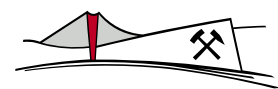
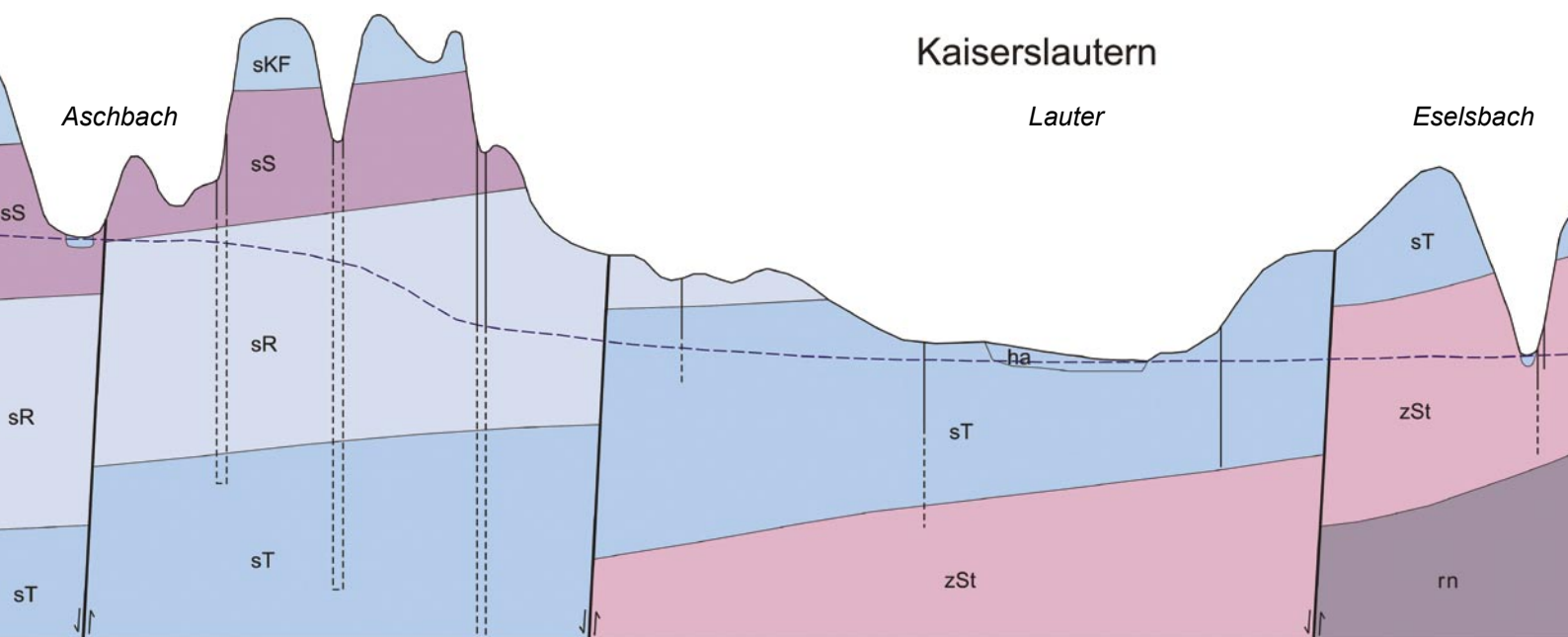


Hydrogeologische Kartierung Kaiserslautern



Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz

Hydrogeologische Kartierung

Kaiserslautern

Projektleitung

Dr. Bettina Wagner
(LGB)

Bearbeitung

Dr. Frank Bitzer, Andrea Chelmoni, Andreas Dietz, Steffen Dipp,
Dr. Doris Dittrich, Dr. Thomas Dreher, Michael Goldschmitt, Dr. Jost Haneke,
Dr. Hubert Heitele, Dr. Karl-Heinz Hohberger, Dr. Heinz Lothhammer,
Ewald Sieben, Dr. Ernst-Dieter Spies, Dr. Michael Weidenfeller
(LGB)

Christof Baumeister, Norbert Demuth, Yvonne Henrichs, Jochen Kampf,
Dr. Andreas Meuser, Wolfgang Plaul, Hans-Joachim Rossel
(LfW)

Tanja Wilferth, Ulrich Steinrücken
(freie Mitarbeiter)

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz

Impressum

Herausgeber: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB)
Emy-Roeder-Straße 5
55129 Mainz

Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz (LfW)
Am Zollhafen 9
55118 Mainz

Redaktion: Dr. Klaus Steingötter, Dr. Bettina Wagner (LGB)

Digitale Kartografie: Andrea Chelmoni, Andreas Dietz, Dr. Bettina Wagner (LGB),
Tanja Wilferth (freie Mitarbeiterin)

Satz und Layout: Tatjana Schollmayer (LfW)

Druck: Faber Druck Kaiserslautern

Auflage: 300 Exemplare

© Juni 2004

Nachdruck und Wiedergabe nur mit Genehmigung der Herausgeber

Vorwort

Das Landesamt für Geologie und Bergbau führt zusammen mit dem Landesamt für Wasserwirtschaft im Rahmen der hydrogeologischen Landesaufnahme schwerpunktmäßig Projektkartierungen für bedeutende Grundwasservorkommen in Rheinland-Pfalz durch. Es handelt sich dabei um eine Gemeinschaftsarbeit von Geologen, Ingenieuren, Bodenkundlern und Chemikern.

Im Vordergrund steht die Beschreibung des hydrogeologischen Baus sowie der Beziehungen der verschiedenen Grundwasserleiter zueinander und zu oberirdischen Gewässern. Zusammen mit der Wassermengenbilanzierung, der hydrochemischen Beschreibung der verschiedenen Grundwasserleiter sowie der Bewertung des Grundwasserschutzes bilden diese Informationen auch im Sinne der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, EU-WRRL) die Grundlagen für eine Sicherung der Grundwasservorkommen und deren umweltverträgliche Bewirtschaftung. Besonders bei Planungsaufgaben und Nutzungskonflikten sind derartige geologische, hydrologische und bodenkundliche Grundlagenuntersuchungen wichtige Bewertungskriterien.

Die Ergebnisse werden jeweils in einem Kartenwerk mit einem Erläuterungsband dargestellt, wobei die Kartenthemen und -maßstäbe von den jeweiligen Erfordernissen abhängen.

Während die bisher durchgeführten Kartierungen vorwiegend die verschiedenen Porengrundwasserleiter des Rheins erfassten, wird mit dem Zechstein und Buntsandstein im Raum Kaiserslautern erstmals ein bedeutender Kluftgrundwasserleiter in Rheinland-Pfalz näher beschrieben. Die Untersuchungen haben deshalb auch den Charakter einer Pilotkartierung, da dieser Kluftgrundwasserleiter auf Grund seiner flächenhaften Verbreitung, seiner Mächtigkeit, seines Grundwasserumsatzes sowie seiner vorwiegend forstwirtschaftlichen Nutzung einen bedeutsamen Grundwasserkörper darstellt, der bislang nur in Teilbereichen für die Trinkwassergewinnung genutzt wird.

Den Schwerpunkt dieser Kartierung bildet deshalb der Grundwasserhaushalt.

Die Auswertungen in Form von Karten erfolgte in Geoinformationssystemen (ArcInfo, ArcView), so dass nicht nur eine zeitnahe Fortschreibung der Karteninhalte erfolgen kann, sondern eine Zusammenführung mit Informationen anderer Fachthemen möglich ist.



Direktor des Landesamtes für Geologie
und Bergbau Rheinland-Pfalz
Prof. Dr. Harald Ehses



Direktor des Landesamtes für Wasserwirtschaft
Rheinland-Pfalz
Dipl.-Ing. Sven Lütthje

Inhalt

Vorbemerkung	1
1 Geographisch-geomorphologischer Überblick	3
2 Geologie	6
2.1 Stratigraphische Gliederung des Projektgebietes	6
2.1.1 Karbon und Perm (Permokarbon)	6
Oberkarbon	7
Rotliegend	7
Zechstein	9
2.1.2 Trias	10
Buntsandstein	10
Muschelkalk	14
2.1.3 Quartär	15
2.2 Tektonik	16
3 Böden	18
3.1 Bodenlandschaften	19
3.1.1 Zweibrücker Westrich	20
Oberer Buntsandstein	20
Unterer Muschelkalk	20
3.1.2 Mittlerer Pfälzer Wald	20
3.1.3 Nördliches Sandsteingebiet der Pfälzer Mulde	22
3.1.4 Nordpfälzer Bergland	23
Sedimentgesteine des Rotliegend und Karbon	23
Basische bis intermediäre Magmatite des Rotliegend	24
Saure Magmatite des Rotliegend und deren Konglomerate	24
4 Hydrogeologie	26
4.1 Hydrogeologische Beschreibung der Schichtenfolge	26
4.1.1 Gesteine des Oberkarbon	26
4.1.2 Gesteine des Rotliegend (Sedimente)	26
4.1.3 Magmatische Gesteine des Rotliegend	26
4.1.4 Gesteine des Zechstein	26
4.1.5 Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandstein	27
4.1.6 Gesteine des Oberen Buntsandstein	28

4.1.7	Gesteine des Unteren Muschelkalk (Muschelsandsteinschichten)	29
4.1.8	Lockergesteine des Quartär	29
4.2	Grundwasserleiter-Gruppen	29
4.3	Gebirgsdurchlässigkeit	31
4.4	Fließrichtung des Grundwassers	33
4.4.1	Grundwasserfließrichtung der Grundwasserleiter-Gruppe 3 (GWLG 3)	33
4.4.2	Grundwasserfließrichtung der Grundwasserleiter-Gruppe 2 (GWLG 2)	34
4.5	Meteorologische und hydrologische Verhältnisse	35
4.5.1	Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1979 bis 1998)	35
4.5.2	Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhe (1979 bis 1998)	36
4.5.3	Mittlere jährliche Abflüsse (1979 bis 1998)	39
4.6	Grundwasserabflüsse an Pegeln und Messwehren	41
4.6.1	Grundwasserneubildung nach WUNDT, KILLE und dem MNQ-Verfahren	41
	Mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ)	41
	Grundwasserneubildung nach WUNDT	42
	Grundwasserneubildung nach WUNDT ^{SOMMER}	42
	Grundwasserneubildung nach KILLE	42
4.6.2	Grundwasserneubildung nach NATERMANN im Einzugsgebiet des Schwarzbachs bis zum Pegel Thaleischweiler	42
	Ergebnis	43
4.6.3	Ermittlung von Zuwachsspenden anhand von Stichtagsmessungen	47
	Westlicher Pfälzer Wald und Moosalbtalgebiet	48
	Sickinger Höhe	49
	Sickinger Stufe, Spesbach-Landstuhler Bruch und Untere Lauterhöhen	49
	Kaiserslauterer Becken, Lautertal, Otterberger Wald und Sembacher Platten	49
4.6.4	Abflussspenden ausgewählter Kleineinzugsgebiete zwischen 1991 und 1994	50
4.7	Quellschüttungen	54
4.7.1	Jahresreihe 1992/94 und 2002/03	54
	Charakteristik der beobachteten Quellen	57
	Zuordnung und Einstufung der Quellen	57
4.7.2	Quellabflüsse im Aschbach- und Moosalbtal im hydrologischen Jahr 1983	58
	Quellen im Moosalbtal und Aschbachtal	58
	Quellen der GWLG 3	60
4.8	Grundwasserneubildung	60
4.8.1	Mittlere jährliche Differenzen aus Niederschlag und Verdunstung (1979 bis 1998)	60
4.8.2	Grundwasserneubildung aus Abflussdaten	61
	Grundwasserneubildung im Buntsandstein	61
	Grundwasserneubildung im Karbon und Rotliegend	63

