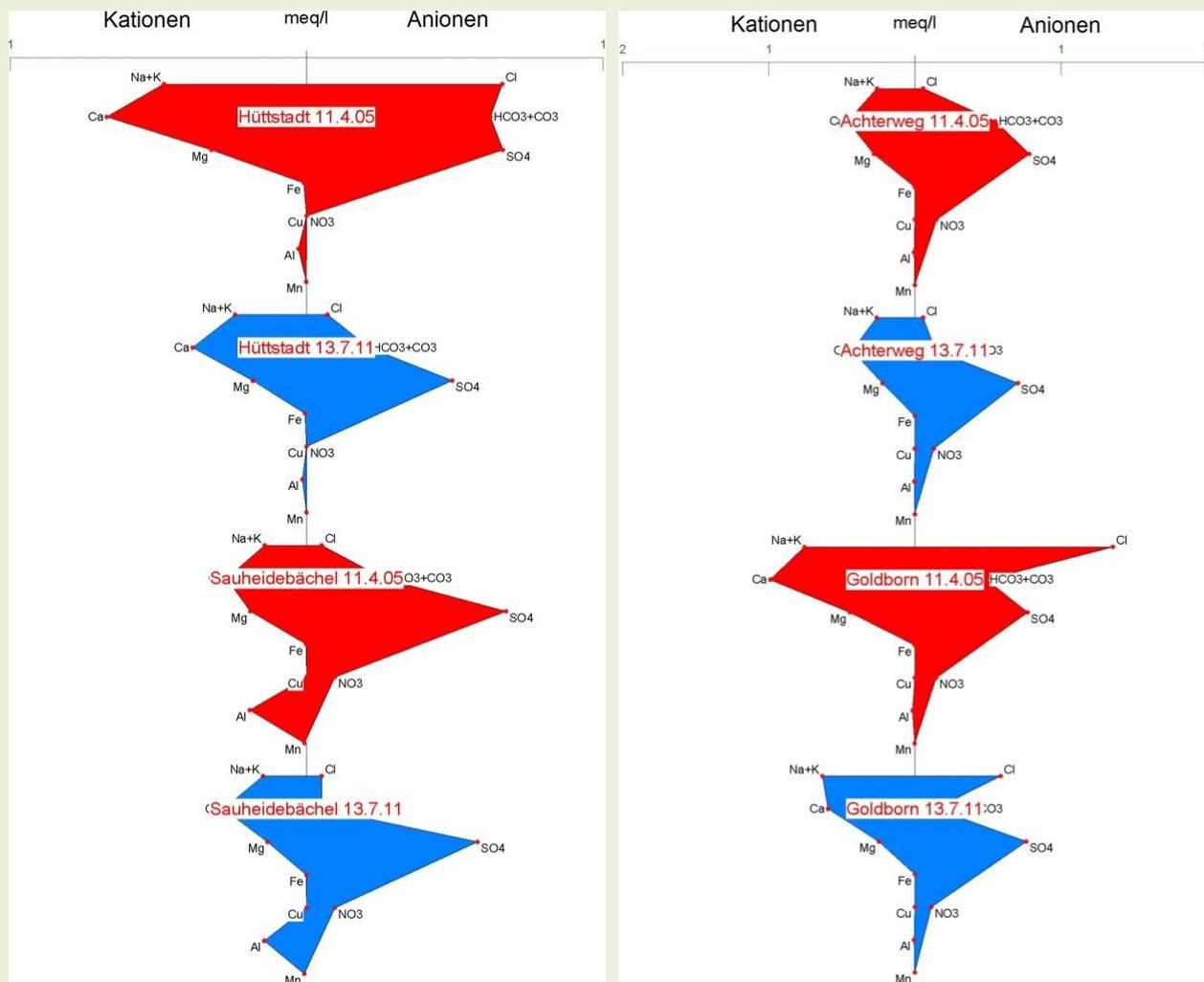
Eine weiteres Instrument zur Auswertung von hydrochemischen Daten stellt das STIFF-Diagramm dar. Die Auswertung beruht auf der Gegenüberstellung von Einzeldarstellungen verschiedener Wasseranalysen. Dabei werden Anionen und Kationen in mmol(eq)/l getrennt voneinander dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der sich aufspannenden charakteristischen Formen (durch Verbindung der Endpunkte der Analysenwerte) sollte eine identische Achseneinteilung gewählt werden. Verschiedene Wassertypen können anschließend anhand ihrer charakteristischen Formen identifiziert werden. Die Größe und Form der STIFF-Figur verdeutlicht somit einem Blick Gemeinsamkeiten und Unterschiede im genetischen Ursprung von Wässern.

Aufgrund einer natürlicherweise gemeinsamen Genese der Alkaliionen Natrium und Kalium können diese wie auch Eisen und Mangan sowie Nitrat und Phosphat in Summe dargestellt werden. Des Weiteren sollte die Gegenüberstellung der Kationen- und Anionenseite über logische Ionenpaare erfolgen.

Folgende Tendenzen lassen sich anhand des Vergleichs mehrerer STIFF-Diagramme verschiedener Probenahmezeitpunkt oder Probenahmeorte ableiten:

- mit nahezu gleicher STIFF-Figur zeigt sich ein gleicher hydrochemische Charakter der Probe
- der Größenvergleich lässt Rückschlüsse zur Gesamtmineralisation zu (größere Figur = höhere Gesamtmineralisation; kleinere Figur = geringere Gesamtmineralisation)
- dominierende Ionengruppen werden sichtbar, ggf. ein möglicher anthropogener Einfluss ableitbar
- Einflüsse von angrenzendem Oberflächenwasser erkennbar (günstig ist Vergleichsprobe des Oberflächenwassers)
- Einflüsse von höher mineralisierten Störungszonen erkennbar
- Stabilität oder Variabilität des Wasserchemismus mit der Zeit erkennbar (bei Proben aus verschiedenen Analysenjahren)

## Praxisbeispiel QG Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn, Achterweg (G.E.O.S. 2013)



Die Veränderungen in der Chemie der verschiedenen Quellgebiete sind sehr gut aus den STIFF-Diagrammen der Jahre 2005 und 2011 ableitbar. Das äußert sich in unterschiedlichen Flächenfiguren wie für das QG Hüttstatt (2011 geringere Gehalte der dargestellten An- und Kationen als 2005) und Goldborn (2011 niedrigere Konzentrationen für Cl, Na und K als 2005) zu ersehen ist. Betrachtet man allerdings die Einzelkonzentrationen, sind die Unterschiede dennoch gering. Sie befinden sich in den typischen Schwankungsbreiten für oberflächennahes Grundwasser. Die etwas höheren Chloridgehalte im QG Goldborn während der Beprobung 2005 könnten durch die Ausbringung von Streusalzen auf der Staatsstraße S 217 in den zurückliegenden Wintermonaten verursacht worden sein.

## 5.4 Tracerhydrologische Methoden

### 5.4.1 Allgemeine Hinweise

Die tracerhydrologischen Methoden sind sehr zeit- und kostenaufwendig, weshalb deren Einsatz bzw. Nutzen vorher genau abgewogen werden sollte (siehe Kapitel 4.4.3). Aus diesem Grund werden nachfolgend nur prinzipielle Hinweise zur Markierungsmethodik in Quellgebieten gegeben.

Für die Ausbreitung von idealen Tracern sind folgende Prozesse bei der Auswertung zu beachten:

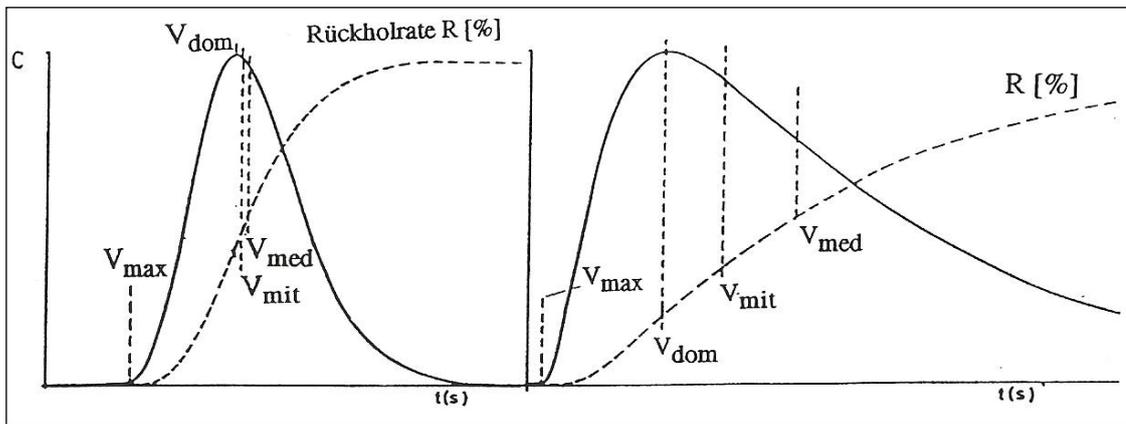
- **Advektion:** Transport des Tracers mit dem Wasser entsprechend dessen Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit (mittlere Abstandsgeschwindigkeit)
- **Makrodispersion:** beschreibt ein Vorausschleichen der Tracerfront in besser durchlässigen und daher schneller durchströmten Einzelschichten (KINZELBACH & RAUSCH 1995); findet nur mit der Strömung statt, durch lokale Abweichungen von der mittleren Grundwasserströmungsgeschwindigkeit,
- **Diffusion:** Bewegung des Tracers durch Molekularbewegung im Wasser; Ausgleich des Konzentrationsgradienten
- **Zwischenspeicherung** in ungesättigter Zone oder ungesättigten Randbereichen und gering durchlässigen Schichten (Retardationsfaktor)

Die Auswertung der gemessenen Tracerkonzentrationen erfolgt grafisch und/oder über computergestützte Stofftransportmodelle z. T. unter Beachtung ggf. ablaufender Stoff- oder Zerfallsreaktionen mit dem vorwiegenden Ziel, die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zu ermitteln. Weiterhin ist es möglich, vorhandene hydrologische Verbindungen oder „Kurzschlüsse“, z. B. zwischen nicht bekannten Sickerleitungen, Fließgewässern oder Feuchtfächen und der Eingabestelle festzustellen.

### 5.4.2 Auswertung und Interpretation von Tracerversuchen

Die Beschreibung des Fließweges erfolgt über den zeitlichen Konzentrationsverlauf am Beprobungsort. Voraussetzung für eine Erfassung der Tracerdurchgangskurve ist eine ausreichende Beprobungs- bzw. Messdichte. Praktisch ist das vorzugsweise über automatisierte Probenahmegeräte zu gewährleisten. Die Ganglinie der Tracerkonzentration ist Grundlage für die Ermittlung der tracerhydrologischen Kennwerte. Diese Kennwerte werden entweder direkt aus der Ganglinie bestimmt oder indirekt von ihr abgeleitet. Die direkt aus der Tracerdurchgangskurve ermittelbaren Kennwerte sind in Abbildung 8 dargestellt und nachfolgend zusammengefasst:

- maximale Abstandsgeschwindigkeit  $v_{max}$  zum Zeitpunkt des ersten Tracernachweises
- dominierende Abstandsgeschwindigkeit  $v_{dom}$  beim Konzentrationsmaximum
- mediane Abstandsgeschwindigkeit  $v_{med}$  nach 50 %-Tracerdurchgang
- mittlere Abstandsgeschwindigkeit  $v_{mit}$
- Longitudinale Dispersion  $D_L$  als Maß für die Geschwindigkeitsverteilung
- Dispersivität als Quotient von Dispersion und mittlerer Abstandsgeschwindigkeit
- Rückholrate  $R$  oder Wiederfindungsrate  $W$  gilt als Maß für den Erfolg des Tracerversuches



**Abbildung 8: Durchgang – Tracerhydrologische Kennwerte, Konzentrationsdurchgangskurven mit unterschiedlichen Dispersionskoeffizienten  $D_L$  (verändert nach Käss 2004)**

Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit wird auf der Grundlage der Tracerdurchgangskurve mittels spezieller mathematischer Modelle berechnet. Die Verfahren dazu sind in der Fachliteratur dargestellt, die methodischen Randbedingungen für die jeweilige Versuchsauswertung müssen dabei unbedingt beachtet werden. Die dominierende Abstandsgeschwindigkeit ist meist größer als die mittlere Abstandsgeschwindigkeit und kann direkt aus dem Konzentrationsverlauf abgelesen werden. Ihre Bestimmung ist deshalb einfacher und weniger von Versuchsbedingungen und Auswertemethoden beeinflussbar.