4.9	Hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer	63
4.9.1	Datengrundlage	63
	Organik	63
4.9.2	Zeitreihenauswertung	64
	Kurzfristiges hydrochemisches Verhalten	64
	Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter Quellen	72
	Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit	73
4.9.3	Regionalisierung	78
4.9.4	Allgemeine Charakteristik der Grundwasserbeschaffenheit	78
	Piper-Diagramm	79
	Box-Plots	80
	Wahrscheinlichkeitsnetze	82
	Beschreibung bedeutsamer Wasserinhaltsstoffe	82
	Altersdatierung mittels Isotopen und FCKW	89

Schriften	93
------------------	-----------

Verzeichnis der Kartenanlagen

Karte 1:	Geologie
Karte 2:	Böden
Karte 3:	Hydrologische Grundlagen und Trinkwasserschutzgebiete
Karte 4:	Hydrogeologische Schnitte: A–A' und B–B'
Karte 5:	Hydrogeologische Schnitte: C–C' und D–D'
Karte 6:	Hydrogeologische Schnitte: E–E' und F–F'
Karte 7:	Hydrogeologische Schnitte: G–G' und H–H'
Karte 8:	Grundwasserfließrichtung
Karte 9:	Niederschlag und Verdunstung
Karte 10:	Abflusspenden
Karte 11:	Grundwasserneubildung
Karte 12:	Zuwachsspenden
Karte 13:	Grundwasserbeschaffenheit

Vorbemerkung

Der Raum des ca. 860 km² großen Arbeitsgebietes liegt in den hydrogeologischen Teilräumen „Permokarbon des Pfälzer und Saarbrücker Sattels“ und „Südwestdeutscher Buntsandstein“. Während das Gebiet der Oberkarbon- und Rotliegend-Gesteine als Wassermangelgebiet bezeichnet werden kann, befinden sich im Zechstein und Buntsandstein des Raumes Kaiserslautern relativ große Wasserwerke mit z. T. überregionaler Versorgung. Überdies erfolgen hier größere Entnahmen durch Industrie und Militär.

So betragen die Entnahmen im gesamten Bearbeitungsgebiet für das Jahr 2000 insgesamt 21.445.000 m³/a, davon 18.200.000 m³/a für die öffentliche Trinkwasserversorgung (Ministerium für Umwelt und Forsten 2002).

Im dicht bewaldeten südlichen Teilgebiet spielen anthropogene Stoffeinträge keine bedeutende Rolle. Im Stadtgebiet Kaiserslautern sowie in der Moorniederung sind dagegen Schadensfälle mit wassergefährdenden Stoffen bekannt, deren Sanierungen auf Grund der komplexen hydrogeologischen Verhältnisse große Schwierigkeiten bereiten. Die vorliegende Kartierung mit Darstellung der großräumigen Lagerungsverhältnisse, der Grundwasserfließrichtung, der Grundwasserneubildung und den hydrochemischen Verhältnissen bildet dabei eine sehr gute Grundlage für Gefährdungsbewertungen, Sanierungsplanungen und Überwachungsmaßnahmen.

Sie bietet vor allem wichtige Basisinformationen für die Ausweisung von Trinkwasserschutzgebieten und zur Bewertung von Grundwasserentnahmen im Hinblick auf oberirdische Gewässer und Landökosysteme im Sinne der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG, EU-WRRL). Des Weiteren ist sie wertvoll für künftige Wassererschließungsmaßnahmen, für die sich der Raum des Pfälzer Waldes auf Grund seiner Niederschläge, seiner Nutzung und seines hydrogeologischen Baus besonders anbietet.

Neben Archiv- und Literaturrecherchen wurden die dazu notwendigen Daten vor allem in den 90er-Jahren durch umfangreiche hydrologische Messungen und hydrochemische Beprobungen erhoben und durch Daten anderer staatlicher und kommunaler Stellen ergänzt. Die Datensätze wurden in speziellen Datenbanken mit den Archivdaten der beiden Landesämter und den Daten von Wasserwerksbetreibern zusammengeführt.

Ohne die Unterstützung und Hilfe von anderen staatlichen und kommunalen Stellen, ist ein Kartierprojekt dieses Umfanges nicht möglich. Unser Dank gilt deshalb folgenden Institutionen:

- Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Regionalstelle Kaiserslautern
- Stadtverwaltung Kaiserslautern-Umweltamt
- Technische Werke Kaiserslautern
- Stadtwerke Ramstein-Miesenbach
- Verbandsgemeindewerke Enkenbach-Alsenborn

- Verbandsgemeindewerke Kaiserslautern-Süd
- Verbandsgemeindewerke Landstuhl
- Verbandsgemeindewerke Waldfishbach-Burgalben
- Verbandsgemeindewerke Wallhalben
- Wasserzweckverband Weihergruppe
- Zweckverband Wasserversorgung Westpfalz
- Bundesvermögensamt Kaiserslautern
- Landesbetrieb Liegenschafts- und Baubetreuung, Niederlassung Kaiserslautern
- Umweltbundesamt, Fachgebiet Immission

1 Geographisch-geomorphologischer Überblick

Das Projektgebiet der Hydrogeologischen Kartierung Kaiserslautern erstreckt sich im Westen etwa von Kleinbundenbach über Bruchmühlbach-Miesau und Glan-Münchweiler nach Rutsweiler. Die nördliche Grenze verläuft durch die Ortschaften Jettenbach, Olsbrücken und Schneckenhausen. Der nordöstlichste Ort im Untersuchungsgebiet ist Wartenberg-Rohrbach. Die östliche und südliche Begrenzung erfolgt durch die Ortschaften Enkenbach-Alsenborn, Hochspeyer, Heltersberg und Herschberg.

Die einzige Großstadt ist Kaiserslautern mit ca. 100.000 Einwohnern. Des Weiteren liegen die Städte Landstuhl, Ramstein-Miesenbach und Otterberg mit je über 5000 Einwohnern im Untersuchungsraum. Die Städte Enkenbach-Alsenborn und Bruchmühlbach-Miesau, deren Einwohnerzahl jeweils über 7000 liegt, befinden sich nur teilweise im Projektgebiet. Insgesamt leben im Bearbeitungsgebiet etwa 233.000 Menschen, bei einer über dem Landesdurchschnitt liegenden Einwohnerdichte von 271 EW/km².

Das Gebiet umfasst mehrere naturräumliche Einheiten (Abb. 1-1) (PEMÖLLER 1969). Im zentralen Teil verlaufen von Westsüdwest nach Ostnordost der Ostteil des Peterswaldmoores, der Spesbach-Landstuhler Bruch und das Kaiserslauterer Becken. Der ca. 20 km lange und ca. 2,5 bis 5 km breite Spesbach-Landstuhler Bruch weist eine Höhenlage von 225 bis 310 m NN auf. Aus seiner vermoorten Niederung ragen vereinzelt flache Rücken aus Trifels- und Rehberg-Schichten mit Erhebungen bis zu 245 m NN auf. Das Peterswaldmoor liegt im Untersuchungsgebiet in einem Höhenniveau von 225 bis 280 m NN. Die Höhenlage des reliefreicheren Kaiserslauterer Beckens liegt zwischen 215 und 380 m NN.

Der Anstieg von der Moorniederung nach Norden beginnt mit dem Nördlichen Rand des Pfälzer Gebrüchs mit nur wenigen Grad Hangneigung und führt zu den sanft gewellten Höhenrücken und Kuppen der Unteren Lauterhöhen. Nördlich und westlich der Unteren Lauterhöhen liegen die Obere Lauterhöhe, die Potzberg-Königsberger-Gruppe und das Kuseler Bergland. Die Höhenunterschiede in der Potzberg-Königsberger-Gruppe sind beträchtlich. Während auf dem Potzberg mit 562 m NN der höchste Punkt im Nordteil des Untersuchungsgebietes erreicht wird, liegt im Tal des Glan nördlich von Rutschweiler am Glan mit ca. 201 m NN der tiefste Punkt des Projektgebietes. In ähnlich niedriger Höhenlage befindet sich das Tal der Lauter nördlich von Sulzbachtal.

Östlich der Unteren Lauterhöhen und nördlich des Kaiserslauterer Beckens liegen zwischen einer Höhe von 235 bis 410 m NN der reliefreiche Otterberger Wald und mit Höhen von ca. 270 bis 330 m NN die sanftwelligen Hochflächen der Sembacher Platten. Der nordöstlichste Teil des Projektgebietes liegt im Stumpfwald und der Kaiserstraßensenke.

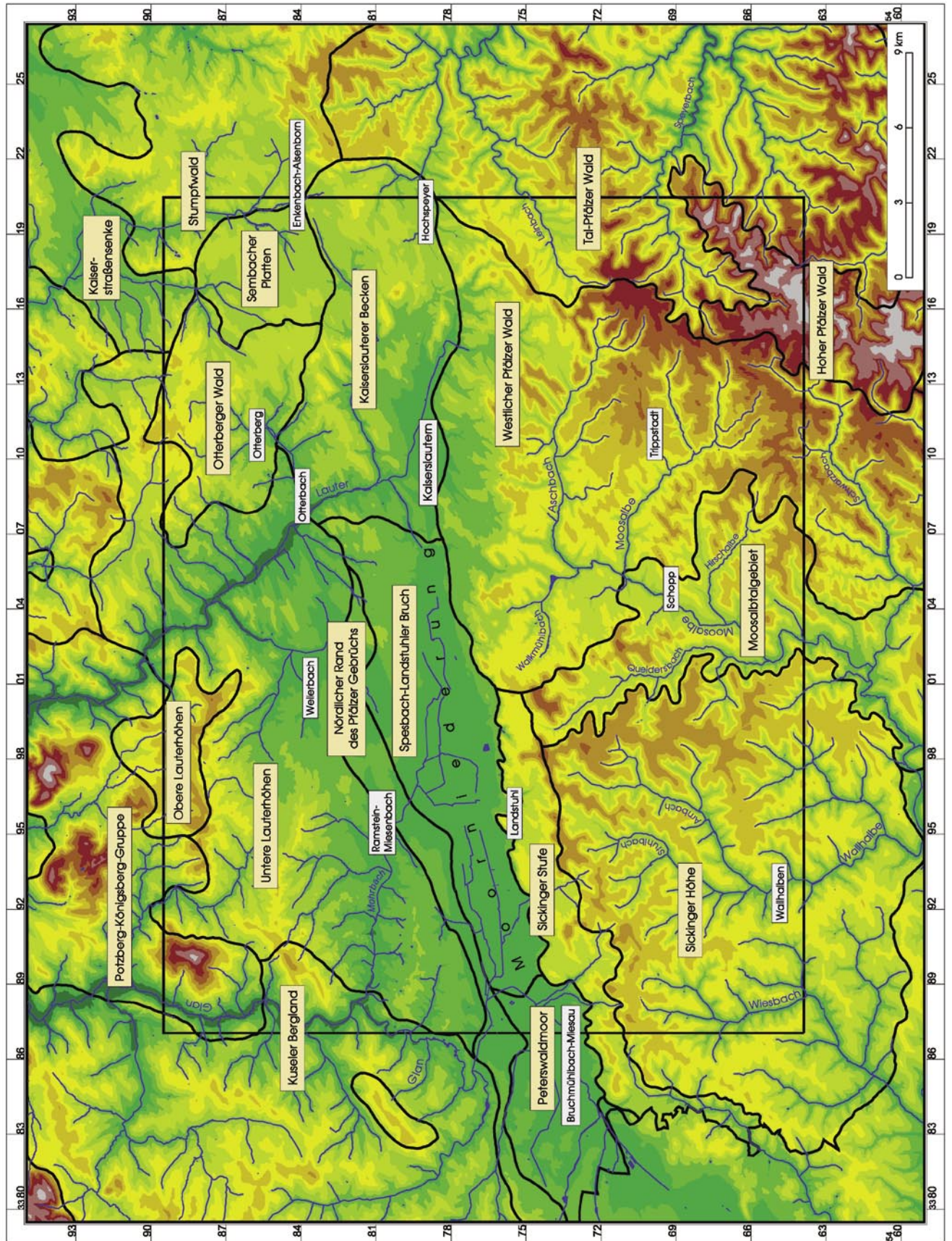
Im Südwesten der Moorniederung bildet die etwa 1,5 bis 3,2 km breite, vorwiegend bewaldete Sickinger Stufe den steilen Anstieg zur Sickinger Höhe. Charakteristisch für die Sickinger Höhe ist der ausgeprägte Wechsel zwischen ackerbaulich genutzten Hochflächen, die im Nordosten über 400 m NN und im Südwesten zwischen 400 bis 300 m NN liegen, und scharf abgesetzten, bewal-

deten Tälern (PEMÖLLER 1969). Östlich anschließend leitet das stark zertalte Moosalbtalgebiet unmerklich zum weitständigen und flach zertalten Westlichen Pfälzer Wald über, der wiederum an den Tal-Pfälzer Wald und an den Hohen Pfälzer Wald angrenzt. Hier wird auf dem Eschkopf mit 608 m NN die größte Höhe des Untersuchungsgebietes erreicht.

Die Entwässerung des südlichen Untersuchungsgebietes erfolgt über Moosalbe, Wallhalbe und Wiesbach in den gemeinsamen Vorfluter Schwarzbach. Dieser fließt über Blies und Saar der Mosel zu. Im nördlichen Teil entwässern die Bäche zur Alsenz, zur Lauter und zum Glan, d.h. über die Nahe in den Rhein. Der Speyerbach und der Leinbach, der dem Speyerbach über den Hochspeyerbach tributär ist, entwässern das Untersuchungsgebiet nach Osten zum Oberrheingraben.

rechte Seite

Abb. 1-1: *Die naturräumlichen Einheiten im Projektgebiet Kaiserslautern (PEMÖLLER 1969).*



2 Geologie

Das Kartiergebiet umfasst Gebietsanteile von zwölf Topographischen Karten 1:25.000. Die hier vorgelegte Geologische Karte (GK) 1:50.000 wurde aus Archivvorlagen zusammengestellt, die sowohl in ihren Maßstäben (GK 10 bis GK 100) als auch hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Qualität sehr verschieden sind (vgl. Karte 1, Bearbeitungsunterlagen). In einem zweiten Schritt wurden Anpassungen der Karteninhalte an die 8 Schnittprofile vorgenommen, die das Untersuchungsgebiet gitterförmig überdecken und die anhand von Bohrbefunden erstellt worden waren (Karte 4 bis 7). Die dabei neu erkannten Verwerfungen mit Versatzbeträgen von bis zu 115 m, die in ihrer Raumlage bislang nicht auskartiert wurden, sind als vermutete Störungslinien in die GK eingebracht worden. Die so revidierten Schichtlagerungsverhältnisse ergaben insbesondere auf dem Blatt Trippstadt (Kartengrundlagen: bayer. Manuskriptkarte vom Anfang des 20. Jh., BECK 1984) umfangreiche Änderungen der Ausbisslinien. Lokal hatten auch die aus Bohrbefunden resultierenden Mächtigkeitskorrekturen erhebliche Auswirkungen auf das Kartenbild (z. B. südlich von Landstuhl, Gebiet EHRBRECHT 1998).

2.1 Stratigraphische Gliederung des Projektgebietes

Die anstehenden Gesteine lassen sich vier stratigraphischen Großeinheiten zuordnen. Basal, im Kartenbild im Norden, im Bereich des Pfälzer Sattels ausstreichend, liegen Magmatite und Sedimentgesteine des Oberkarbon und Rotliegend. Der südliche, weitaus größere Teil des Projektgebietes umfasst das oberpermisch-mesozoische Deckgebirge der Pfälzer Mulde.

Tektonisch handelt es sich dabei um eine flach eingemuldete, NE-SW-streichende Senkungsstruktur. Ihre Achse verläuft etwa auf der Linie Zweibrücken–Bad Dürkheim und taucht mit $0,5\text{--}1^\circ$ schwach nach Südwesten hin ab. In dieser Richtung treten immer jüngere Schichten auf, über dem **Zechstein** (oberes Perm) zunächst **Buntsandstein** (untere Trias) und schließlich **Muschelkalk** (mittlere Trias). Örtlich werden diese noch von Deckschichten des Quartär überlagert.

2.1.1 Karbon und Perm (Permokarbon)

Das Permokarbon im Projektgebiet besteht aus Einheiten des Karbon, Rotliegend und Zechstein. Die Gesteine von Karbon und Rotliegend gehören zum Saar-Nahe-Becken, einem gegen Ende der variskischen Orogenese zwischen Hunsrück/Taunus, Odenwald und Schwarzwald/Vogesen gebildeten Senkungsgebiet, das mit ausschließlich terrestrischen Sedimenten, beckenintern geförderten Magmatiten und wenigen extern geförderten Pyroklastika gefüllt ist.

Die Gesteine des Karbon und Rotliegend sind heute im Norden und Nordwesten des Projektgebietes aufgeschlossen. Die Einheiten des oberpermisch-mesozoischen Deckgebirges unterlagernd sind sie jedoch, wenn auch nach Süden/Südwesten in zunehmender Tiefe, im gesamten Projektgebiet verbreitet.

Oberkarbon

Auf der Geologischen Karte (Karte 1) wurden die Gesteine der Heusweiler- und der Breitenbach-Formation als Oberkarbon zusammengefasst. Gesteine dieses Alters sind nur im äußersten Nordwesten des Kartiergebietes, am Potzberg, aufgeschlossen. Im Zusammenhang mit subvulkanischen Intrusionen wurden hier die oberkarbonischen Gesteine um mehr als 1000 Meter gehoben, so dass sie heute an der Oberfläche anstehen.

Der untere Teil (Heusweiler-Formation) besteht überwiegend aus mächtigen zumeist roten, konglomeratischen Sandsteinfolgen. Selten sind grobe Konglomerathorizonte eingeschaltet. Ton-Siltstein-Horizonte sind in diesem Abschnitt nur wenig vertreten.

Der obere, bis zu 130 m mächtige Teil (Breitenbach-Formation) wird dominiert von überwiegend grau gefärbten Feinsand-, Silt- und Tonsteinen. Im höchsten Abschnitt dieser Wechselfolge sind zahlreiche, meist geringmächtige Karbonatbänke eingeschaltet.

Rotliegend

Das Rotliegend des Saar-Nahe-Beckens wird in Glan- und Nahe-Subgruppe unterteilt, die selbst jeweils nochmals in mehrere Formationen gegliedert sind.

Glan-Subgruppe

Auf der Karte wurden die Formationen der Glan-Subgruppe zu drei petrographisch ähnlichen Teilbereichen zusammengefasst (g1–g3).

Der **untere Teil der Glan-Subgruppe** (g1 = Remigiusberg-, Wahnwegen-, Altenglan- und Lauterecken-Formation) ist geprägt durch eine mehrere 100 Meter mächtige, unter rasch wechselnden Bedingungen abgelagerte, vielfach schwach karbonatische Sedimentfolge. Sie besteht aus grauen und rötlichen, überwiegend limnisch gebildeten Ton-Siltstein-Lagen mit Einschaltungen von bis zu mehreren 10er Metern mächtigen oft rötlichen, fluviatilen (Grob-)Sandstein- bis Konglomerathorizonten. Nicht selten sind in den feinpelitischen Ablagerungen überwiegend geringmächtige Karbonatsteinhorizonte enthalten.

Im **mittleren Teil der Glan-Subgruppe** (g2 = Meisenheim- und Disibodenberg-Formation) überwiegen die feinklastischen Gesteine, die in weiten Bereichen schwach karbonatisch sind. In einer über 1000 Meter mächtigen limnisch(-fluviatilen) Abfolge sind fluviatil und turbiditisch gebildete, bis mehrere 10er Meter mächtige Sandstein- und Konglomerathorizonte eingeschaltet. Relativ häufig sind schwarze, bituminöse Tonstein- sowie geringmächtige Karbonatsteinlagen.

Der **obere Teil der Glan-Subgruppe** (g3 = Oberkirchen- und Thallichtenberg-Formation) besteht an der Basis aus einem 60–100 Meter mächtigen rötlichen, grobsandigen, fluviatil gebildeten Konglomerat (Oberkirchen-Formation). Darüber folgt, als Abschluss der Glan-Subgruppe, eine dem mittleren Teil (g2) ähnliche Abfolge aus grauen Ton-, Silt- und Feinsandsteinen.