#### 5.4.3 Besonderheiten bei Sickerleitungsquellen

Die „tatsächliche“ Abstandsgeschwindigkeit liegt je nach Versuchsaufbau im Bereich zwischen mittlerer und dominierender Abstandsgeschwindigkeit:

- Das DVGW-Regelwerk W 101 (2006) gibt keine konkreten Vorgaben zur Auswahl der Abstandsgeschwindigkeiten für die weitere Auswertung. Zur Berechnung der 50-Tage-Linie wird meist die mittlere Abstandsgeschwindigkeit verwendet, sie ist am besten mit den Ergebnissen anderer geohydraulischer Methoden vergleichbar (BOLSENKOTTER et al. 1984; Geologisches Landesamt Baden-Württemberg 1989).
- Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit sollte verwendet werden, wenn auf der Grundlage von relativ kurzen Versuchsstrecken unter der Annahme der DARCY-Gleichung Isochronen berechnet werden. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit entspricht dem Quotienten aus Filtergeschwindigkeit und nutzbarem Porenvolumen.
- Die dominierende Abstandsgeschwindigkeit sollte verwendet werden, um bekannte Konfliktpunkte hinsichtlich ihrer Wirkungsgeschwindigkeit auf die Wasserfassung zu beurteilen.
- Bei Einspeisungen von Oberflächengewässern in den Grundwasserleiter im Bereich der bereits vorher bestimmten 50-Tage-Linie sollte in Quellgebieten mit geringer Grundwasserüberdeckung die dominierende Abstandsgeschwindigkeit ausschlaggebend sein. Wenn eine zumindest mittlere Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung angenommen werden kann, ist auch die mittlere Abstandsgeschwindigkeit ausreichend.
- Bei Durchgangskurven mit mehreren Peaks sollte die erste Teilkurve ausgewertet werden, weil sie dem schnellsten Fließweg entspricht (worst case).

## 5.5 Isotopenmethoden

### 5.5.1 Allgemeine Hinweise

Für Isotopenmethoden können im Vergleich zu anderen Methoden folgende Vor- und Nachteile festgehalten werden:

- Vorteile:
- flächenhafte, kontinuierliche Markierung über den Niederschlag
  - große Skalen in Raum und Zeit möglich
  - geeignet für Einzugsgebietsuntersuchungen
- Nachteile:
- räumlich-zeitliche Variabilität des Inputs und im System nur schwer erfassbar
  - Inputsignal oft relativ schwach
  - hoher Zeit- und Kostenaufwand
- Anwendungsbeispiele:
- Abflusskomponententrennung mit Ganglinienseparation
  - Bestimmung von Verweilzeiten und Jungwasseranteilen
  - Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate
  - Interaktion Oberflächen/Grundwasser
  - Bestimmung von Anteilen fluviogener, limnogener und technogener Wässer im Grundwasser

### 5.5.2 Auswertung und Interpretation radioaktiver Isotope ( $^3\text{H}$ , $^3\text{He}$ , $^{85}\text{Kr}$ )

Die Auswertung erfolgt typischerweise über Boxmodelle, die die komplexen hydrogeologischen Eigenschaften des Stofftransports im Grundwasserleitersystem anhand einer Übertragungsfunktion beschreiben. Demnach besteht ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Konzentration und einer zeitlich zurückliegenden Infiltration zum Anfangszeitpunkt.

In der Isotopenhydrogeologie werden für die Übertragungsfunktion einfache analytische Modellfunktionen benutzt, deren Parameter die wichtigen Eigenschaften des untersuchten Systems zusammenfassen. Für sächsische Sickerleitungsquellgebiete sind vor allem das Exponential-Modell (auch in Kombination mit dem Pistonflow-Modell) und das Dispersionsmodell geeignet. Die Auswertung und Kopplung von Modellen kann mit Hilfe von rechnergestützten Programmen (bspw. MULTIS nach RICHTER & SZYMCAK 1991) umgesetzt werden.

### 5.5.3 Auswertung und Interpretation von stabilen Isotopen ( $^2\text{H}$ , $^{18}\text{O}$ , $^{15}\text{N}$ )

#### Sauerstoff-18 und Deuterium im Wasser

Für die Auswertung wird die Korrelation des im Grundwasser ermittelten Sauerstoff-18 und Deuteriums in Bezug zu einem Standard (CRAIG-Gerade oder Global Meteoric Water Line [GMWL]) gesetzt.

Allgemein erfolgt die Abweichung bzw. Isotopenfraktionierung des atmosphärischen Niederschlags von diesem Standardwert durch verschiedene Fraktionierungsprozesse während des Entstehungs- oder der Transportprozesse. Sie werden als Isotopieeffekte zusammengefasst und prägen dem neugebildeten Grundwasser eines Einzugsgebietes eine charakteristische Isotopensignatur auf. Isotopieeffekte in Bezug auf Wasser sind die (aufgrund der unterschiedlichen Massen der einzelnen Isotope/Moleküle) differierenden Geschwindigkeiten des Teilchenaustauschs bei physikalischen Vorgängen (z. B. Diffusion) sowie chemische Reaktionen und biologische Prozesse, welche die leichten von den schweren Elementen trennen können. Dabei ist

zu beachten, dass die jahreszeitliche  $\delta D$ -,  $\delta^{18}O$ -Variation im Grundwasser gedämpft und phasenverschoben zu der Variation in den Niederschlägen erfolgt (HEBERT 1985).

Werden anhand längerer Messreihen die Gehalte von stabilen Isotopen im Grundwasser mit den Niederschlagskonzentrationen verglichen, so kann beim Auftreten von größeren Schwankungen im Grundwasser eine schnell abfließende Grundwasserkomponente nachgewiesen werden. In größeren, gut durchmischten Grundwasservorkommen ohne Beteiligung von schnell abfließenden Grundwasserkomponenten treten diese Schwankungen der Gehalte an stabilen Isotopen nicht auf. Eine Beeinflussung des Grundwassers durch infiltrierendes Flusswasser kann ebenfalls nachgewiesen werden, weil Fließgewässer durch ihren direkten Bezug zu Niederschlägen jahreszeitliche Schwankungen im Gehalt der Umweltisotope aufweisen.

### Sauerstoff-18 und Stickstoff-15 am Nitrat

Nitrat im für Trinkwasser genutzten Rohwasser stellt in Mitteleuropa das Qualitätsproblem Nummer eins für die Wasserversorger dar. Aufgrund des spezifischen Aufbaus von Sickerleitungsquellen und deren geringen Grundwassergeschütztheit aufgrund der kurzen Sickerwasserverweilzeiten kommt der Nitratproblematik in Sachsen eine entscheidende Bedeutung zu. Die Entfernung des Nitrats aus dem Rohwasser ist für den Wasserversorger mit entsprechenden Kosten verbunden. Daher sollte das oberste Ziel bei der Schutzgebietsausweisung die Reduzierung des Nitratreintrages über diffuse oder auch punktuelle Quellen sein.

Nitrat gelangt hauptsächlich durch die Düngung von Acker- und Grünlandflächen in den Boden und kann von dort aus aufgrund seiner guten Wasserlöslichkeit schnell in das Grundwasser ausgewaschen werden. Der Eintrag des Nitrats bzw. Stickstoffs in das System erfolgt jedoch nicht nur auf künstlichem Weg durch die Landwirtschaft. Auch über die Einleitung von Abwässern, Niederschlägen oder den Abbau von organischer Streu kann Nitrat bzw. Stickstoff in das Grundwasser gelangen.

Die Analyse der Stickstoff-15- und Sauerstoff-18-Isotopengehalte am Nitrat macht es möglich, die relevanten Nitratquellen sowie mögliche Abbaureaktionen in der gesättigten und ungesättigten Zone zu identifizieren. Grundlage hierfür ist die Ausbildung spezifischer Isotopensignaturen von  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{18}O$  am Nitrat zum einen durch die Herkunft bzw. den Herstellungsprozess des Nitrates (Gülle, Mineraldünger, urbane Abwässer) sowie über die in der ungesättigten und gesättigten Zone ablaufenden Abbauprozesse (Nitrifikation und Denitrifikation). In der Fachliteratur sind u. a. Typfelderdiagramme verfügbar, nach denen qualitativ die Herkunft abgeschätzt werden kann (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5: Typische Stickstoff-15- und Sauerstoff-18-Gehalte des gelösten Nitrats (nach MOTZER 2006)**

Potenzielle Nitratquelle	Gehalt an $\delta^{15}N$ [ ‰ ]	Gehalt an $\delta^{18}O$ [ ‰ ]
Kommerzielle Dünger	- 4 bis + 4	+18 bis +26
Tierische oder menschliche Abfälle/Ausscheidungen	> +10	- 4 bis +12
Niederschlagswasser	- 3	+18 bis +60
Organischer Stickstoff im Boden	+4 bis +9	+ 1 bis - 4

Die Anwendung dieses Verfahrens empfiehlt sich zur Ursachenermittlung (Quelle, Verweilzeit, Mischung) in Einzugsgebieten mit signifikanten Stickstoffeinträgen in das Grundwasser. Allerdings ist diese Methode noch nicht ausreichend wissenschaftlich getestet und sollte deshalb nur nach Einzelfallprüfung durch fachlich versierte Gutachter (Referenzliste anfordern!) angewendet werden.

## 5.6 Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

### 5.6.1 Allgemeine Hinweise

Im Allgemeinen kann angenommen werden, dass die natürliche Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung in Sickerleitungsquellgebieten i. d. R. gering ist. Aufgrund des spezifischen Aufbaus der Schächte und Sickerleitungen in der Festgesteinszersatzzone ist die Mächtigkeit der darüber liegenden Schichten und resultierend die Gesamtschutzfunktion gering.

Dennoch kann es im speziellen Einzugsgebiet Variabilitäten in der Fläche und von Gebiet zu Gebiet Unterschiede geben, die anschließend zur Ausweisung der Schutzzonen, besonders bei Verwendung des Standortzonenkonzeptes, herangezogen werden müssen.

In Sachsen wird vorzugsweise die Bestimmung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach dem Verfahren von HÖLTING et al. (1995) empfohlen. Daneben hat sich die Einschätzung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung mittels Härtequotienten als Alternative für Standorte mit geringer Datenlage etabliert. Ergänzend kann, sofern Quellschüttungsmessungen vorliegen, anhand des Schüttungsquotienten eine erste Abschätzung der Schutzfunktion erfolgen (vgl. Kap. 5.1). Auch Schüttungsverhalten und Verweilzeitanalysen (z. B. Tritiummessungen) und Beschaffenheitsparameter können zur Bewertung der Grundwassergeschützteit herangezogen werden.

### 5.6.2 Berechnung des Härtequotienten

Die Ermittlung des Härtequotienten  $Hq$  zur Einschätzung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung anhand hydrochemischer Daten erfolgt in der Praxis meist nach dem Verfahren von JORDAN et al. (1989). Das Verfahren setzt Nicht-Karbonathärte und Gesamthärte wie folgt in Beziehung:

$$Hq = \frac{NKH}{GH} = \frac{GH - (2,8 * m)}{GH}$$

$Hq$  ... Härtequotient [ - ]

$NKH$  ... Nicht-Karbonathärte [°dH]

$GH$  ... Gesamthärte [°dH]

$m$  ... Säurekapazität bei pH 4,3 [mmol/l]

Die ermittelten Härtequotienten sind anschließend nach dem Bewertungsmaßstab in Tabelle 6 zu interpretieren.

**Tabelle 6: Bewertungsmaßstab für den Härtequotient nach JORDAN et al. (1989)**

Härtequotient	Schutzfunktion
0 – 0,2	sehr gut geschützt
0,2 – 0,4	gut geschützt
0,4 – 0,6	mittel geschützt
0,6 – 0,8	mäßig geschützt
> 0,8	gering bis ungeschützt

Das Verfahren besitzt Überblickscharakter und sollte orientierend in Verbindung mit anderen Verfahren eingesetzt werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Härtequotient die Bedingungen im gesamten Einzugsgebiet als Summe der wirkenden Einflüsse widerspiegelt. In Vergleich dazu wird nach HÖLTING et al. (1995) der vertikale Schutz des Deckgebirges am konkreten Standort bestimmt.