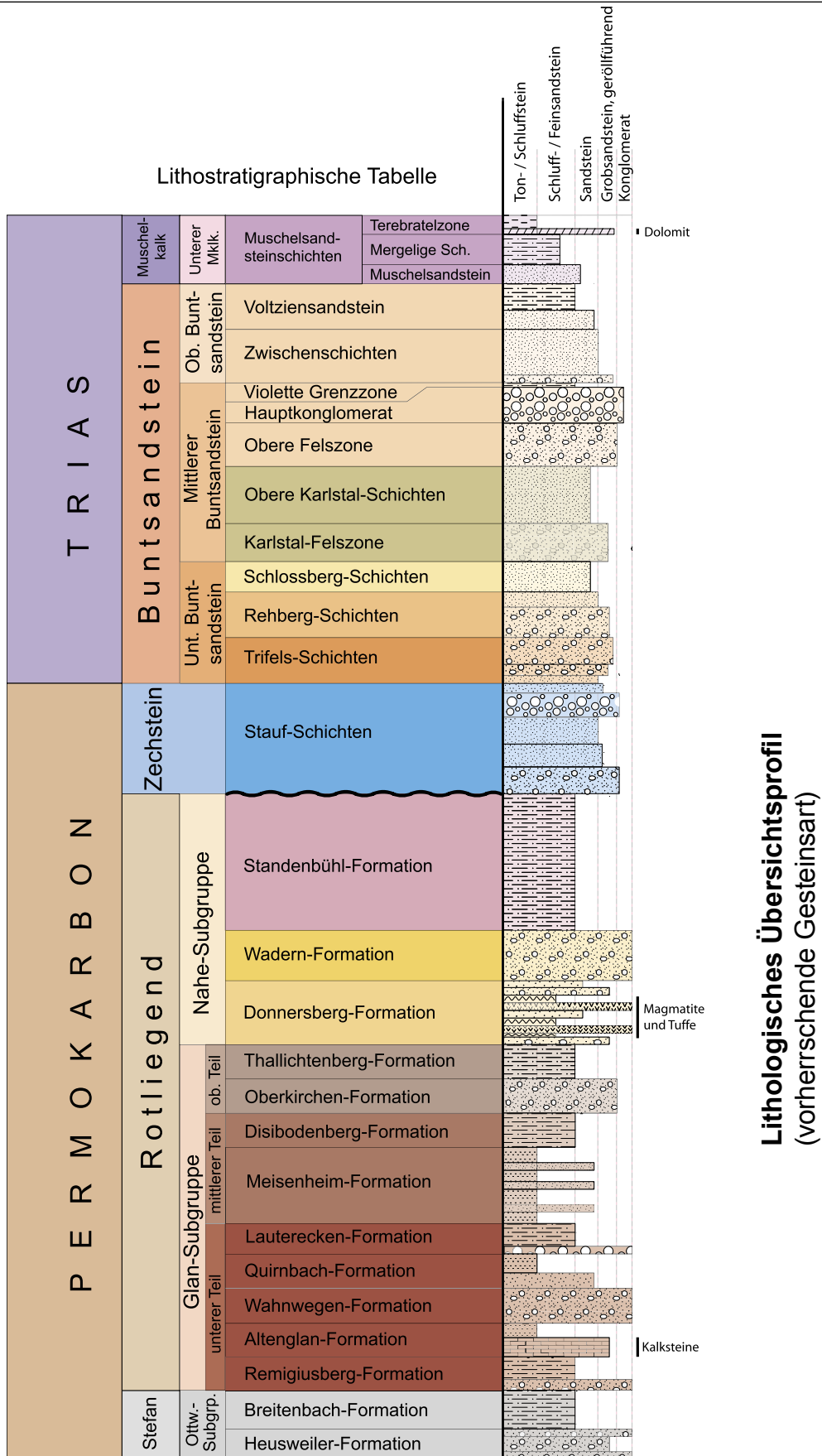


Abb. 2.1: Lithostratigraphie von Karbon bis Trias im Projektgebiet Kaiserslautern. (Mächtigkeiten nicht maßstäblich; Zechstein-Auflagerung winkeldiskordant mit lokalen Schichtausfällen bis zur mittleren Glan-Subgruppe.)

Nahe-Subgruppe

Die Gesteinsabfolge an der Basis der Nahe-Subgruppe ist charakterisiert durch das Einsetzen eines beckeninternen intrusiven/extrusiven Magmatismus. Sie wird als **Donnersberg-Formation** (nD) zusammengefasst.

Konglomeratische, grauweiße bis hellrötliche Arkosen wechsellagern mit überwiegend rötlichen Sand- und Siltsteinen sowie rötlichen und grünlichen Tonsteinen. Darin eingeschaltet sind wenige, z. T. dolomitische Karbonatsteinhorizonte. Sie weisen auf temporäres Bestehen lokaler oder auch regional ausgedehnter Seen hin.

Eingelagert in die Sedimente der Donnersberg-Formation sind im Projektgebiet die als Grenzlager bezeichneten **basaltisch-andesitischen Effusivdecken** (E), die hier Mächtigkeiten von z. T. über 20 m erreichen. Die Magmenförderung begleitend wurden beckenintern großenteils phreatomagmatisch Aschen- und Lapilliaschentuffe gefördert. Diese sowie ihre Umlagerungsprodukte (Tuffite) können Mächtigkeiten von über mehrere 10er Meter erreichen.

Bedingt durch Zerrung bzw. durch Anhebung der auflagernden Sedimente nahmen während der Zeit der Donnersberg-Formation im Projektgebiet einzelne **basische bis intermediäre Dikes und Sills** (I) (magmatische Gänge) in den Basissedimenten der Nahe-Subgruppe, denen der Glan-Subgruppe und der Formationen des Oberkarbon Platz.

Über der Donnersberg-Formation kam die 60 bis 80 Meter mächtige **Wadern-Formation** (nW) zur Ablagerung. Sie besteht aus roten, grobkiesigen Sandstein- und Konglomeratlagen. Die in diesem Teil des Saar-Nahe-Beckens auch als Quarzitkonglomerat bezeichneten Grobschüttungen, deren Hauptliefergebiet die damaligen Hochgebiete am S-/SE-Rand des Saar-Nahe-Beckens (Odenwald, Vogesen/Schwarzwald) darstellen, sind Ablagerungen eines damals hier existierenden weit verzweigten Fluss-Systems.

Die **Standenbühl-Formation** (nSt) ist die jüngste Einheit des Rotliegend im Projektgebiet. Dabei handelt es sich um intensiv rot gefärbte Sandebenen-, Schlammebenen- und Playa-Ablagerungen. Die Formation besteht aus einer bis über 1000 m mächtigen monotonen Wechselfolge roter Feinsand-, Silt- und Tonsteine, die besonders in ihrem Basisbereich vereinzelt grobsandig-feinkonglomeratische Lagen beinhalten können.

Zechstein

Die **Stauf-Schichten** (zSt) repräsentieren eine grobklastische Uferfazies des Zechstein-Beckens. In allen bisherigen geologischen Kartenwerken galten sie als die älteste Buntsandstein-Einheit. Ihre Einstufung in das obere Perm ist jedoch sowohl lithofaziell als auch durch Profil-Korrelationen untermauert worden (DITTRICH 1996, LGB in Vorb.). In der nördlichen Pfalz existiert eine Winkeldiskordanz zwischen höherem Rotliegend und basalem Zechstein. Die Stauf-Schichten überlagern dort nach Nordwesten und Westen hin immer ältere Rotliegend-Gesteine. Ein solches diskordantes Übergreifen bestand ursprünglich auch in Richtung Norden, die heutige Verbreitungsgrenze der Stauf-Schichten stellt lediglich eine Erosionsgrenze dar. Generell handelt es sich um fluviatile, intensiv rot bis rotbraun gefärbte, schluffreiche Sandsteine und Konglomerate. Sie dokumentieren verzweigte Flusssysteme, randlich gesäumt von Schwemmfächersedimenten.

Kernsprünge, vereinzelte Windkanter und die Oberflächenbeschaffenheit mancher Gerölle belegen aride, äolisch beeinflusste Milieubedingungen im Hinterland. Der Schluffgehalt der Sandsteine und Konglomerate ist sekundärer Natur. Er geht maßgeblich auf verwitterte Komponenten der ehemaligen Sandfraktion (Feldspäte, instabile Lithoklasten) zurück. Charakteristisch sind hohe Gehalte an Geröllen und Sanden, die aus dem nahegelegenen nördlichen und nordwestlichen Hinterland (Nordpfälzer Bergland) abzuleiten sind. Mehrere Geröllprovinzen sind zu unterscheiden. Ein nach Südosten bzw. Süden gerichteter Materialtransport wird deutlich. Die zahlreichen, mit braunschwarzem Fe-Mn-Mulm erfüllten Hohlräume und das mürbe Korngefüge in gebleichten oder bunten Sedimentpartien gehen auf ausgewitterte, primär punktuell angereicherte Dolomitbindemittel zurück. Vereinzelt sind noch helle, wolkig-schlierige oder konkretionäre dolomitische Zemente erhalten geblieben.

Die Gesamtabfolge der Stauf-Schichten ist lithostratigraphisch weiter untergliedert. Über einem mehrere 10er Meter mächtigen Basisbereich mit Sandsteinen und Konglomeraten („Grundkonglomerat“) folgen die relativ homogenen, massig erscheinenden „Formsande“. Sie sind wenige Meter bis 45 m mächtig. Es sind intensiv rot bzw. hellrostbraun gefärbte, nahezu geröllfreie Fein- bis Mittelsandsteine (lagenweise grobsandig) mit merklichem Schluffanteil und geringer Verbandsfestigkeit. Das erosiv aufgreifende „Konglomerat von Schwedelbach“ bildet die Basis der Oberen Stauf-Schichten. Es ist eine maximal 50 m mächtige, weitgehend geschlossene Grobschüttung. Die am Top einzelner Kornverfeinerungszyklen zwischengeschalteten schluffigen Sandsteine und die einige Meter mächtigen Formsande der obersten Stauf-Schichten entsprechen lithofaziell denen der Unteren Stauf-Schichten.

Die zSt-Mächtigkeiten liegen zwischen 70 und etwa 270 m. Auf der tektonischen Hochscholle bei Kaiserslautern und im Nordosten des Projektgebietes treten 70 bis 95 m zSt auf, in der Region Weilerbach–Ramstein sind es Werte von über 140 m. Dieses sehr inhomogene Mächtigkeitsmuster wird sowohl durch primäre beckenenkungsbedingte Unterschiede als auch durch (mindestens) eine Diskordanzfläche innerhalb der Gesamtabfolge der Stauf-Schichten hervorgerufen (Grenze Untere/Obere Stauf-Schichten, vgl. dazu DITTRICH 1996, LGB in Vorb.).