**Praxisbeispiel QG Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn, Achternweg (G.E.O.S. 2013)**

Datum	<i>GH</i>	<i>m</i>	<i>Hq</i>	Interpretation
<b>QG Hüttstatt</b>				
11.04.2005	2,8	0,62	0,38	gut geschützt
09.07.2008	2,1	0,15	0,80	mäßig geschützt
13.07.2011	1,6	0,21	0,63	mäßig geschützt
<b>QG Sauheidebächel</b>				
11.04.2005	1,3	0,26	0,44	mittel geschützt
09.07.2008	1,4	0,04	0,92	ungeschützt
13.07.2011	1,2	0,05	0,88	gering geschützt
<b>QG Goldborn</b>				
11.04.2005	4,0	0,49	0,66	mäßig geschützt
09.07.2008	2,8	0,16	0,84	gering geschützt
13.07.2011	2,4	0,14	0,84	gering geschützt
<b>QG Achternweg</b>				
11.04.2005	2,1	0,55	0,27	gut geschützt
09.07.2008	1,9	0,13	0,81	gering geschützt
13.07.2011	1,8	0,14	0,78	mäßig geschützt

Gemäß dem Bewertungsmaßstab von JORDAN et al. (1989) ist nach den beiden jüngeren Analysen das Grundwasser wenig bis ungeschützt. Diese Bewertung korrespondiert mit den aus den Quellschüttungsmessungen ermittelten Verweilzeiten im Vergleich zu den aus der Analyse von 2005 für die QG Hüttstatt, Sauheidebächel und Achternweg berechneten Härtequotienten. Die Aussagen zur Schutzfunktion sind durch weitere Analysen zu qualifizieren.

Insgesamt ist für die QG von einer im Durchschnitt mäßigen Schutzfunktion auszugehen. Die relativ konstanten Gütebedingungen seit vielen Jahren deuten ebenfalls darauf hin. Gravierende Qualitätseinbrüche hat es lt. Wasserversorger bisher nicht gegeben.

**5.6.3 Berechnung nach HÖLTING**

Die Ermittlung der Schutzfunktion nach dem „Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung“ (HÖLTING 1995) ermittelt die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung für das oberste zusammenhängende, weiträumige Grundwasserstockwerk. Dabei wird der vertikale Schutz des Deckgebirges am konkreten Standort (z. B. Rammkernsondierungspunkt) in Abhängigkeit von den folgenden Parametern bestimmt:

- nutzbare Feldkapazität des Bodens bis 1 m Tiefe (für jeden Bodenhorizont durch bodenphysikalische Messungen ermittelt, anhand der bodenkundlichen Kartieranleitung oder anhand der Leitbodenprofile [BK50] abgeleitet) – *Faktor B*
- Sickerwassermenge anhand der jährlichen Grundwasserneubildungsrate – *Faktor W*
- Gesteinsart (differenziert nach Durchlässigkeit) der tieferen Grundwasserüberdeckung – *Faktor G*
- Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung – *Faktor M*
- *Zuschlag Q* im Falle von schwebenden Grundwasserstockwerken
- *Zuschlag D* für dauerhaft wirksame artesische Druckverhältnisse

Die Bewertung der Schutzfunktion erfolgt mit Hilfe eines Punktbewertungssystems getrennt für den Boden und den tieferen Untergrund. Die Gesamtschutzfunktion  $S_g$  der Grundwasserüberdeckung ergibt sich anschließend über folgendes Verknüpfungsschema:

$$S_g = [B * W] + [(G_1 * M_1 + G_2 * M_2 + \dots G_n * M_n) * W + Q + D]$$

Dabei stellt der erste Teil den Schutzfunktionswert des Bodens  $S_1$  und der zweite Teil den Schutzfunktionswert der Grundwasserüberdeckung (schichtabhängig) unterhalb des Bodens  $S_2$  dar. Im Falle von Sickerleitungsquellgebieten entfallen die Zuschläge für schwebende Grundwasserstockwerke (Zuschlag  $Q = 0$ ) und artesische Druckverhältnisse (Zuschlag  $D = 0$ ). Auf eine eingehendere Erläuterung des Berechnungsverfahrens wird hier verzichtet und stattdessen auf HÖLTING et al. (1995) hingewiesen, wo das Verfahren und die Punktevergabe in Abhängigkeit von den Parametern ausführlich beschrieben wird. Zudem liegt im aufgrund ihrer spezifischen Art und geringen Fassungstiefe von Sickerleitungsquellgebieten sehr häufig a priori eine geringe Grundwassergeschüttheit vor.

Die nach HÖLTING et al. (1995) berechnete Punktzahl wird zur Ermittlung der Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung anschließend in eine der fünf Klassen zwischen sehr gering und sehr hoch eingeteilt (vgl. Tabelle 7). Dabei entsprechen hohe Punktzahlen einer hohen und geringe Punktzahlen einer niedrigen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, wodurch entsprechende Rückschlüsse zur Verweilzeit des Wassers in der Grundwasserüberdeckung getroffen werden können.

**Tabelle 7: Klasseneinteilung nach HÖLTING et al. (1995)**

Gesamtschutzfunktion	Punktzahl der Gesamtschutzfunktion $S_g$	Größenordnung der Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung
sehr hoch	> 4.000	> 25 Jahre
hoch	> 2.000 – 4.000	10 – 25 Jahre
mittel	> 1.000 – 2.000	3 – 10 Jahre
gering	> 500 – 1.000	mehrere Monate bis ca. 3 Jahre
sehr gering	≤ 500	wenige Tage bis etwa 1 Jahr

Vorteil der Berechnung der Schutzfunktion nach HÖLTING et al. (1995) liegt bei Vorlage der nötigen Parameter in der differenzierten Bewertungsmöglichkeit des Standortes bzw. des Einzugsgebietes bei repräsentativ verteilter und größerer Datendichte. Weiterhin ist zu beachten, dass die Methode von HÖLTING et al. (1995) eigentlich mit der Bestrebung der Bewertung der Geschüttheit von mächtigen Grundwasserüberdeckungen

entwickelt wurde. Wie bereits erwähnt, kann bei Sickerleitungsquellen bzw. Einzugsgebieten mit einem geringen Flurabstand i. d. R. von einer geringen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ausgegangen werden.

Neben der expliziten Berechnung für einzelne Aufschluss- oder Sondierungspunkte ist es möglich, großmaßstäbige Informationen zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung der Hydrogeologischen Übersichtskarte (HÜK200) und für Teile von Sachsen (urbane Ballungsräume) etwas feingliederiger der Hydrogeologischen Spezialkarte (HyK50) zu entnehmen. Zu beachten ist, dass sich die Angaben der hydrogeologischen Spezialkarte auf den oberen Grundwasserleiter beziehen und somit keine Aussagen zu möglichen Hanggrundwasserleitern in Quellgebieten vermitteln.

Des Weiteren steht die Methodik im Auswerteprogramm UGWG als Bestandteil des Umweltinformationssystems Sachsen im Fachinformationssystem Hydrogeologie (Programmsystem UHYDRO) auf Anfrage beim LfULG zur Verfügung.

#### 5.6.4 Interpretation von Isotopenergebnissen – Jungwasseranteil

Anhand der Messung des radioaktiven Tritiums können nicht nur Aussagen zur Altersstruktur der Quellwässer gewonnen, sondern auch als Ergänzung zu den anderen genannten Verfahren Aussagen zur Geschützttheit des Grundwassers gemacht werden.

Dabei gilt, dass bei einem hohen ermittelten Jungwasseranteil und somit einer geringen Verweildauer des Grundwassers eine hohe Kontaminationsgefährdung, also eine geringe Geschützttheit des Grundwassers vorliegt. Wird dagegen eine hohe Verweildauer und somit ein kleiner Jungwasseranteil berechnet, kann von einer hohen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ausgegangen werden. Basis dieses Verfahrens ist die Berechnung eines Jungwasseranteils (bis 30 Jahre) bspw. mit dem Exponential-Modell oder einem gekoppelten Exponential-Modell mit Hilfe des Programms MULTIS.

Die Bewertung der Grundwassergeschützttheit gegenüber anthropogenen Einflüssen wurde von JORDAN (1991) wie folgt klassifiziert:

**Tabelle 8: Bewertung der Grundwassergeschützttheit anhand des Jungwasseranteils (JORDAN 1991)**

Geschützteitsklasse	Verbale Einschätzung	Jungwasseranteil [%]
1	sehr gut geschützt	< 5 %
2	gut geschützt	5 bis 20 %
3	mäßig geschützt	20 bis 40 %
4	wenig geschützt	40 bis 60 %
5	ungeschützt	> 60 %

# 6 Methoden zur Schutzzonenbemessung

Gemäß den Erläuterungen in SMUL (2016) und den Ausführungen im DVGW Arbeitsblatt W 101 (2006) werden drei Schutzzonen ausgewiesen. Dabei liegen der größte Aufwand und auch die größte Unsicherheit in der Ausweisung der engeren Schutzzone II, deren äußere Begrenzung im Arbeitsblatt W 101 (2006) als 50-Tage-Linie festgeschrieben ist.

## 6.1 Ausweisung Schutzzone I

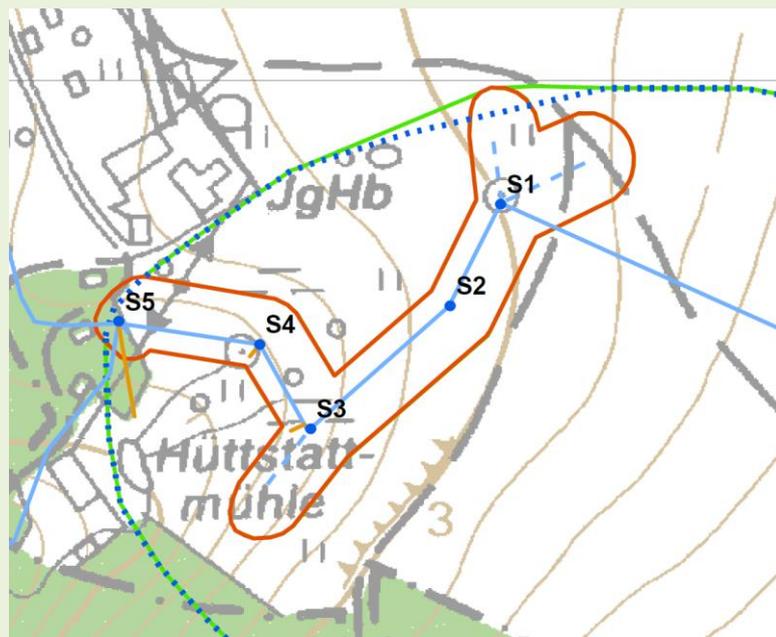
Die Schutzzone I wird anhand der bekannten Lage der Quellschrote, Sickerleitungen und weiterer wasserzuflussrelevanter Ausbauten festgelegt. Die Schutzzone I wird allseitig um die Quellfassungsanlage mit einem Mindestabstand von 10 m ausgewiesen. In Richtung des Grundwasser-/Sickerwasserzustroms beträgt der Abstand 20 m zur Quellfassungsanlage und den Sickerleitungen. Voraussetzung für die korrekte Bemessung der Zone I sind genaue Angaben zur Lokalisation aller Teile der Fassungsanlage einschließlich Sickerleitungen und geschlossenen Verbindungsleitungen bis zum Sammelbrunnen bzw. Wasserwerk.

### Praxisbeispiel QG Hüttstatt (G.E.O.S. 2013)

In der nachfolgenden Abbildung des QG Hüttstatt ist der Verlauf der Schutzzone I um die Sickerleitungen und Quellschächte bis zum Sammelbehälter rot dargestellt. Die Grundwasseranströmung erfolgt im Bereich der Schächte S1 bis S3 aus westlicher Richtung; im Bereich der Schächte S4 und S5 aus nördlicher Richtung. Hellblau dargestellt sind die Sickerleitungen.

### Praxisbeispiel QG Hüttstatt (G.E.O.S. 2013)

In der nachfolgenden Abbildung des QG Hüttstatt ist der Verlauf der Schutzzone I um die Sickerleitungen und Quellschächte bis zum Sammelbehälter rot dargestellt. Die Grundwasseranströmung erfolgt im Bereich der Schächte S1 bis S3 aus westlicher Richtung; im Bereich der Schächte S4 und S5 aus nördlicher Richtung. Hellblau dargestellt sind die Sickerleitungen.



## 6.2 Ausweisung Schutzzone II

Die Bemessung der Schutzzone II erfolgt nach DVGW Arbeitsblatt W 101 (2006) über die Berechnung der 50-Tage-Isochrone. Diese kann anhand verschiedener Verfahren ermittelt bzw. abgeschätzt werden. Für Sickerleitungsquellgebiete eignen sich vor allem die Ermittlung anhand der Rückgangskonstante über das erweiterte MAILLET-Verfahren nach SZYMCZAK (2007) und fallspezifisch Markierungsversuche (Tracerversuche). Neben den oben genannten Verfahren kann die 50-Tage-Isochrone auch mit Hilfe von hydrogeologischen Modellen zum Fließgeschehen simuliert werden. Auf die Abschätzung mit der DARCY-Gleichung sollte verzichtet werden, weil die Unsicherheiten durch das inhomogene Fließgeschehen bei dieser Methode sehr groß sind.

### 6.2.1 Schutzzonenbemessung mittels Markierungsversuchen

Anhand von Tracerversuchen kann die Abstandsgeschwindigkeit zwischen Eingabe- und Entnahmestelle im Quellgebiet bestimmt werden. Die Auswertung von Tracerversuchsergebnissen und die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit sowie die Besonderheiten, die bei Sickerleitungsquellen zu beachten sind, wurden im Kapitel 5.4 vorgestellt. Die Berechnung der 50-Tage-Linie erfolgt abschließend über das Weg-Zeit-Gesetz.

### 6.2.2 Schutzzonenbemessung auf der Grundlage des erweiterten MAILLET-Verfahren nach SZYMCZAK (2007)

Mit vorangegangener Analyse, bspw. der Trockenwetterfalllinie nach MAILLET oder einer kürzeren Trockensituation im Quelleinzugsgebiet und der darüber ermittelten Konstanten (Auslaufkoeffizient, Rückgangskonstante), kann die Isochronenentfernung direkt aus der Zeitkonstante eines Einzugsgebietes ermittelt werden.

Als Voraussetzung für die fachlich richtige Anwendung und Interpretation des erweiterten MAILLET-Verfahrens (SZYMCZAK 2007) müssen in Quellgebieten folgende Annahmen gelten:

- Die Quelfassung wird nicht wesentlich von Grundwasser unterströmt.
- Es gibt keinen Wasserzufluss in das Quellgebiet über die oberirdische Wasserscheide/EZG-Grenze.
- Der Niederschlag fällt relativ gleichmäßig über das Quelleinzugsgebiet verteilt.
- Die Grundwasserneubildungsgeschwindigkeit ist örtlich konstant.

Gelten diese Annahmen, so können die Rezessionslinie und die Niedrigwasserabflüsse als Indikatoren für den unterirdischen Abfluss (Zwischen- und Basisabfluss) eines Quellgebietes betrachtet werden.

Anhand der ermittelten Rückgangskonstanten, z. B. über die Gleichung vom MAILLET (Anlage 4b) oder aus dem Wasserhaushaltsportal Sachsen, kann die Entfernung der 50-Tage-Isochrone aus folgender Gleichung ermittelt werden:

$$x = R * \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_m}}\right) * [m]$$

$x$  ... Entfernung des Wasserteilchens von der Fassung ( $t$ -Tages-Isochrone) [m]

$R$  ... Entfernung zur oberirdischen Einzugsgebietsgrenze von der Fassungsanlage [m]

$t$  ... vorgegebene Isochronenzeit (hier: 50 Tage)

$\tau_m$  ... mittlere Verweilzeit des Wasserteilchens eines Strömungsfeldes, entspricht der ermittelten Rückgangskonstante [d]

Grundlage dieser Gleichung ist die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit nach dem Modell der stationären Grundwasserströmung in einem Graben („Grabenanströmung“) nach BUSCH et al. (1993) aus der Differenz zwischen der maximalen Entfernung von der Quelle bis zur oberirdischen Einzugsgebietsgrenze und der Entfernung des Berechnungspunktes von der Quelle

■ exponentielle Verteilung der Abstandsgeschwindigkeit,

■ Abhängigkeit der Abstandsgeschwindigkeit von der Entfernung (Fließweg des Wasserteilchens).

- ⇒ Bei Feldversuchen hat sich gezeigt, dass die nach dem erweiterten MAILLET-Verfahren berechneten Abstandsgeschwindigkeiten tatsächlich Werte aufweisen, die der dominierenden Abstandsgeschwindigkeit im Tracertest näherungsweise entsprechen (ARGE Isotopenuntersuchungen 2010).
- ⇒ Die Berechnungen der Abstandsgeschwindigkeit und Entfernung der Isochronen von einer Sickerleitung ist nicht an ein spezielles Verfahren zur Ganglinienauswertung gebunden. Sofern die regionalisierten Daten aus dem Wasserhaushaltsportal Sachsen wegen der Kleinräumigkeit des Einzugsgebietes keine Anwendung finden können, ist das erweiterte MAILLET-Verfahren (nach SZYMCZAK 2007) eine der einfachsten Möglichkeiten.

Die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  berechnet sich nach dem Modell der stationären Grundwasserströmung in einem Graben nach BUSCH et al. (1993) aus der Differenz zwischen der maximalen Entfernung  $R$  von der Quelle bis zur Einzugsgebietsgrenze und der Entfernung  $x$  des Berechnungspunktes von der Quelle geteilt durch die Rückgangskonstante  $K$  (LfULG 2009):

$$v_a(x) = \frac{(R - x)}{K} \left[ \frac{m}{d} \right]$$

Für  $v_a$  gilt gleichermaßen das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz einer gleichförmigen linearen Bewegung:

$$v_a = \frac{dx}{dt}$$

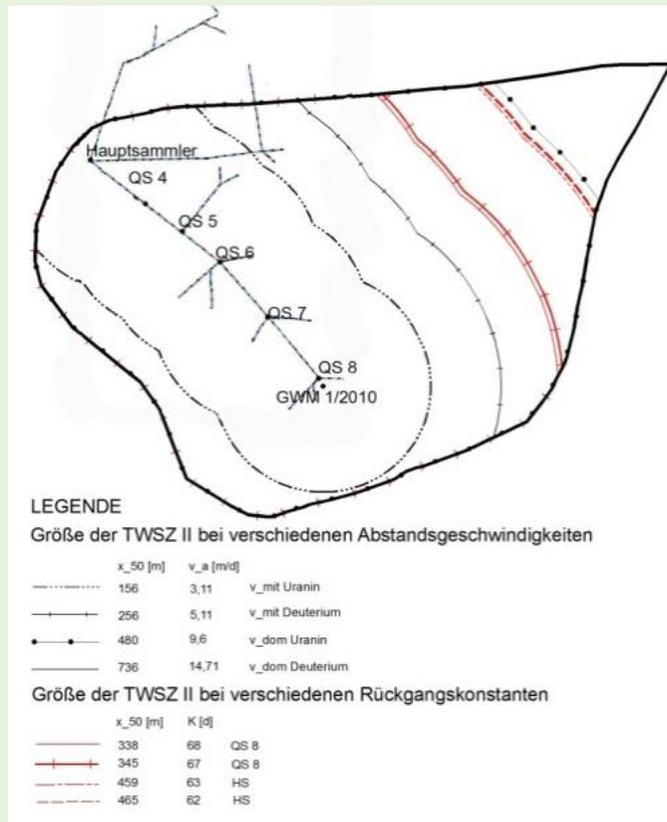
Mittels Integration über die Fließstrecke  $x$  kann die Fließzeit  $t$  berechnet werden, die ein Wassermolekül benötigt, um von der Eintragsstelle bis zum Quellschrot zu gelangen.

$$t = \int_0^x \frac{1}{v_a(x)} dx$$

Nach Auflösen des Integrals und Einsetzen von Gleichung (6) für  $v_a$  ergibt sich:

$$t = K * \ln\left(\frac{R}{R - x}\right)$$

Zu beachten ist, dass auf Grund der Berechnungsgleichung die Schutzzone II nie an die Grenze des (oberirdischen) Einzugsgebietes gelangen kann. Die Herleitung der Methodik nach SZYMCZAK (2007) ist in der Anlage 4a aufgeführt.



### Praxisbeispiel QG Markert (Arge Isotopenuntersuchungen 2011b)

- Trockenperiode vom 30.03. bis 01.06.2010
- Auswertung der Ganglinien anhand des Einzellinear-speichermodells (s. Auswertung Schüttungslinie, bei Trockenwetterlinie nach MAILLET)
- Schutzzonen mittels Verfahren nach SZYMCZAK (2007) und aus Tracergeschwindigkeiten bestimmt

förmliche Ausdehnung der TWSZ II bei Verwendung von unterschiedlichen Abstandsgeschwindigkeiten (unmaßstäblich)

### 6.2.3 Geohydraulische Berechnungsverfahren

Die geohydraulische Berechnung der 50-Tages-Isochrone, wie sie bei der Bemessung von Schutzzonen für Brunnen häufig durchgeführt wird, ist bei Sickerleitungsquellen vor allem in der Verwitterungs- und Zersatzzone des Festgesteins sehr häufig mit enormen Schwierigkeiten und großen Fehlermöglichkeiten belastet.

### 6.2.4 Hydrogeologische Modellierung

Grundsätzlich ist nach der Beschreibung des Geohydrologischen Modells und der Beschreibung des im Einzugsgebiet vorhandenen Gefährdungspotenzials zu prüfen, welche Art von Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Schutzzone II anzuwenden ist.

Die Anwendung von numerischen Grundwassermodellen ist ein gutes Mittel, um komplexe Gebiete zu charakterisieren. Voraussetzung ist hier ein ausgebildeter Grundwasserleiter, der gleichzeitig durch ausreichende Kenndaten- und Messdatendichte gut beschrieben werden kann. Der mit der Modellierung verbundene Aufwand lohnt sich nur, wenn im Gebiet auch komplexe Gefährdungspotenziale zu beurteilen sind. In der Regel werden die genannten Voraussetzungen in einem Einzugsgebiet einer Sickerleitungsquelle nicht gegeben sein.

Mit geringerem Arbeitsaufwand können deshalb vereinfachte Berechnungsverfahren gleichwertige und bessere Ergebnisse liefern.

### 6.2.5 Standortzonenkonzept

Das Standortzonenkonzept soll dann Anwendung finden, wenn die Bestimmung einer ausreichend genauen 50-Tageslinie mit vertretbarem Versuchsaufwand nicht möglich ist.

Grundlage des Standortzonenkonzeptes ist die Bestimmung der Bemessungslinie bzw. -fläche anhand einer der Schutzfunktion äquivalenten Fläche resultierend aus den spezifischen Gebietseigenschaften. Hydrologisch bedeutet dies, dass die Herkunftsräume des Zwischenabflusses und der Basisabflusskomponenten mit Verweilzeiten von bis zu 50 Tagen zur Fassungsanlage mit ausreichender Genauigkeit abgedeckt werden müssen. Das Standortzonenkonzept beruht auf einer alternativen Betrachtungsweise anhand konkreter Gebietseigenschaften. Zur Definition der einzelnen Zonentypen kann auf die Kriterien des Arbeitsblattes W 101 (DVGW 2006) für karstähnliche Kluftgrundwasserleiter zurückgegriffen werden, wobei eine erweiternde Ausrichtung für sächsische Quellgebiete notwendig ist. Somit geht der Anwendung des Standortzonenkonzeptes eine präzise Analyse der naturräumlichen Gebietsverhältnisse, der Aufbau eines hydrogeologischen Modells zur Charakterisierung des Abflussgeschehens sowie eine **Konfliktpotenzialanalyse und -prüfung** voraus.