2.1.2 Trias

Buntsandstein

Im Unteren und frühen Mittleren Buntsandstein existierte eine eher wüstenhafte Flusslandschaft bei aridem bis semiaridem Klima, geprägt durch ein regionales Nebeneinander von äolischer und fluviatiler Sedimentation.

Die **Trifels-Schichten** (sT) sind eine durchgehend fluviatil entstandene Gesteinsabfolge. Meist sind es Schichtstapel von wechselnd geröllführenden, kieselig gebundenen Mittel- bis Grobsandsteinen, die wegen ihrer Bankmächtigkeiten im Meterbereich ein sehr massiges Erscheinungsbild aufweisen.

Die sT-Mächtigkeiten liegen bei 76 bis ca. 150 m. Dabei ist eine generelle Zunahme nach Südsüdosten zu verzeichnen. Das Mächtigkeitsmaximum wurde am Bahnhof Karlstal auf Blatt Trippstadt erbohrt (= Bereich der ehemaligen Achse der nördlichen Pfälzer Teilsenke).

Im Nordwesten, bei Landstuhl, sind in den unteren Trifels-Schichten vielfach dünnplattige bis feinschichtige, tonig-schluffig-sandige Einschaltungen mit einzelnen dünnen Gerölllagen vorhanden. Es sind abseits der hochenergetischen Strömungskanäle gebildete Hochflutsedimente. Einzelne gut gerundete, mattierte Quarzkörner dokumentieren äolisches Milieu in unmittelbarer Nachbarschaft der Flussläufe.

Der auflagernde, weitaus mächtigere Teil der Trifels-Schichten („Trifels-Felsregion“) wird von metermächtigen kompakten, schräggeschichteten, etwas geröllführenden Sandsteinen, so genannten „Felszonen“, aufgebaut. Trennende Tonlagen oder -linsen sind selten. Die Farben der Sandsteine reichen von violettrot über blassrot zu ockerbeige. Kaolinisierte Feldspäte sind häufig.

Auf Grund einer schwachen Verkieselung durch sekundäre Quarzsprossung in die Porenräume hinein zeigen sich im Licht einspiegelnde Kristallfacetten. Dennoch haben die Sandsteine eine hohe Porosität. Millimetergroße, rundliche, braune Flecken, in der älteren Literatur fälschlich als „Pseudomorphosen“ bezeichnet, gehen auf abgelaugte punktuelle Dolomitzeimente zurück. In Tiefbohrungen sind solche frühdiagenetischen Karbonatzemente im Sandstein unverwittert erhalten geblieben.

Oberhalb der fluviatilen Trifels-Schichten erscheint mit den **Rehberg-Schichten** (sR) eine 95–135 m mächtige Wechselfolge von verkieselten, fluviatil gebildeten „Felszonen“ und nicht verkieselten, teilweise äolisch beeinflussten „Dünnschichten“. Letztere nehmen anteilmäßig zum Hangenden hin zu.

Die dreiteiligen Karlstal-Schichten älterer Auffassung (sK1–sK3; Untere, Mittlere, Obere Karlstal-Schichten) wurden hier aufgetrennt in die Schlossberg-Schichten (sS) und eine neu gefasste Einheit Karlstal-Schichten (sK), welche nur noch die Karlstal-Felszone und die Oberen Karlstal-Schichten einschließt. Grund für diese Abtrennung und Umbenennung der vormaligen Unteren Karlstal-Schichten war die Tatsache, dass die Basis der Karlstal-Felszone mit der bundesweit ausgehaltenen Grenze Unterer/Mittlerer Buntsandstein zusammenfällt. Es ist dies einer der markantesten sedimentologischen Umschwünge innerhalb der pfälzischen Buntsandstein-Abfolge. Über mehreren 10er Metern äolischer Sandsteine des sS („sK1“) als Abbild einer langfristig stabilen Wüstensituation folgen in der diskordant auflagernden Karlstal-Felszone grobe, relativ frische Sedimente eines hochenergetischen, sehr wasserreichen Flusssystemes (vgl. dazu LGB in Vorb.).

Die **Schlossberg-Schichten** (sS) bestehen überwiegend aus Dünnschichten. Es dokumentiert sich ein weitgehend äolisch gesteuertes Sedimentationsgeschehen mit vielfach wiederholter Umlagerung. Wenig verfestigte, schluffige Mittelsande überwiegen. Typisch ist ein weites Farbspektrum von weiß über grün bis lila, wobei rote und orangegelbe Farbtöne dominieren.

Die Textur des Gesteins ist deutlich parallelschichtig. Die einzelnen millimeterdicken häufig gradierten Lagen sind Zeugnis einzelner Sandstürme. Der hohe Rundungsgrad der Körner und deren mattierte Oberfläche ist bezeichnend für äolische Sedimente. Geringmächtige Schrägschichtungskörper, oben gekappt, sind die Reste von Wanderdünen. Lagenweise angereicherte, sehr gut gerundete, mattierte Grobsande, so genannte „Kaviarsande“, sind als gut sortiertes Roll- oder Springkorn zu werten. Nur sehr selten sind einzelne dezimetermächtige härtere Bänke eingeschaltet. Netzleisten und Wellenrippeln darauf weisen auf zeitweilige flachgründige Wasserbedeckung im Zwischendünenbereich hin.

Die Mächtigkeiten der Schlossberg-Schichten liegen meist bei 50–70 m, mit Werten zwischen 46 und 90 m schwanken sie jedoch recht stark (Maximalwert bei Landstuhl). Ursache hierfür sind sowohl primäre, beckenenkungsbedingte Unterschiede als auch sekundäre Kappungen vom Top her, unterhalb der su/sm-Diskordanzfläche und unterhalb der lokal erosiv eingreifenden Strömungsrinnen der hangenden Karlstal-Felszone.

Mit der generell gut erschlossenen, meist um 30 m mächtigen **Karlstal-Felszone** (sKF) beginnt der Mittlere Buntsandstein. Die sKF-Mächtigkeiten liegen zwischen 27 und 48 m. Hohe Werte (über 37 m) treten im Südsüdosten des Blattgebietes auf; das Maximum wurde nördlich von Wallhalben auf Blatt Hermersberg erbohrt. Aufgebaut wird die Karlstal-Felszone von einem stark verkieselten, meist deutlich schräggeschichteten, blassroten bis rotgrauen, schwach geröllführenden Sandstein. Zwischen den massigen Bänken sind Dünnschichten eingeschaltet, die lokal bis 7 m mächtig werden können. Die Bankmächtigkeiten schwanken stark, lateral keilen sie oft aus. Lithologisch sind es gut sortierte Mittelsandsteine. Quarz dominiert, Feldspäte und Helloglimmer sind selten. Die Porenräume sind häufig durch sekundäre Quarzspaltung verschlossen.

Die aus Dünnschichten aufgebauten **Oberen Karlstal-Schichten** (sKo) ähneln lithologisch und genetisch den Schlossberg-Schichten. Wieder handelt es sich um schluffige Grob- und Mittelsande mit geringem Verfestigungsgrad. Die Gesteine sind parallel geschichtet, gelegentlich auch schräggeschichtet und variieren farblich von gelb bis intensiv ziegelrot oder rotbraun. Einzelne gebleichte Lagen sind weißgrau gefärbt. Erneut kommen Lagen von besonders gut sortierten, gut gerundeten Sanden vor („Kaviarsande“). Im unteren Abschnitt der Schichtenfolge finden sich vereinzelt noch schwach verkieselte, 5 bis 10 cm, seltener auch einige dezimetermächtige Bänken, die manchmal Wellenrippeln zeigen. Sie bestehen aus Mittel- bis Feinsandstein, sehr selten auch aus gelblichrotem Mittel- bis Grobsandstein mit wenigen kleinen Geröllen.

Die sKo-Mächtigkeit schwankt stark. Die Werte liegen zwischen 40 und 93 m, meist sind es zwischen 55 und 70 m. Regional variierende fazielle Verzahnungen von sKF und sKo sowie eine erosive Kappung der höchsten Oberen Karlstal-Schichten unterhalb der Oberen Felszone spielen dabei eine Rolle.

Die im Bereich der Blätter Trippstadt und Homburg zugrunde gelegten Manuskriptkarten weisen im oberen Teil der Buntsandstein-Abfolge nur eine geringe Auflösung auf. Dementsprechend war es erforderlich, die summative stratigraphische Einheit **Höherer Buntsandstein** (sh) zu schaffen. Sie umfasst den höheren Mittleren und Oberen Buntsandstein mit den stratigraphischen Einheiten Obere Felszone (sOF), Hauptkonglomerat (sHK), Violette Grenzzone (sVG), Zwischenschichten (soZ) und Voltziensandstein (soV), die zwei letztgenannten Einheiten nur in lokaler Verbreitung.

Die **Obere Felszone** (sOF, 9–26 m mächtig) besteht aus geröllführenden, stark verkieselten Mittel- bis Grobsandsteinen mit bogiger bis trogförmiger Schrägschichtung. Bankmächtigkeiten von bis zu 4 m können auftreten. Eingelagerte Dünnschichtenlagen sind geringmächtig, meist unter 30 cm, und eher selten. Partienweise wurde viel äolisch transportiertes Korngut in das fluviatile Sediment eingebettet. Typisch für die unteren Meter sind bis zu 30 cm große, kugelförmige Konkretionen im Sandstein, die als härtere Bereiche herauswittern („Kugelfelshorizont“). Die Farben der Sandsteine reichen von dunkelrot oder rotbraun über hellrot bis graugelblich. Vereinzelt kommen schwärzlichbraune, mulmige Pakete oder tonreichere, intensiv violettstichige Partien vor.

Zum Nordwestrand des Untersuchungsgebietes hin ändert sich die sOF-Fazies. Anstelle einer eher massigen Felszone erscheint eine lockere Abfolge von feinklastischen Sedimenten mit einzelnen 1 bis 3 m mächtigen Felsbänken. Diese enthalten viel umgelagertes „Kaviarsand“-Material. Lokal, so etwa südöstlich Landstuhl, werden sie von metermächtigen bunten, teilweise Manganmulmhaltigen Stillwassersedimenten eingeleitet. Vereinzelt erscheinen darin noch hohe Dolomitgehalte, als Sandstein-Zement oder in Form von Krusten. Auch Karneolanreicherungen kommen vor.

Das **Hauptkonglomerat** (sHK) entstand als Rinnenfüllung in einem tief eingeschnittenen Flusssystem mit starker Strömung. Dementsprechend schwankt die Mächtigkeit. Im Projektgebiet kann sie etwas über 10 m betragen, über weite Bereiche (vor allem im Nordwesten) fehlt das Hauptkonglomerat jedoch (Schichtlücke). Lithologisch ist es meist ein stark geröllführender Grobsandstein, seltener ein echtes Konglomerat. Die Geröllgrößen erreichen den Grobkiesbereich. Kornbindung und Geröllführung sind starken Schwankungen unterworfen; neben verkieselten Partien kommen auch verwitterte, kaum noch verfestigte Bereiche vor, die als Kies abgebaut wurden (vgl. auch LGB in Vorb.).