Im Falle von Sickerleitungsquellen kann nach der hydrogeologischen Bewertung der Herkunftsräume und der Zuordnung der Gebietseigenschaften unter Zugrundelegung einer (meist) geringen Gesamtschutzfunktion der Grundwasserüberdeckung sowie der geologischen und tektonischen Verhältnisse die Trinkwasserschutzzone II stellenweise bis an die Grenzen des oberirdischen Einzugsgebietes heranreichen. Im Einzelfall kann die Schutzzone II auch über die oberirdische Wasserscheide hinausreichen, weil durch z. B. altbergbauliche Anlagen wie Steinbruch, ehemaliges Bergbaugelände ein Zustrom von außerhalb des oberirdischen Einzugsgebietes erfolgen kann.

Zu den typischen Standortzonen zur Integration in die engere Schutzzone gehören, in Anlehnung an Karstgrundwasserleiter und vergleichbare Kluftgrundwasserleiter mit sehr geringen Abstandsgeschwindigkeiten (W 101, DVGW 2006), folgende:

- zur Quelfassung hin steil einfallende Hänge und dorthin führende Trockentäler
- im Fassungsbereich infiltrierende Fließgewässer
- in der Umgebung des Fassungsbereiches versickernde Fließ- und Standgewässer
- oberflächennahe Zerrüttungszonen
- fassungsnahe Kuppenbereiche mit geringer Bodenmächtigkeit bzw. Grundwasserüberdeckung
- tektonische Störungen mit erhöhter Wasserwegsamkeit und/oder über die oberirdische Einzugsgebietsgrenze hinwegreichende Wasserwegsamkeiten
- Flächen mit erhöhter Grundwasserneubildung
- Flächen mit geringer Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung nach HÖLTING et al. (1995)
- abflussbildende Feuchtfelder
- Beeinträchtigungen der Grundwasserüberdeckung, z. B. Steinbrüche, Kies- oder Sandabbau (oberflächennaher Bergbau)
- sonstige meist anthropogen verursachte Störungen im Bodenbereich, z. B. Leitungen, landwirtschaftliche Drainagen oder im Bereich der Grundwasserüberdeckung

Die Integration der Fläche eines Standortzonentypes in die engere Schutzzone II hängt zudem von der hydrogeologischen/hydrologischen Verbindung mit der Quellschüttung ab. Wesentliche Faktoren für eine Einbeziehung in die TWSZ II können sein:

- geringe Entfernung zum Rand der Fassungsanlage
- unregelmäßiger Verlauf der Quellschüttungsmessung
- hohe Hauptwerte der Quellschüttung
- hoher Anteil schneller Abflusskomponenten (Zwischenabfluss, schneller Basisabfluss)
- schneller Zutritt von Niederschlagswasser
- Hinweise aus der Wasserbeschaffenheit (z. B. hohe bzw. deutlich schwankende Nitratgehalte)

### Anwendung des Standortzonenkonzeptes

Weil die Anwendung des Standortzonenkonzeptes nicht pauschalisiert werden kann und somit immer von dem Untersuchungsgebiet und dessen spezifischen Standortfaktoren abhängt, erfolgt eine beispielhafte Erläuterung von möglichen Flächen, bei denen geprüft werden muss, ob sie z. B. aufgrund von kurzen Fließzeiten in die Schutzzone II zusätzlich integriert werden müssen:

- Flächen mit einer Hangneigung ab 5 % und größer mit Einfallrichtung zur Fassungsanlage
- Herkunftsräume mit hohen Anteilen schneller Abflusskomponenten während Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelze
- Kuppenbereiche mit geringen Bodenmächtigkeiten, sofern diese fassungsnah liegen und zur Grundwasserneubildung beitragen
- Störungssysteme und Erzgangstrukturen mit erhöhter Wasserführung
- Stollensysteme des Altbergbaus mit erhöhter Wasserführung
- Zuflüsse von Fließgewässern (Infiltration von Oberflächenwasser)
- ungedichtete Teiche als potenzielle Versickerungsflächen (abflussbildende Feuchtfächen)
- Vernässungsbereiche, Feuchtfächen oder temporär abflussbildende Quellaustritte
- Feld- und Waldwege mit schnellem Oberflächenabfluss durch Verdichtung der Oberfläche und Ausbildung von Fahrspuren
- Bereiche mit intensiver Nutzung (z. B. Landwirtschaft, Siedlung)

Die Herangehensweise zur Bemessung der Schutzzone II wird in Abbildung 9 verdeutlicht.

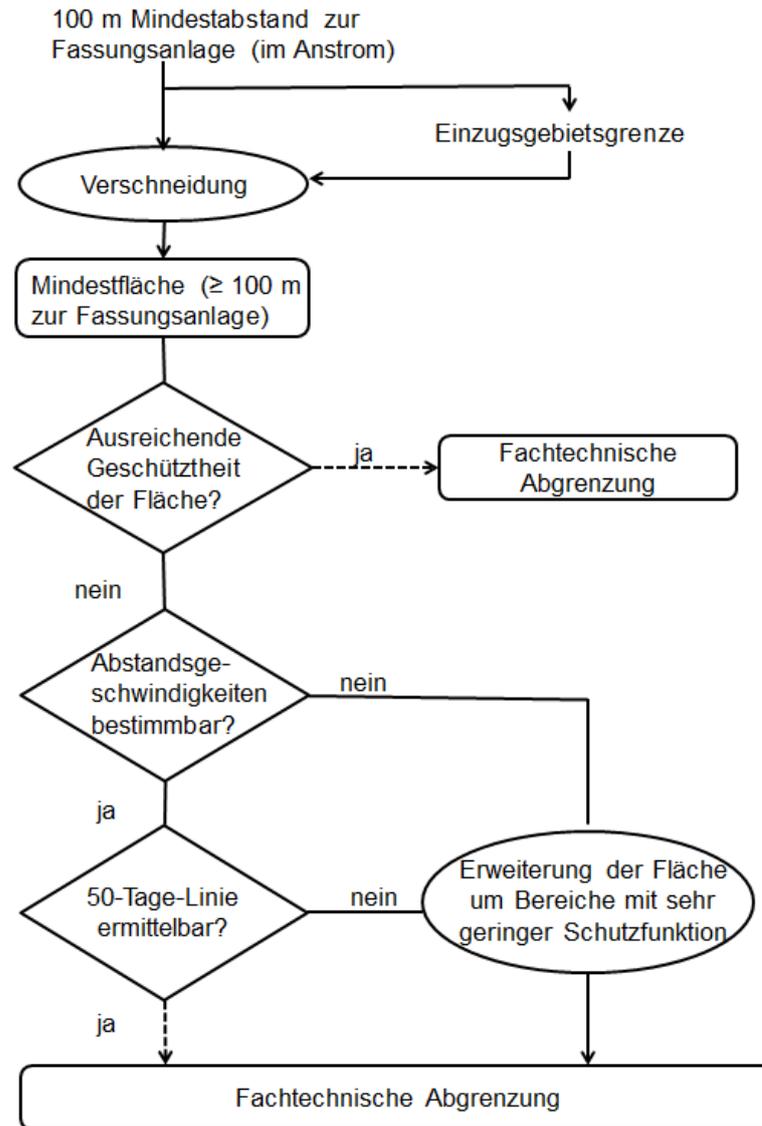


Abbildung 9: Herangehensweise zur Bemessung der Schutzzone II

### 6.3 Ausweisung der Schutzzone III

Die Schutzzone III umfasst nach DVGW-Arbeitsblatt W 101 (2006) das gesamte unterirdische Einzugsgebiet und oberirdisch hinein entwässernde Flächen des oberirdischen Einzugsgebietes der Wasserfassung. Zur Plausibilisierung der ermittelten Fläche wird mit Hilfe einer Gesamtwasserbilanz die Mindestfläche des Einzugsgebietes bestimmt.

#### Ermittlung der Mindestfläche des Einzugsgebietes

Anhand der ermittelten Wasserhaushaltsdaten, speziell der Grundwasserneubildung bzw. der Sickerwasserrate und der gegebenen Quellschüttung, kann die Mindestfläche des Einzugsgebietes ermittelt werden. Diese wird anhand der Grundwasserneubildungsrate oder der Sickerwassermenge über die folgende Beziehung ermittelt:

$$F_{EZG} = \frac{Q_m}{GW \ N \ | \ SW} * [km^2]$$

$F_{EZG}$  ... Mindestfläche des Einzugsgebietes [ km<sup>2</sup> ]

$Q_m$  ... mittlere Schüttungsmenge [ l/s ]

$GW \ N \ | \ SW$  ... Grundwasserneubildungsrate [ l/(s\*km<sup>2</sup>) ] oder Sickerwasserrate [ l/(s\*km<sup>2</sup>) ]

Durch die Berechnung der Mindestfläche des Einzugsgebietes lassen sich Rückschlüsse auf die Ausdehnung des unterirdischen Einzugsgebietes bzw. den Einfluss von unterirdischen Wasserzutritten über Klüfte oder Störungszonen ziehen. Liegt die berechnete Fläche deutlich über der ausgegrenzten (oberirdischen) Einzugsgebietsfläche des Quellgebietes, so muss von einem Einfluss von unterirdischen Wasserzutritten ausgegangen werden oder es liegen spezielle Infiltrationsverhältnisse vor (z. B. Uferfiltrat). Weiterhin ist es möglich, dass ein entferntes (ergiebiges) Speisungsgebiet die Quelfassung beeinflusst, das bisher noch nicht ermittelt wurde (z. B. Altbergbau).

Bei der Bilanzüberprüfung ist jedoch auch zu beachten, dass das rechnerisch ermittelte Grundwasser- bzw. Sickerwasserdargebot von dem tatsächlich gewinnbaren Dargebot abweicht und somit nicht als solches zu verstehen ist (vgl. DIN 4049-3 1994). Nur ein Teil des berechneten Grundwasser- bzw. Sickerwasserdargebots kann unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte und der technischen Möglichkeiten im Quellgebiet gefasst werden.

Hinweise auf ein vom oberirdischen abweichendes unterirdisches Einzugsgebiet erhält man z. B. über die Auswertung des hydrogeologischen Modells, über Bilanzprüfungen, das Schüttungsverhalten, die Wasserbeschaffenheit. Ergeben die genannten Auswertungen keine entsprechenden Hinweise, kann davon ausgegangen werden, dass das oberirdische Einzugsgebiet dem unterirdischen Einzugsgebiet annähernd entspricht.

Die Abgrenzung nach hydraulischen Kriterien auf der Basis von Grundwassergleichenplänen und Profilschnitten ist für die Quelfassungsstandorte in den meisten Fällen wegen fehlendem aushaltendem Grundwasserleiter, fehlender oder lückenhafter Datenbasis nicht möglich.

Erhält man über die Bilanzprüfungen Hinweise darauf, dass das Einzugsgebiet größer sein müsste als das oberirdische Einzugsgebiet, sind Gebiete mit Klufftgrundwassereinfluss, Störungsbereiche oder altbergbaulichen Stollenanlagen und Oberflächengewässer, sofern ein mögliches Gefährdungspotenzial erkennbar ist, angemessen mit einzubeziehen. Die anteilige Einbeziehung des unterirdischen Einzugsgebietes oder das anteilige Einbeziehen des Einzugsgebietes des Oberflächenwassers muss nachvollziehbar begründet werden. Beispielsweise kann anhand der Abschätzung einer mittleren Verweilzeit (z. B. über Isotopenuntersuchungen) und der Abschätzung des Fließweges vom Oberflächengewässer zur Quelfassung eine anteilige Abgrenzung begründet vorgeschlagen werden.

Nach DVGW-Arbeitsblatt (Pkt. 4.4.2, 2006) kann eine einzelfallbezogene Unterteilung in die Zonen III A und III B auch unter Berücksichtigung der Konfliktpotenziale und den ggf. daraus ergebenden Nutzungsbeschränkungen erfolgen. Für Sickerleitungsquellen ist eine solche Unterteilung nicht erforderlich, weil die meisten sächsischen Quelleinzugsgebiete im Vergleich zu Talsperren oder großen Grundwassereinzugsgebieten sehr klein sind.

# 7 Gefahrenpotenziale, Schutzbestimmungen, Überwachungsmaßnahmen

## 7.1 Mögliche Gefährdungspotenziale für das Grundwasser

Der umfassende Schutz des Grundwassers an Quelfassungsstandorten bedingt vorausgehend die Erfassung der relevanten standortbezogenen Konfliktpotenziale und deren Bewertung.

Dazu gehören alle möglichen nachteiligen Einflüsse und Veränderungen des Grundwassers in seiner Beschaffenheit und Menge durch physikalische, chemische, biologische und mikrobiologische Beeinträchtigungen. Beeinträchtigungen der Grundwasserbeschaffenheit sind weitgehend durch anthropogene Einflüsse bedingt, gebietsweise kommt der Beurteilung geogener Einflüsse ebenfalls eine hohe Bedeutung zu. Die Bewertung der Gefährdungspotenziale muss im Hinblick auf die aktuell vorhandenen Nutzungen und auf zukünftig mögliche Nutzungen erfolgen.

Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 101 (DVGW, 2006) sind folgende **Kategorien von Gefahrenquellen** zu erfassen und zu bewerten:

- Industrie und Gewerbe
- Altstandorte und Altablagerungen
- Abwasserbeseitigung und Abwasseranlagen
- Abfallentsorgung und -verwertung
- Siedlungsflächen und Verkehrswege
- Bodenstörungen, Eingriffe in den Untergrund (z. B. Bau von Erdwärmesonden oder Brunnenbohrungen)
- landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und gärtnerische Nutzungen
- Fließ- und Oberflächengewässer
- sonstige Nutzungen (z. B. Einflüsse durch [Alt-]Bergbau)
- sonstige umweltrelevante Betriebsanlagen

Die genannten Kategorien, die unter Punkt 7, Tabelle 1 der W 101 (DVGW 2006) als potenzielle Gefährdungen mit Prüfungsbedarf in Trinkwasserschutzgebieten erläutert sind, gelten auch für Quelleinzugsgebiete. Die Tabelle liefert den Rahmen für eine einzelfallbezogene fachliche Prüfung durch den Gutachter.

Es ist zu berücksichtigen, dass in Sachsen historisch bedingt der Bergbau eine häufige und spezifisch zu bewertende Quelle möglicher Gefährdungen in Quellgebieten darstellt. Den möglichen Folgen des zum Teil „Ur“altbergbaues ist besondere Bedeutung beizumessen.

Das bedeutet, dass durch den Gutachter alle für ein Untersuchungsgebiet bzw. das Einzugsgebiet der Wassergewinnungsanlage relevanten Gefährdungspotenziale beschrieben, bewertet und daraus resultierend konkrete Schutz- oder Überwachungsmaßnahmen abgeleitet und fachlich zu begründen sind. Dazu gehört auch, dass unsichere Angaben (z. B. aus Uraltbergbau), die nicht mit wirtschaftlichem Aufwand nacherho-

ben werden können, beschrieben werden und das Risiko für die Wasserversorgung zumindest verbal bewertet werden muss.

Auf dieser fachlichen Grundlage werden Vorschläge für **Schutzbestimmungen** erarbeitet mit dem Ziel, dass standortbezogen für jede einzelne Schutzbestimmung die Notwendigkeit konkreter Beschränkungen und Verbote fachlich begründet werden kann. Die jeweils geltenden Rechtsgrundlagen sind in den Empfehlungen und Richtlinien zu Schutzbestimmungen zu berücksichtigen:

- Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001); Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen (DIN 2000-10; DVGW 2000)
- Verordnung des SMUL über Schutzbestimmungen und Ausgleichsleistungen für erhöhte Aufwendungen der Land- und Forstwirtschaft in Wasserschutzgebieten (SächsSchAVO 2008)
- Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV 2012); Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über Anforderungen an Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Dung und Silagesickersäften (Sächsische Dung- und Silagesickersaftanlagenverordnung – SächsDuSVO 2008)
- Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten (RiStWag 2002); Hinweise für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wasserschutzgebieten (BeStWag 1993)

Ebenso sind die Rechtsgrundlagen des allgemeinen Gewässerschutzes bei der fachlichen Prüfung zu beachten (u. a. EG-WRRL, PflSchG, PflSchAnwV, SächsVAwS, VAWS, SächsDuSVO, AbfKlärV, BBodSchV, EG-Nitratrichtlinie). Weitere allgemeine Hinweise hierzu sind der Veröffentlichung „Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Trinkwasserschutzgebieten“ (SMUL 2015) zu entnehmen und zu beachten.

Im Einzelfall über die Empfehlung des DVGW-Arbeitsblatt W 101 hinausgehende Forderungen sind im Hinblick auf die Rechtssicherheit in Festsetzungsverfahren unter Berücksichtigung der Angemessenheit fachlich nachvollziehbar zu begründen.

Die rechtsverbindlichen Regelungen werden auf Grundlage der Konflikt- und Gefahrenpotenzialanalyse des Gutachtens erst von den unteren Wasserbehörden in der Schutzgebietsverordnung getroffen.

### **Besonderheiten bei Sickerleitungsquellgebieten**

Bei Sickerleitungsquellen ist immer zu beachten, dass alle Konfliktpotenziale unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden müssen, dass ein Großteil der Zuflüsse schnelle Abflusskomponenten darstellen und demnach eingetragene Schadstoffe mit geringen Verweilzeiten und ohne nennenswerte Abbaurate in die Fassung gelangen. Demzufolge sind insbesondere zu beachten (unvollständige Aufzählung):

- Die Gefährdung nimmt nur bedingt mit der Entfernung von der Quelfassungsanlage ab.
- Der Bestandsschutz einer Anlage rechtfertigt nicht das Außerachtlassen der Rohwassergefährdung. Auch wenn bisher nichts passiert ist, sollten angetroffene Gefahrenpotenziale nach Möglichkeit beseitigt werden.
- Ein Eintrag von Nitrat ist nicht nur von landwirtschaftlichen Nutzflächen möglich. Es kann auch eine Gefahr von bewirtschafteten Forstflächen oder Gartenanlagen ausgehen.
- Aufgrund der sehr kurzen Verweilzeiten im Quellgebiet ist die Versickerung von Abwasser aus vollbiologischen Kläranlagen mit der Gefahr des Eintrags von pathogenen Keimen und Spurenstoffen verbunden. Die

VwV Grundsätze der Abwasserbeseitigung<sup>1</sup> (2013; Anlage 1, Punkt 2.4) regelt den Umgang mit der Abwasserbeseitigung in Schutzgebieten. Danach darf die Einleitung auch von gereinigtem Abwasser in Gewässer (auch in das Grundwasser) nicht zur Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung führen. Diese Tatsache allein führt jedoch nicht zu einem allgemein verbindlichen Grundsatz, dass Abwasser grundsätzlich aus Trinkwasserschutzgebieten herauszuleiten ist. Eine Herausleitung des Abwassers aus Trinkwasserschutzgebieten darf nur gefordert werden, wenn es wasserwirtschaftlich zwingend geboten ist und die notwendige Verbesserung nicht durch Nachrüstung der bestehenden Einleitung mit einer biologischen oder weitergehenden Reinigungsstufe erreicht werden kann. Insbesondere ist auch die durch Nachrüstung einer biologischen (oder weitergehenden) Reinigungsstufe eintretende Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Situation anzuerkennen und bei der Entscheidung zu berücksichtigen (vgl. VwV Grundsätze der Abwasserbeseitigung, Anlage 1, Punkt 2.3)

- Die Anwendung der RiStWag ist in Sachsen für Bundesfern-, Staats- und Kreisstraßen vorgeschrieben. Bei empfindlichen Quellgebieten sollten die Bestimmungen der RiStWag auch bei kleineren Straßen angewandt werden. BeStWag sollte ebenfalls unabhängig von der Größe der Straße orientierend hinzugezogen werden.
- Wenn Abwasserkanäle durch das Quellgebiet, besonders in der Zone II, verlaufen muss auf besonders sicheren Ausbau der Kanalanlage geachtet werden, z. B. mit Doppelwandigkeit und besonderer Abdichtung, häufigerer Prüfung.
- Eine Verletzung der Bodenschicht/Grundwasserüberdeckung ist in Schutzzone II (und I) generell aus Vorsorgegründen zu vermeiden. Die betrifft z. B. auch Geothermienutzung oder andere Bohrungen wie Brunnen.
- Der Anbau von Kulturen mit hohem Nährstoffbedarf (z. B. Mais) ist ungünstig und ggf. in der Schutzzone II zu verbieten.
- Intensive Tierbeweidung, wie auch eine Pferdekoppel eines Reitstalls sollte verboten werden.
- Grünlandumbruch in Ackerbau ist in Schutzzone II verboten. Ggf. sollte dies auch in Schutzzone III verboten werden, weil Sickerleitungsquellen empfindlicher als herkömmliche Brunnen zur Trinkwassergewinnung reagieren.

## 7.2 Hinweise zu Schutz- und Überwachungsmaßnahmen

Die nach DVGW-Arbeitsblatt W 101 benannten Handlungen, Einrichtungen und Vorgänge mit Prüfungs- und Regelungsbedarf, Schutz- und Überwachungsmaßnahmen treffen für Sickerleitungsquellen grundsätzlich wie für andere Wasserfassungen zu.

Aus dem Gutachten müssen konkrete Vorschläge für Schutz- und Überwachungsmaßnahmen des Grundwassers bzw. von Gefahrenpotenzialen für das Grundwasser hervorgehen. Diese sind einzelfallbezogen und in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten zu verfassen.

<sup>1</sup> VwV Grundsätze der Abwasserbeseitigung vom 5. Dezember 2013 (SächsABl. 2014 S. 63), die durch die Verwaltungsvorschrift vom 12. Oktober 2015 (SächsABl. S. 1506) geändert worden ist, enthalten in der Verwaltungsvorschrift vom 10. Dezember 2015 (SächsABl.SDr. S. S 429; [www.revosax.sachsen.de](http://www.revosax.sachsen.de))

Unabhängig von der Art der Wasserfassungsanlage dürfen in der **Schutzzone I** „keine Handlungen, Einrichtungen und Vorgänge mit Ausnahme von Maßnahmen der Wassergewinnung durchgeführt werden“ (DVGW 2006: S. 14). Damit ist für diese Zone die ausschließliche Vorrangnutzung allein zum Zweck und zur Sicherung der öffentlichen Wasserversorgung eindeutig formuliert. Die Schutzzone I ist, wenn möglich, vor dem Betreten durch unbefugte Personen durch Einzäunung zu schützen. In Anlehnung an die außer Kraft getretene Anlage 1 der SächsSCHAVO von 2002 können folgende land- und forstwirtschaftlichen Nutzungen gestattet werden:

- Mähnutzung von Grünland ohne Düngung und ohne Anwendung von Pflanzenschutz- und Pflanzenstärkungsmitteln. Das Mähgut ist nach dem Schnitt abzufahren.
- Forstwirtschaftliche Nutzung ohne Düngung und ohne Anwendung von Pflanzenschutz- und Pflanzenstärkungsmitteln bei Verzicht auf Kahlschlag und Wurzelstockbeseitigung sowie bei Einsatz bodenschonender schwerer Forsttechnik.

In der **Schutzzone II** „...sind insbesondere folgende Handlungen, Einrichtungen und Vorgänge mit Ausnahme von Maßnahmen der Wassergewinnung in der Regel nicht tragbar:

- Errichten und Erweitern von baulichen Anlage, Baustelleneinrichtungen
- Ausweisung neuer Baugebiete
- Neubau von Verkehrswegen
- Versickerung von Abwasser
- Ausbringung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdünger
- Ausbringung von Abfällen zur Verwertung
- Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
- Gewinnung von mineralischen Rohstoffen
- Tiergehege und Dauerbeweidung“ (DVGW, 2006: S.14)

Auf der Grundlage dieser Empfehlungen sind in der fachlichen Vorbereitung von Schutzgebieten nach Prüfung der standortbezogenen potenziellen Gefährdungen fachliche Vorschläge für den Abwägungsprozess zu Beschränkungen, Auflagen und Verboten zu formulieren, die anschließend in der Schutzgebietsverordnung durch die zuständige Vollzugsbehörde festgesetzt werden können.