Die geringmächtige **Violette Grenzzone** (sVG) ist nur lokal entwickelt bzw. nur lokal unter den Grobschüttungen der Zwischenschichten unerodiert erhalten geblieben. Im Südosten (Blatt Trippstadt) fehlen dazu noch detaillierte Kartierbefunde. Im Nordwesten des Projektgebietes, so etwa am Hörnchenbergtunnel (SCHIFFEL 1988), liegt die Violette Grenzzone unmittelbar der Oberen Felszone auf. Es handelt sich um bis 1,5 m mächtige bunte (braunrot, violett, gelb, grün, weißlich-grau), glimmerreiche Feinsedimente mit Dolomitknauern. Südlich Landstuhl sind darin häufig gelblichrote Karneolkonkretionen enthalten.

Die **Zwischenschichten** (soZ) bestehen aus relativ unreifem Material und dokumentieren so die veränderte Paläogeographie des Oberen Buntsandstein mit neuen Abtragungsgebieten des Gallischen Hinterlandes. Ein hochenergetisches, verflochtenes Flusssystem, nach Ostnordosten gerichtet, bildete sich heraus.

Die basalen soZ-Bereiche sind durch unreife, schlecht sortierte Mittel- bis Grobsandsteine mit viel Hellglimmer gekennzeichnet. Typisch sind leicht verkieselte Bänke und zum Teil stark geröllführende Sandsteine mit großdimensionaler Schrägschichtung. Nach oben hin erscheinen feldspat- und hellglimmerreiche, rotbraune bis leicht violette Mittelsandsteine, die zunehmend feinkörniger und schluffreicher werden. Die Farben variieren von überwiegend rotvioletten oder grauroten Farbtönen an der Basis zu rotbraunen Farben zum Top hin. In den oberen 10er Metern sind die Sandsteine oftmals löchrig-kavernös durch nestartig angereicherte, mit Eisen-Mangan-Mulm verfüllte, millimetergroße Hohlräume, die ehemalige Karbonatzemente vertreten. Auch schluff-, ton- und glimmerreiche, rotviolette Partien mit Dolomitkonkretionen kommen vor (Violette Horizonte). Tonstein- und Dolomitgeröllanreicherungen an der Basis von Sandsteinbänken („Dolomitbröckelbänke“) sind ebenfalls typisch.

Die Mächtigkeit der Zwischenschichten schwankt zwischen 40 und 75 m; hohe Werte (über 65 m) treten im äußersten Südwesten des Blattgebietes auf.

Der **Voltziensandstein** (soV) ist 15 bis 25 m mächtig; Werte von über 20 m treten im Bereich der Achse der ehemaligen nördlichen Pfälzer Teilsenke auf (Region Hetttenhausen–N’Weselberg, DECKER 2000, LENDVACZKY 2003). Im vertikalen soV-Profilaufbau stehen sich eine basale Werk-

steinzone und eine obere, eher tonig ausgebildete Lettenregion gegenüber. Es handelt sich dabei um Faziesseinheiten mit kleinräumig wechselnden Mächtigkeitsverhältnissen.

Die meist fein- bis mittelkörnigen, massig-homogenen, braunroten Sandsteine der Werksteinzone wurden in breitflächig mäandrierenden Flüssen abgelagert. Sie sind etwas schluffig, gut sortiert und relativ gleichmäßig feingeschichtet, zum Teil auch schräggeschichtet. Meist weisen sie einen hohen, schichtparallel eingeregelter Glimmergehalt auf und enthalten kleine, bis zu 1 cm große Pflanzenreste.

Die zwischen 8 und 10 m mächtige, petrographisch sehr wechselhafte Lettenregion umfasst zahlreiche, eher feinklastische fluviatile Kleinzyklen. Sie entstanden als küstennahe Stillwassersedimente in einer fluviatilen Tiefebene. Glimmerreiche Sandsteinbänke erreichen nur noch wenige Dezimeter Mächtigkeit, am Top dominieren tonreiche Partien. Die Farben zeigen eine etwas ins Violette gehende dunkelrötliche Tönung. Gebleichte Lagen oder Flecken sind hellrot, gelbgrau oder blaugrünlich.

Anmerkung zum Mächtigkeitsmuster der Buntsandstein-Schichtglieder:

Nicht nur die Auflagerung der Trifels-Schichten auf den permischen Stauf-Schichten sondern auch einige stratigraphische Grenzen innerhalb der Buntsandstein-Abfolge sind als Diskordanzflächen zu werten. Sie sind schwach winkeldiskordant, werden von Schichtlücken ungewissen Ausmaßes begleitet und gehen auf schwache vertikale Relativbewegungen innerhalb des Buntsandsteinbeckens zurück. Eine solche Diskordanzfläche existiert innerhalb der Trifels-Schichten (ggf. auch zwei), eine weitere an der Basis der Karlstal-Felszone und wiederum eine an der Basis der Oberen Felszone; auch der stratigraphische Bereich zwischen der Oberen Felszone und den Zwischenschichten ist vielfach lückenhaft ausgebildet. Dies erklärt die relativ komplexen Mächtigkeitsmuster einzelner Schichtglieder mit ihren zum Teil engräumigen Schwankungen.

Muschelkalk

Muschelkalk-Vorkommen beschränken sich auf die basalen Schichtglieder des Unteren Muschelkalk (Muschelsandsteinschichten, mu1). Dieser ist hier in einer sandig-dolomitisch-mergeligen marinen Flachwasserfazies entwickelt. Maximal 30 m Muschelsandsteinschichten sind im südwestlichen Projektgebiet unerodiert erhalten geblieben und generell sehr schlecht erschlossen (DECKER 2000, LIESCH 2000, SCHAUER 2001).

Der etwa 8–9 m mächtige **Muschelsandstein** (mu1S) bildet die basale Einheit. Es ist eine Wechselfolge von gelblichgrauen oder graugrünen, dolomitischen (Fein-)Sandsteinen und grünlichgrauen, seltener auch rötlichen, mergelig-tonigen Schluffsteinen. Typischerweise sind Fossilien enthalten (i.a. Muscheln u. Trochiten), vereinzelt zeigen sich Lebensspuren. Die glimmerreichen, karbonatischen Sandsteinbänke verwittern gelbbraun, der gelöste Dolomit hinterlässt punktförmige, schwarzbraune Eisen-Mangan-Oxide. Basal sind vereinzelt flaserige (bioturbate) sandige Dolomite eingeschaltet.

Die etwa 20 m mächtigen **Mergeligen Schichten** (mulMe) umfassen schwach tonige, deutlich feinsandige Siltsteine, deren Karbonatgehalt nach oben hin zunimmt. Sie sind graubraun bis grau-grün, teilweise auch rötlich gefärbt. Einige härtere Bänke von dolomitischem Schluffstein oder gelbgrauem, schluffig-sandigem Dolomit (bis 15 cm) sind eingelagert.

Lokal zeigen sich noch geringmächtige Auflagerungsreste der mergelig-karbonatisch entwickelten **Terebratelzone** (mulT). Meist handelt es sich dabei um die vergleichsweise verwitterungsresistente basale Hauptterebratelbank (bis 1 m mächtig, lokal in Einzelbänke aufgelöst). Es ist ein gelblichgrauer, schillführender Dolomit (vgl. LGB in Vorb.).

2.1.3 Quartär

Die Informationen über den Aufbau und die Verbreitung der quartären Sedimente wurden nicht aus den qualitativ sehr inhomogenen geologischen Kartenwerken entnommen. Sie wurden durch Auswertung und Generalisierung aus den homogenen Bodenflächendaten des Fachinformationssystems Boden (FISBO) abgeleitet, das auf den Ergebnissen der Bodenkartierung im Maßstab 1:50.000 basiert. Hierdurch wurden Widersprüche zu den entsprechenden Kartenwerken des Projektes vermieden. Da die großräumigen Siedlungsflächen bei der mittelmaßstäbigen Bodenkartierung wegen der dort vorhandenen anthropogenen Bodenveränderungen und dem häufig hohen Versiegelungsgrad nicht berücksichtigt werden, wurde in diesen Fällen auf ältere Quellen geologischer Informationen zurückgegriffen und entsprechend interpoliert.

Die Ausbissflächen der quartären Einheiten sind aus Gründen der Schwerpunktsetzung auf paläozoische und mesozoische Einheiten in der geologischen Karte stark reduziert. Auch musste auf die Darstellung quartärer Umlagerungssedimente (Fließerde, Hangschutt, Blockschutt) verzichtet werden, die großflächig und in stark wechselnden Mächtigkeiten an den Hängen und im Übergang zu den Talauen verbreitet sind. Die Darstellung der Auensedimente beschränkte sich maßgeblich auf die grundwasserbeeinflussten Bereiche der Talauen. Auensedimente der kleineren Täler wurden vernachlässigt.

Die heutige Landschaft im Raum Kaiserslautern ist geprägt durch Prozesse, die durch klimatische Wechsel im Quartär induziert wurden. Während den Kaltzeiten des Pleistozän wurden feinkörnige Sedimente aus den trocken gefallen Flussbetten ausgeweht und auf den umliegenden Hängen als **Löß** abgelagert. Karbonatauswaschung und Verwitterung ließen aus dem Löß **Lößlehm** entstehen. Starke Winde konnten das aus der Verwitterung des Zechstein und Buntsandstein entstandene Material zu **Flugsand** akkumulieren. Die ursprünglichen Mächtigkeiten sind durch spätere Erosion stark reduziert. Kleinräumig blieben Flächen größerer Mächtigkeit (> 1 m) erhalten, die in der geologischen Karte dargestellt sind.

In den Übergangsphasen zwischen den Kalt- und Warmzeiten wie auch während den sommerlichen Auftauperioden des Dauerfrostbodens wurden periglaziale Schuttdecken gebildet. Sie setzen sich aus schuttführendem Lehm mit unterschiedlichem Steinanteil zusammen. Hingegen haben die Bäche im Projektgebiet kaum Spuren aus älteren Warm- und Kaltzeiten hinterlassen. Terrassenablagerungen blieben nicht erhalten oder wurden auf Grund der geringen Wasserführung der

Gewässer erst gar nicht gebildet. Lediglich aus der letzten Kaltzeit (Weichsel-Kaltzeit) sind großräumig kiesführende Sande im Landstuhler Bruch belegt, die als **Niederterrassen und Hochflut-sedimente** zusammengefasst werden.