Im DVGW-Regelwerk (DVGW 2006) werden unter Punkt 7, Tabelle 1 ca. 60 potenzielle Gefährdungen für Grundwasserfassungen mit Prüfungsbedarf in den vorgeschlagenen Schutzzonen II und III nach Art und Höhe des Gefährdungspotenzials aufgeschlüsselt dargestellt (Industrie und Gewerbe, Abwasseranlagen, Abfallentsorgung, Siedlung und Verkehr, Landwirtschaft u. a.).

Die Hinweise und Vorschläge für Formulierungen der einzelnen Schutzgebietsbestimmungen müssen regionalspezifisch auf ihre Relevanz geprüft werden. Im Gutachten müssen mögliche Handlungsoptionen zum Umgang mit Konflikt- oder Gefährdungspotenzialen aufgezeigt und fachlich begründet werden. Dabei ist zu prüfen, ob die Durchführung der genannten und im betreffenden Einzugsgebiet zutreffenden Handlungen in der jeweiligen Schutzzone möglich sind, ob von ihnen Gefährdungen ausgehen und ob unter Beachtung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes ein Verbot oder eine Beschränkung notwendig ist. Vorschläge für Nebenbestimmungen sind nicht allgemein, sondern standortbezogen zu formulieren und fachlich zu begründen.

Um die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen zu wahren, müssen u. a. folgende Grundsätze beachtet werden:

- Zweckmäßigkeit der Maßnahme zur Erreichung des Ziels
- Geeignetheit der Maßnahme zur Erreichung des Ziels. Es sind u. U. mehrere Maßnahmevarianten zur Erreichung des Ziels möglich.
- Erforderlichkeit der Maßnahme ist gegeben, wenn kein milderes Mittel bei gleicher Eignung zur Zielerreichung führt bzw. wenn kein anderes Mittel verfügbar ist.

#### Besonderheiten bei Sickerleitungsquellgebieten

Aufgrund des spezifischen Aufbau- und Prozessbildes von Sickerleitungsquellgebieten, d. h. der Nutzung von schnellen Abflusskomponenten mit geringen Verweilzeiten, müssen Gefährdungspotenziale anders bewertet werden als dies bei Brunnen der Fall ist. Es sollten u. a. folgende Besonderheiten beachtet werden:

- Die Schutzzone I wird aufgrund einer großen Schachanzahl mit ggf. diversen Sickerleitungen oft verhältnismäßig groß.
- Die Einzäunung bzw. Abgrenzung der Schutzzone I gegenüber unbefugtem Betreten ist aufgrund der Größe oft nicht möglich.
- Die Schutzzone II reicht häufig bis an die Grenze des oberirdischen Einzugsgebietes heran und wird oft sehr groß. In früheren Gutachten sind die Schutzzonen II oft weit unterschätzt worden.

## 7.3 Maßnahmenkonzeption und Empfehlungen zu Überwachungsmaßnahmen

Die gutachterlichen Vorschläge zur Ausweisung des Trinkwasserschutzgebietes sind in der Regel mit standortbezogenen Empfehlungen zur weiteren Überwachung der quantitativen und qualitativen Betriebsdaten der Quelfassung verbunden. Diese dienen der Festigung des erlangten Kenntnisstandes und der betriebsinternen Kontrolle und Verfolgung aufgezeigter Trends z. B. hinsichtlich der Entwicklung hydrochemischer Parameter in Abhängigkeit von der Flächennutzung und Bewirtschaftung. So kann bei ausgesprochenen Empfehlungen zur verstärkten Überwachung und mittelfristigen Reduzierung des Stickstoffeintrages in das Grundwasser ein zwischen Vollzugsbehörde, Wasserversorger und landwirtschaftlichem Nutzer abgestimmtes Überwachungs- und Kontrollprogramm vereinbart werden. Es eröffnet sich dadurch u. a. die Chance, erforderliche Ausgleichszahlungen in Schutzzonenbereichen als Kostenposition zu optimieren.

Wichtige Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen sind hierbei:

- mindestens jährliche Rohwasseranalysen und Quellschachtkontrollen
- Weiterführung von verdichteten Messungen zur Quellschüttung und der Grundwasserchemie, um mögliche Abhängigkeiten zwischen Quellschüttung und z. B. Nitratbelastung verfolgen und erkennen zu können
- Kontrolle der Aufnahme von  $N_{\min}$ -Gehalten auf landwirtschaftlichen Flächen im ausgewiesenen Einzugsgebiet
- Aufnahme oder Weiterführung spezieller Untersuchungsprogramme unter Anwendung von Isotopen, z. B. zur Untersuchung von Stickstoffumsetzungsprozessen

Es wird empfohlen, die Ergebnisse von ergänzenden Kontroll- und Überwachungsmessungen regelmäßig einer gutachterlichen Bewertung zu unterziehen, die Weiterführung von Messungen bedarfsweise anzupassen und im Betriebsplan der Wasserversorgungsanlage festzuhalten.

Die nach DVGW (2006) unter Punkt 8 aufgeführten Empfehlungen zu Schutz- und Überwachungsmaßnahmen sind auf Sickerleitungsquellen grundsätzlich übertrag- und anwendbar.

# 8 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc AG Boden (Hrsg., 2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl., 438 S., 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe mit den Staatlichen Geologischen Diensten).
- ANDERSON, M.G., BURT T.B. (1990): Subsurface runoff. – In: ANDERSON, M.G., BURT T.B. (Hrsg.): Process studies in hillslope hydrology. – S. 365-400, 1. Aufl., 550 S., Hoboken (Wiley).
- ARCADIS (2012): Überarbeitung der Broschüre „Materialien zur Hydrogeologie – Trinkwasserschutz in Quellgebieten“. – ergänzter Abschlussbericht im Auftrag des LfULG, 196 S., unveröff. Freiberg.
- ARGE Isotopenuntersuchungen (2010): „Isotopenuntersuchungen an Grundwassermessstellen des Freistaates Sachsen -Teilprojekt 2 - Bericht: Auswertung Tracerversuch im Quellgebiet Markert“, 29.10.2010.
- ARGE Isotopenuntersuchungen (2011a): Endbericht. Isotopenuntersuchungen an Grundwassermessstellen des Freistaates Sachsen - Teilprojekt 1. – 40 S., 6 Anl., unveröff. (Bericht vom 28.02.2011).
- ARGE Isotopenuntersuchungen (2011b): Isotopenuntersuchungen an Grundwassermessstellen des Freistaates Sachsen - Teilprojekt 2 - Untersuchungen im Testgebiet Quellgebiet Market. – 84 S., 9 Anl., unveröff. (Bericht vom 12.04.2011).
- ARGE Isotopenuntersuchungen (2011c): Isotopenuntersuchungen an Grundwassermessstellen des Freistaates Sachsen - Teilprojekt 2 - Untersuchungen im Testgebiet Schnellbach. – 72 S., 12 Anl., unveröff. (Bericht vom 11.03.2011).
- BAUER (2008): Tracer in der quatischen Umwelt. Tracertests. Auswertung von Durchbruchkurven. – 38 S. Vorlesung an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften, Kiel.
- BMU [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit] (Hrsg.) (2001, 2002, 2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – 1.-3. Lieferung, Bonn.
- BUSCH, K.F., LUCKNER, L., TIEMER, K. (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 3, Geohydraulik. – 3. neubearb. Aufl., 4937 S., Berlin (Borntaeager).
- C & E [Consulting und Engineering GmbH] (2006): Ausweisung eines Wasserschutzgebietes für die Wassergewinnungsanlage Quellgebiet Syrau/Kaltenbach. – 72 S., unveröff. Ergebnisbericht im Auftrag des LfUG, Chemnitz.
- CLARK, I.D., FRITZ, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology.- 328 S., CRC Press, Boca Raton.
- DAVIE, T. (2008): Fundamentals of Hydrology. – 2. überarb. Aufl., 228 S., London (Taylor & Francis).
- DIN 2000: 2000-10: Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie, Grundbegriffe. – 12 S., Deutsches Institut für Normung, Berlin (Beuth Verlag).
- DIN 4049-2 (1990): Hydrologie, Begriffe der Gewässerbeschaffenheit. – 25 S., Deutsches Institut für Normung, Berlin (Beuth Verlag).
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie, Begriffe zur Quantitativen Hydrologie. – 80 S., Deutsches Institut für Normung, Berlin (Beuth Verlag).
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) (2006): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete, Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser. – DVGW-Regelwerk, Arbeitsblatt W 101, Bonn.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. – 3., stark bearb. Aufl., 536 S., Berlin (VEB Verlag für Bauwesen).
- DWA (2015): Stoffumsatz im Grundwasser. – 87. S, DWA-Themen T 2/2015. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. März 2015.

- EICHINGER, L. (2006): Isotopenmethoden und Radioaktivität im Grundwasser. – Stuttgart (Hydroisotop GmbH).
- FURTAK, H., LANGGUTH, H.-R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – Mem. IAH-Congress 1965, S. 86-96, Hannover.
- G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH (2013): Neubemessung der Wasserschutzgebiete „Quellgebiete Hüttstatt, Sauheidebächel, Goldborn und Achternweg“/ Erzgebirgskreis. – 63 S., Hydrogeologisches Gutachten im Auftrag des LfUG, unveröff., Freiberg.
- HÄFNER, F., VOIGT, H.-P. (1981): Grundlegend er Hydrodynamik und einige analytische Lösungen für lineare Strömungsvorgänge. – Zeitschrift für angew. Geol., Bd. 27, Heft 7, Zentrales Geologisches Institut, Berlin (Akademie-Verlag).
- HEBERT, D., JORDAN, H., KUNZ, A. (1985): Anwenderrichtlinie für den Einsatz von Isotopenmethoden in der Hydrogeologie. – 107 S., Freiberg (TU Bergakademie).
- HENNIG, H., SCHWARZE, R. (2001): Geohydraulische Interpretation des Konzeptmodells Einzellinearspeicher und Konsequenzen bei der Modellierung des Grundwasserabflusses. – Wasserwirtschaft 90 (1), S. 42-48.
- HGN Hydrogeologie (2006): Hydrogeologisches Gutachten zur Neubemessung von Wasserschutzgebieten für die Quellgebiete „Ratswald“, „Messstation“, „Naumannwasser“ und „Kühberger Quellen“ der Gemarkungen Königswalde und Jöhstadt im Landkreis Annaberg. – unveröff. Ergebnisbericht im Auftrag des LfUG, 72 S., Dresden.
- HÖLTING, B., HAERTLÉ, T. HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K., VILLINGER, E., WEINZIERL, W., WROBEL, J.-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – Geol. Jb. C 63: 5-24, 5 Tab., Hannover.
- HÖLTING, B., COLDEWAY, W.G. (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 7. Neu bearb. u. erw. Aufl., 383 S., 120 Abb., 90 Tab., Heidelberg (Spektrum).
- JORDAN, H., HEBERT, D., SZYMCAK, P., BEDNORZ, F., BRINSCHWITZ, D. (1991): Anwenderrichtlinie zur Geschützteitsbewertung von Grundwasserressourcen auf der Grundlage von Tritiumanalysen. – Freiberg (Bergakademie).
- JORDAN, H., FRÖHLICH, K., HERBERT, D., GELLERMANN, R. (1986): Grundwasserschutz und Isotopenhydrogeologie – methodische Aspekte. – Freiburger Forschungsheft C 417 (I): 10-18, Leipzig.
- JORDAN, H., HERBERT, D., GELLERMANN, R., SZYMCAK, P. (1989): Erarbeitung einer Methodik quantitativer Geschützteitsbewertung von Grundwasserressourcen auf der Grundlage isotopenhydrogeologischer Verfahren. – Forschungsbericht A 4, Freiberg (Bergakademie Freiberg).
- JORDAN, H., WEDER, H.-J. (Hrsg., 1995): Hydrogeologie. Grundlagen und Methoden. Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen. – 2. stark überarb. und erw. Aufl., 603 S., 427 Abb., 178 Tab., 3 Karten, Stuttgart (Enke).
- KENDALL, C., ELLIOTT E.M., WANKEL, S.D., (2007): Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. – In: LAJTHAM K & MICHENER, R.H.: Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, Blackwell Scientific Publications.
- KRAFT, W., SCHRÄBER, D. (1982): Grundwasserspendenschlüssel und ihre Anwendung bei der Ermittlung des Grundwasserdargebotes in Festgesteins-Grundwasserleitern. – Zeitschrift für angew. Geol., Bd. 28, H 4, Berlin (Zentrales Geologisches Institut).
- KRAFT, W., SZYMCAK, P. (1993): Die Erfahrungen mit den Schlüsselkurven im Festgestein. – In: KdT: Vorträge Kolloquium Hydrogeologie, Thema: Grundwasserneubildung, S. 57-80, Erfurt.
- LfUG [Landesamt für Umwelt und Geologie] (Hrsg., 1995): Materialien zur Altlastenbehandlung. Altlastenerkundung mit biologischen Methoden. – 59 S., Schriftenreihe 7/95, Dresden.
- LfUG [Landesamt für Umwelt und Geologie] (Hrsg., 1997): Materialien zur Hydrogeologie. Trinkwasserschutz in Quellgebieten. – 54 S., Radebeul.

- LfUG [Landesamt für Umwelt und Geologie] (Hrsg., 2008): Fachkonzept zur Berechnung des Wasserhaushalts für den Fest- und Lockergesteinsbereich in Sachsen mit dem Schwerpunkt Grundwasserhaushalt („Grundwasserhaushalt Sachsen“). – 183 S., Dresden.
- LfULG [Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie] (Hrsg., 2012): KliWES – Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen. Auswahl von Klimaszenarien. – 58 S., Dresden.
- LAWA „Grundwassermessung“ [Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser] (Hrsg., 1993): Grundwasser. Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 3 – Grundwasserbeschaffenheit. – Bonn.
- LAWA „Grundwassermessung“ [Bund/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser] (Hrsg., 1995): Grundwasser. Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 4 – Quellen. – Bonn.
- LANGGUTH, H.-R., VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. – 2. überarb. u. erw. Aufl., 1003 S., 304 Abb., Berlin, Heidelberg (Springer).
- LEIBUNDGUT, C., MALOSZEWSKI, P., KÜLLS, C. (2009): Tracers in Hydrology. – 1. Aufl., 432 S., Hoboken (Wiley-Blackwell).
- LÖFFLER, H. (1972): Ein Anwendungsbeispiel für hydrochemische Auswerteverfahren im norddeutschen Raum mit dem Versuch einer Grundwassertypisierung. – unveröff., VEB Hydrogeologie.
- LÖFFLER, H., MEINERT, N. (2011): Ausgewählte Forschungs- und Erkundungsergebnisse auf dem Gebiet der Hydrogeologie in der DDR. – In: GUNTAU, M., HARTMANN, O., PÄLCHEN, W., STÖRR, M. (2011): Geschichte der Geowissenschaften in der DDR - Teil II, 644 S., Schriftenreihe für Geowissenschaften Herf 18/2011, Ostklüne (Verlag Störr).
- LOOSLI, H.H., LEHMANN, B.E., SMETHIE JR, W.M. (2000): Noble gas radioisotopes: <sup>37</sup>Ar, <sup>85</sup>Kr, <sup>39</sup>Ar, <sup>81</sup>Kr. – In: COOK, P., HERCZEG, A.L. (2000): Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, S. 379-397, Kluwer Academic Publishers.
- MAILLET, E. (1905): Mécanique et physique du globe. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. – 218 S., Paris (A. Hermann).
- MANIAK, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. – 6., neu bearb. Aufl., 686 S., Berlin, Heidelberg (Springer).
- MOOK, W.G. (Hrsg., 2001) : Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications, Vol. I-VI. – Paris (UNESCO/ IAEA).
- MOSER, H., RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie - Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 8, Stuttgart (Borntraeger).
- MOTZER, W.E. (2006): Nitrate forensics. – Hydro Visioan Newsletter. Herbst 2006.
- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflüsse (TWL). – xx S., Wasserwirtschaft (Sonderheft), Stuttgart.
- OTNES, J., RAESTAD, E. (HRSG., 1978): Hydrologi i praksis. – 2. Aufl., 314 S., Oslo (Ingeniørforlaget).
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194.
- RICHTER, J., SZYMCAK, P. (1991): MULTIS – Ein Computerprogramm zur Auswertung isotopenhydrologischer Daten auf der Grundlage gekoppelter konzeptioneller Boxmodelle. Programmdokumentation. – 46 S., TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Freiberg (Eigenverlag).
- ROTHER, P. (1966): Über subterrane Wechselbeziehungen zwischen Ostsee und Grundwasser im Bereich der Warnow bis zum Fischland – unveröff., Dipl.-Arb. im Geol. Inst. d. Humboldt-Univ. Berlin.
- SCHÄDEL, K., STÖBER, I. (1988): Dispersion als Hinweis auf den Karsttypus. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilung 32/4, S. 107-110, Koblenz.
- SCHEFFER, F., BLUME, H.-P., SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – Neubearb. und erw. 16. Aufl., 570 S., Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

- SCHLINKER, K. (1968): Beiträge zur wasserwirtschaftlichen Erfassung des Grundwasserdargebotes, seines Chemismus und seiner Beziehung zum Oberflächenabfluss im Großeinzugsgebiet Küste-Warnow-Peene. – unveröff., Dissertation, TU Dresden.
- SCHLINKER, K. (1964): Forschungsstudie. Grundwasserversalzung. – unveröff., Wasserwirtschaftsdirektion Stralsund.
- SCHLINKER, K. (1969): Komplexmethodik der regionalen Grundwassererkundung im Großeinzugsgebiet Küste-Warnow-Peene. – Wiss. Zeitschr, d. Univ. Rostock, Math.-Nat.-Reihe 18/7.
- SCHWARZE, R. (1985): Gegliederte Analyse und Synthese des Niederschlags-Abflussprozesses von Einzugsgebieten. – Dissertation, TU Dresden, Fak. f. Bau, Wasser- und Forstwesen, Dresden.
- SCHWARZE, R. (2012): Erläuterungen der dem KliWES-Projekt zugrunde liegenden Methodik und Ergebnisse der Wasserhaushaltsanalysen ausgehend von Beobachtungsdaten. - In: Tagungsmappe zum 2. KliWES-Workshop am 28.06.2012, Dresden.
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., OPPERDEN, K. (1999): Regionalisierung von Abflusskomponenten, Umsatzräumen und Verweilzeiten für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete. – In: KLEEBERG, H.-B. (1999): Hydrogeologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 – 1998), Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore (Wiley-VCH).
- SCHWARZE, R., ROSS, H. (1996): Trinkwasserschutz in Quellgebieten. – 2. Projekt-Zwischenbericht, TU Dresden, Inst. f. Hydrologie und Meteorologie. unveröff. Dresden.
- SMUL [Sächsisches Ministerium für Umwelt und Landwirtschaft] (Hrsg., 2015): Empfehlungen für Fachgutachten zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten, Dresden.
- STRAYLE, G. (1970): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Ebringer Alb. – Jb. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg 12. Freiburg.
- STRAYLE, G., STÖBER, I., SCHOLZ, W. (1994): Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen. – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg 6/1994, Freiburg.
- SÜLTENFUSS, J., MASSMANN, G. (2004) : Datierung mit der <sup>3</sup>He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. - In: Grundwasser 4 / 2004. Springer-Verlag.
- SZYMCZAK, P. (2007): Bemessung von Trinkwasserschutzzonen für Quellgebiete und Stollenwasserfassungen mittels Isoschronenberechnung auf der Basis von Trockenwettermessungen der Schüttungsraten. Dokumentation. – In GE.O.S. (2007): Gutachten zur Neubemessung der Wasserschutzgebiete für die QG Kemtauer Flur, Schlundt und Nässe, Anlage 11, 13 S., unveröff. Freiberg.
- TRESKATIS, CH.; TAUCHMANN, H. (2013): Quellfassungsanlagen zur Trinkwasserversorgung –Technische und naturwissenschaftliche Grundlagen für den Bau und Betrieb von Quellfassungen für die Wasserversorgung. Deutscher Industrieverlag GmbH (DIV). München. 2013.
- WILMANN, O. (2007): Ökologische Pflanzensoziologie. Eine Einführung in die Vegetation Mitteleuropas. – 6. Neu überarb. Aufl., 405 S. Wiesbaden (Quelle & Meyer).
- WANDT, K. (1960): Hydrochemische Untersuchungen von Grundwasser diluvialer und tertiärer Schichten in Schleswig-Holstein. – Meyniana 9: 98-129, Kiel.
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: GEHMANN: Die Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland und ihr Nutzung, Forsch. Dtsch. Landesk. 104, S. 47-54, Remagen.
- ZUBER, A. (1986): Mathematical models for the interpretation of environmental radioisotopes in groundwater-systems. – In: FRITZ, P., FONTES, J.CH. (1986): Handbook of environmental isotope geochemistry, Bd. 2, S.1-60, Amsterdam.

## Weiterführende Literatur

- DVWK (1992): Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben. – 41 S., DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, H 128, Hennef (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.).
- Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (Hrsg., 2010): Hydrogeologische Modelle. Bedeutung des Hydrogeologischen a priori-Wissens. – 68 S., 31 Abb., 3 Tab., SDGG, Heft 70, Stuttgart (Schweizerbart).
- HEBERT, D., JORDAN, H., SZYMCZAK, P., BEDNORZ, F., BRINSCHWITZ, D. (1991): Anwenderrichtlinie zur Geschützteitsbewertung von Grundwasserressourcen auf der Grundlage von Tritiumanalysen. – 30 S., graph. Darst., Kt., Freiberg (Bergakademie Freiberg).
- JORDAN, H., FRÖHLICH, K., HERBERT, D., GELLERMANN, R. (1986): Grundwasserschutz und Isotopenhydrogeologie – methodische Aspekte. – Freiburger Forschungsheft C 417 (I): 10-18, Leipzig.
- JORDAN, H., HERBERT, D., CLARK, I.D., FRITZ, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology – 352 S., CRC Press/ Lewis Publishers.
- JORDAN, H., HERBERT, D., GELLERMANN, R., SZYMCZAK, P. (1989): Erarbeitung einer Methodik quantitativer Geschützteitsbewertung von Grundwasserressourcen auf der Grundlage isotopenhydrogeologischer Verfahren. – Forschungsbericht A 4, Freiberg (Bergakademie Freiberg).
- KINZELBACH, W., RAUSCH, R. (1995): Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen. – 283 S., Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- MENDEL, H. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs. Eine Kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. – 256 S., 129 Abb., 188 Tab., Berlin (Analytica V.-G.).
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung (1997): Simulation von Grundwasserströmungs- und -transportprozessen im Rahmen der Altlastenbehandlung (Lockergestein, Festgestein und ungesättigte Zone). – 263 S., Dresden.
- SZYMCZAK, P., ACKERMANN, V. & VOGEL, B. (1993): Bemessung von Trinkwasserschutz-zonen unter Zuhilfenahme von Radionuklidmessungen. – In: KdT: Vorträge Kolloquium Hydrogeologie, Oktober 1993, Erfurt.
- Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.) (2005): Hydrochemische Karte Österreichs. Oberflächennaher Grundwasserkörper und Fließgewässer, Mittelwerte von Wassergüteehebungsdaten (WGEV-Daten) 1991-2001. – 2. Aufl., 19 S., Wien (Umweltbundesamt GmbH).
- WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A., SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. – 352 S., 170 Abb., 79 Tab., Hamburg, Berlin (Parey).

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: [fulg@smul.sachsen.de](mailto:fulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/fulg](http://www.smul.sachsen.de/fulg)

**Autoren:**

Claudia Bochynek, Karin Kuhn  
Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Oberflächenwasser,  
Wasserrahmenrichtlinie  
Maren Zweig, Henrike Schubert  
Abteilung Geologie/Referat Hydrogeologie

**Redaktion:**

Dr. Peter Börke  
Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Siedlungswasserwirtschaft,  
Grundwasser  
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden  
Telefon: +49 351 8928-4300  
Telefax: +49 351 8928-4099  
E-Mail: [peter.boerke@smul.sachsen.de](mailto:peter.boerke@smul.sachsen.de)

**Redaktionsschluss:**

27.07.2016

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter [www.publikationen.sachsen.de](http://www.publikationen.sachsen.de) heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.