Die hohen Grundwasserstände ermöglichten das Aufwachsen eines Niedermoors, dessen Mächtigkeit bis zu 5 m erreicht hatte (SPUHLER 1957). Die **Moorbildungen** sind heute jedoch auf Grund des Torfabbaus häufig gestört und in ihren Mächtigkeiten stark reduziert. Zum Teil wurden Flächen trockengelegt, überschüttet und überbaut. Nur kleinräumig blieben noch Reste des ehemals zusammenhängenden Moores erhalten.

Aus einer Bohrung bei Spesbach wurden Sedimente am Institut für Botanik der Universität Hohenheim von M. Dinies pollenanalytisch untersucht. In dem gut 2 m mächtigen Profil sind ausklingendes Spätglazial sowie jüngstes Holozän überliefert. Der unterste Profilabschnitt (2,0–1,7 m) ist wohl während des Alleröd gebildet worden (Birkendominanz), der folgende knappe Meter (1,7–0,81 m) lässt sich mit der Jüngeren Tundrenzeit parallelisieren (birkenreiche Kiefernwälder). Die oberen 0,8 m des Profils sind sehr jungen Alters (Subatlantikum), Siedlungszeiger sind durchgängig bis zur Oberfläche nachweisbar. Die ausgedehnte Lücke in der Pollenüberlieferung von der Jüngeren Tundrenzeit bis in das Subatlantikum kann einerseits durch eine häufig zu beobachtende jungholozäne Wachstumsunterbrechung, andererseits auch mit Abtorfungen in den letzten 200 Jahren erklärt werden.

Die Bäche außerhalb des Landstuhler Bruchs haben sich tief in die paläozoischen und mesozoischen Gesteine eingeschnitten und abschnittsweise Kerbsohlentäler geformt. In den Talauen sind sandige **Auensedimente** verbreitet, deren Mächtigkeiten i.d.R. zwischen 0,5 und 2 m variieren. Auf die Darstellung von Abschwemmassen als Ergebnis holozäner Abtragungsvorgänge wurde verzichtet.

Die in der Geologischen Karte dargestellten **künstlichen Aufschüttungen** beziehen sich auf Deponieablagerungen unterschiedlicher Mächtigkeit und Zusammensetzung. Kleindimensionierte Altablagerungen wurden nicht in die Karte aufgenommen.

2.2 Tektonik

Im nördlichen und nordwestlichen Teil des Projektgebietes streichen die Gesteine des im Permo-karbon gebildeten Saar-Nahe-Beckens aus. Bedingt durch die bereits synsedimentär einsetzende tektonische und bis zum Ende des Rotliegend weitgehend abgeschlossene Ausgestaltung wurden darin die Gesteinsschichten im Beckenzentrum aufgewölbt. Es entstand der SW-NE-streichende Pfälzer Sattel. Im Projektgebiet besitzen deshalb die Gesteinsschichten, die an der Südostflanke dieses Sattels liegen, ein generelles Einfallen nach Südosten (5 bis 25 Grad) und werden diskordant von den flach lagernden oberpermisch-triassischen Einheiten überlagert.

Der größte Teil des Projektgebietes liegt auf der Nordwestflanke der Senkungsstruktur der Pfälzer Mulde. Hier herrschen südliche und südwestliche Einfallrichtungen vor. Im Gegensatz zum optischen Eindruck in den sehr stark (25fach) überhöhten Profilschnitten sind die Einfallbeträge jedoch gering. Sie liegen maximal bei 3,3°, meist deutlich darunter.

Im Südosten (Profilschnitte B–B', C–C', D–D', H–H'), im Bereich der Blätter Trippstadt und Elmstein, ist bereits ein Wiederansteigen der Schichten nach Südosten zu verzeichnen (mit 0,6–3,3°). Im Südwesten des Projektgebietes, bei Schmitzhausen–Herschberg (Schnittprofile F–F', G–G'), ist die Achse der Senkungsstruktur noch nicht erreicht, dort herrscht noch südwestliches Schicht-einfallen.

Die in den Zechstein- und Trias-Gebieten auskartierten Störungen weisen Maximalversätze von 65–85 m auf, bei Steinwenden (Profilschnitt B–B') sind 115 m anzunehmen. Einen Sonderfall bildet die (NW-SE-verlaufende) Südweststrandstörung der Kaiserslauterner Hochscholle. Sie ist nachweislich bereits an der Wende Perm/Trias (Stauf- und Trifels-Schichten) syndimentär aktiv gewesen und zeigt heute einen Versatzbetrag von über 300 m (ca. 326 m in Profilschnitt A–A'). Bei anderen Störungslinien musste ungeklärt bleiben, ob sie alt angelegt und schon im späten Perm bzw. in der Trias mobil waren. Auffällig sind jedoch engräumige Mächtigkeitszunahmen bzw. -abnahmen in den Schlossberg- und Oberen Karlstal-Schichten.

Prägend für die Schichtlagerung war allerdings nicht nur Dehnungstektonik sondern auch eine kompressive Überprägung im Zuge der Oberrheingraben-Entstehung; Fiederbrüche im Südosten des Untersuchungsgebietes (Blatt Elmstein, vgl. DITTRICH in Vorb.) und vereinzelt anzutreffende horizontale Harnischstriemungen deuten darauf hin. Weiterhin kam es dabei zur Entstehung von zusätzlichen Bruchlinien (SW-NE, NW-SE), die die alt angelegten variskischen Strukturen überlagern. Die auffällige Häufung von Kleinstörungen im Südwesten von Blatt Hermersberg ist gut belegt (vgl. LENDVACZKY 2003) und der besonderen tektonischen Situation in diesem Areal zuzuschreiben. Hier durchsetzen sich nordwestliche bzw. nordöstliche Fortsetzungen der Querstörungszone von Donsieders-Clausen und der Grabenstruktur von Contwig.

3 Böden

Als Boden wird die oberste, belebte Verwitterungszone der festen Erdkruste bezeichnet. Unter Einfluss von Klima, Relief, Exposition und Zeit wurden, unterstützt durch Vegetation und biochemische Aktivität der Bodenorganismen, physikalische und chemische Verwitterungs- und Umsetzungsvorgänge in den bodenbildenden Substraten ausgelöst und gesteuert. Dabei entwickelten sich die verschiedenen Bodenhorizonte, welche in Verbindung mit anderen Merkmalen zur Definition der Bodentypen führen. Boden und Klima als wichtigste Standortfaktoren sind in ihrem Zusammenwirken eng verknüpft und geben den wesentlichen Ausschlag für den Anbau der Feldfrüchte und die Holzartenwahl im Waldbau.

Die Daten des Fachinformationssystems Boden (FISBO) bilden mit ihren horizontbezogenen Angaben Bodenart und Lagerungsdichte die Datenbasis für die flächenbezogene Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes. Sie liefern außerdem die Angaben zu Grundwasserständen, die im Verbreitungsgebiet grundwassernaher Böden Aussagen über das Ausmaß des kapillaren Aufstiegs in den Wurzelraum ermöglichen. Diese Daten werden u. a. benötigt für

- die Berechnung der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag
- die Beurteilung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (Teilaspekt Boden)
- die Bewertung der natürlichen Standortverhältnisse im Hinblick auf die Nitratbelastung des Grundwassers

Die Bodenkarte 1:50.000 (Karte 2) gibt einen Überblick über die Bodenverhältnisse im Untersuchungsgebiet und basiert auf Bodenkartierungen, die im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme im Auftrag des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz in den Jahren 1993 bis 1998 durchgeführt wurden.

Die auf der Bodenkarte flächenhaft dargestellten Bodeneinheiten werden in der Randlegende nach lithofaziellen und bodensystematischen Kriterien gegliedert und erläutert. Sie stellen charakteristische Vergesellschaftungen von Bodenformen dar, die ihrerseits durch die Verknüpfung boden- und substratsystematischer Einheiten definiert sind. Die Beschreibung der Bodenformengesellschaften der einzelnen Legendeneinheiten, bei der jeweils nur die Bodenformen mit den größten Flächenanteilen (Leitbodenformen) berücksichtigt werden können, orientiert sich an der 4. Auflage der bodenkundlichen Kartieranleitung (AG Boden 1996) sowie der Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands (Arbeitskreis für Bodensystematik der DBG 1998). Die Dokumentation der bodenkundlichen Punkt- und Flächendaten erfolgte nach den Richtlinien des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz mit Hilfe von Formblättern und Datenschlüsseln und der abschließenden Übernahme der Daten in das FISBO, so dass alle fachlichen Inhalte und Geometrien in digitaler Form vorliegen.

Der Kartierung liegen die Auswertungen der vorhandenen geomorphologischen und geologischen Karten 1:25.000 zugrunde. Die Bodenverhältnisse wurden dem Kartiermaßstab entsprechend un-

ter anderem mit durchschnittlich 5 Stichproben (ausführlich beschriebene Bodenprofile) pro Quadratkilometer verifiziert. Die Beschreibungen der Bodenprofile wurden anhand von Sondierungen oder natürlichen bzw. künstlichen Aufschlüssen bis zu einer Tiefe von 10 dm (im Bedarfsfall bis 20 dm) unter Geländeoberkante vorgenommen. Hinzu kommen die bodenchemischen und -physikalischen Analysendaten von 48 ausgewählten Bodenprofilen, die zum Zweck ausführlicher Dokumentation und Probenahme aufgedigelt wurden.

3.1 Bodenlandschaften

Um die gebietspezifischen Besonderheiten von Geologie, Morphologie, Klima, Vegetation, bodenbildenden Substraten und Böden darzustellen, wird das Sandsteinareal der Pfälzer Mulde in den Südlichen und Mittleren Pfälzer Wald, in den Zweibrücker Westrich und in ein nördliches Sandsteingebiet differenziert (LOTHHAMMER 1996). Das nördliche permotriassische Sandsteingebiet wird nochmals in die Westpfälzische Niederung, in das Kaiserslauterer Becken, in den Nördlichen Pfälzer Wald und in das Sandstein-Hügelland unterteilt.

Die Grenze zwischen dem Südlichen und Mittleren Pfälzer Wald verläuft etwa an der Linie Pirmasens-Annweiler, die Grenze zwischen Mittlerem Pfälzer Wald und nördlichem Sandsteingebiet erstreckt sich vom Südrand der Westpfälzischen Niederung bis nach Bad Dürkheim. Westlich des Südlichen und Mittleren Pfälzer Waldes liegt der Zweibrücker Westrich. Im Nordosten des Zweibrücker Westrich bildet die Sickinger Stufe den steilen Übergang zur Westpfälzischen Niederung und wird als peripheres Teilgebiet des Mittleren Pfälzer Waldes betrachtet. Die Ostgrenze des Südlichen und Mittleren Pfälzer Waldes wird durch die Ortschaften Bad Bergzabern, Neustadt a. d. Weinstraße und Bad Dürkheim begrenzt.

Die Grenze der Westpfälzischen Niederung deckt sich im Projektgebiet weitestgehend mit dem Verbreitungsgebiet der Moorbildung bzw. der Niederterrassen und Hochflutsedimente im Landstuhler Bruch. Das Kaiserslauterer Becken wird hier im Vergleich zu den naturräumlichen Einheiten (siehe Abb. 1-1) deutlich kleiner gefasst und umfasst in etwa den Bereich des Stadtgebietes Kaiserslautern.

Der Nördliche Pfälzer Wald erstreckt sich im Wesentlichen nördlich der Linie Kaiserslautern–Bad Dürkheim und östlich der Lauter. Westlich der Lauter und nördlich der Westpfälzischen Niederung liegt das Sandstein-Hügelland.

Die ehemals zusammenhängenden tafelartigen Altflächen wurden, besonders im Pleistozän, durch erosive Zerschneidung und Denudation in Plateaus, Bergrücken, Kuppen, Kegel und Hügel, in Täler, Ausraumzonen und intramontane Becken umgeformt.

Im Norden und Nordwesten des nördlichen Sandsteingebietes liegt das von paläozoischen Gesteinen aufgebaute Nordpfälzer Bergland. Die unterschiedlichsten permokarbonischen Sedimentgesteine und die Magmatite des Rotliegend führten im Zusammenwirken mit dem Gewässernetz zu morphologisch abwechslungsreichen Landschaftselementen. Von Flüssen und Bächen zerschnittene Plateaus, Bergrücken und Kuppen, Hügel und weite Terrassenflächen sind landschaftstypische Reliefformen.

Der größte Teil des Projektgebietes gehört bodenlandschaftlich zum Zweibrücker Westrich, zum Mittleren Pfälzer Wald und zum nördlichen Sandsteingebiet. Nur der Nordwestteil des Projektgebietes liegt im Nordpfälzer Bergland.

3.1.1 Zweibrücker Westrich

Das Landschaftsbild wird im Wesentlichen geprägt von den landwirtschaftlich genutzten Hochflächen und den weitgehend bewaldeten Talhängen. Morphologisch bestimmend sind die aus Gesteinen des Höheren Buntsandstein und Unteren Muschelkalk aufgebauten Plateaus.

Oberer Buntsandstein

Im Verbreitungsgebiet der Zwischenschichten und des Voltziensandstein bestehen die bodenbildenden Substrate hauptsächlich aus Verwitterungsprodukten der anstehenden Gesteine mit zum Teil (sehr) hoher Lößlehmkomponente. Die vorherrschende Bodenart ist schwach skelettführender schluffiger bis sandiger Lehm über sandiger bis lehmiger Gesteinsverwitterung, örtlich über Ton (LOTHHAMMER 2003). In der Bodentypengesellschaft überwiegen Braunerden, verbreitet pseudovergleyt, Braunerden über Pelosolen und lößlehmreiche Kolluvisole.

Unterer Muschelkalk

Im Gebiet des Muschelsandstein bildeten sich die meisten Böden aus sandigem bis tonigem Lehm über anstehendem bzw. zersetztem Gestein. Die Vergesellschaftung der lößlehmhaltigen bis -reichen Böden umfasst Braunerden, verbreitet pseudovergleyt, Braunerden über Pelosolen in vorwiegend geneigtem Gelände und Pseudogleye auf Verebnungsflächen mit fehlender natürlicher Dränung.

Auf Mergelgesteinen (Mergelige Schichten) entwickelten sich ähnliche Substrate und Böden wie auf Muschelsandstein. Die vorherrschende Bodenart ist steinfreier bis steiniger schluffiger Lehm, häufig über dicht gelagertem tonigem Lehm und/oder anstehendem Mergel bis Tonstein bzw. deren Zersatz. In Erosionslagen bildeten sich Pararendzinen und örtlich Pararendzina-Pelosole aus Mergeln, Rendzinen entstanden aus Dolomiten. In ebeneren Lagen sind Pelosol-Braunerden bzw. Braunerden über Pelosolen mit Pelosol-Pseudogleyen und Pseudogleyen vergesellschaftet.

3.1.2 Mittlerer Pfälzer Wald

In diesem Gebiet südlich des Lautertales kommen fast ausschließlich Sandböden über Unterem und Mittlerem Buntsandstein, von den Trifels-Schichten bis zum Hauptkonglomerat, vor.

Im Bereich der Trifels- bis Oberen Karlstal-Schichten sind die bodenbildenden Substrate und ihre standortrelevanten Parameter bei Sandböden als sehr ähnlich bis gleich anzunehmen (LOTHHAMMER 2003). Vorherrschend podsolige Braunerden, seltener Braunerden, bildeten sich aus den in Mittel- und Unterhanglagen sowie auf Plateaus vorherrschenden Substraten aus schwach schluffigem, seltener aus schluffigem oder schwach lehmigem Sand, bei schwachen bis mittleren Stein- oder Grusanteilen, über Sand bis Schuttsand oder Schutt.

Im Bereich der Karlstal-Schichten entwickelten sich kleinflächig Hangpseudogleye und Hanggleye an den Übergängen von Hängen zu Verebnungen, wo wasserstauende, tonig-lehmige, lößlehmreiche Unterböden von wasserdurchlässigen, sandigen Oberböden überdeckt wurden. Sind an diesen Stellen breite Mulden ausgeformt, so kommt es örtlich zur Ausbildung von Stagno- und Nassgleyen mit Vergesellschaftung von niedermoorartigen Übergangsmooren (LOTHHAMMER 1996).

In exponierten und erodierten Reliefpositionen, wie z. B. auf süd- bis westexponierten Oberhängen, Plateaurändern, schmalen Rücken, Kuppen und Graten, entwickelten sich stark podsolige Braunerden und Podsol-Braunerden aus gering- bis mittelmäßigem steinigem, schwach schluffigem Sand bis Sand über Sandschutt. In extremen Erosionslagen sowie im Bereich von Felszonen entwickelte sich eine Bodengesellschaft von Braunerde-Podsol, Podsol, Ranker und Regosol aus meist geringmächtigem steinigem Sand bis Schuttsand über Schutt oder Buntsandstein.

Die flächenmäßig vorherrschenden bodenbildenden Substrate des Buntsandstein können stratigraphisch der jüngsten periglazialen Deckschicht, der sogenannten Hauptlage, zugeordnet werden. Diese bildete sich im periglazialen Milieu am Ende des Spätglazials, während der Jüngeren Tundrenzeit, im Bereich des sommerlichen Auftaubodens als solifluidales und/oder solimixtives Gemisch über dauergefrorenem Untergrund. Darin dominieren die Komponenten der Gesteine der näheren und weiteren Umgebung. Beachtenswert sind die hohen Anteile äolisch umgelagerter Verwitterungsprodukte des Buntsandstein, welche sich durch hohe Fein- und Mittelsandanteile bei sehr geringen Grobsandgehalten (< 5%) dokumentieren (LOTHHAMMER 1985). Weitere äolische Beimengungen lieferten der Löß sowie in Spuren auch Bimsminerale der allerödzeitlichen Laacher See-Tephra (AG Boden 1996). Die Hauptlagen der Sandböden im Pfälzer Wald weisen gegenüber dem Liegenden aus Buntsandsteinmaterial deutlich geringere Skelettgehalte auf.

Bezüglich der lößbürtigen Anteile in der Hauptlage sind die meisten Böden des Pfälzer Waldes als frei bis (sehr) arm zu bezeichnen. In verschiedenen kleineren und größeren Vorkommen („Lößinseln“) bestimmen entkalkter Löß, Sandlöß und Lößsand die Textur und das Gefüge der Hauptlagen. Die Böden im Pfälzer Wald zeigen meist eine Mächtigkeit der Hauptlage von etwa 5 bis 7 dm, die je nach Lage und Exposition leicht variiert (EDER 1979). Die Hauptlage weist allgemein eine geringe Lagerungsdichte auf und ist außerhalb holozäner Erosions- und Akkumulationslagen fast überall an der Oberfläche anzutreffen.

Im Liegenden der Hauptlage ist als nächstältere pleistozäne Deckschicht örtlich die Mittellage vorhanden. Auch sie ist ein verlagertes Gemisch aus liegendem und/oder im näheren Einzugsbereich anstehendem Gestein mit einer gelegentlich starken äolischen Komponente aus Löß oder Sandlöß ohne Anteile von Laacher See-Tephra. Der Lößanteil ist in der Mittellage meistens höher als in der Hauptlage, örtlich besteht sie fast ausschließlich aus verlagertem, entkalktem Löß bzw. Sandlöß. Sie ist wesentlich dichter gelagert als die Hauptlage und tritt nur in für ihre Ablagerung und Erhaltung günstigen Reliefpositionen auf, wie z. B. in Hangdellen und -verflachungen.

Die älteste pleistozäne Deckschicht wird als Basislage bezeichnet. Sie stellt ein solifluidales und/oder solimixtives Gemisch aus liegenden oder in näherer Umgebung hangaufwärts vorkommenden Gesteinen ohne wesentliche äolische Komponenten dar (AG Boden 1996). Sie überlagert das anstehende Gestein und dessen unverlagerten Zerfalls- bzw. Zersatzbereich (FRIED 1987). Die im Pfälzer Wald großflächig erhaltenen Basislagen, meistens im Liegenden der Hauptlagen, beste-

hen aus schuttführendem Sand bis Schutt (GLA 1994). Sie sind in exponierten Reliefpositionen weitgehend abgetragen.

Im Hangenden der Hauptlage kann die Oberlage auftreten. Sie besteht überwiegend aus schuttreichem Untergrundmaterial bzw. aus Schutt und ist im Bereich von Felsbildungen und -durchragungen lokal verbreitet. Örtlich kann Material aus dem Liegenden in die Oberlage eingearbeitet sein.

Im Verbreitungsgebiet des Hauptkonglomerat sind die Bodenarten und ihre Schichtung unterschiedlich. Braunerden und podsolige Braunerden aus (schwach) schluffigem, grusigem bis kiesigem Sand sind weit verbreitet. Örtlich treten Regosole aus Sand und Kies über Kies und Geröll auf.

Für die Böden auf Sandsteinstandorten des Pfälzer Waldes ist das Vorkommen bzw. die Beimengung von Lößlehm von zentraler Bedeutung, da aus der Verwitterung der meisten Gesteine keine signifikanten Anteile von Verwitterungsschluff oder -ton in den bodenbildenden Substraten vorhanden sind.

3.1.3 Nördliches Sandsteingebiet der Pfälzer Mulde

Gegenüber den Sandböden des Mittleren Pfälzer Waldes ist hier der standortverbessernde höhere Lößlehmgehalt der bodenbildenden Substrate und das häufigere Vorkommen lößlehmreicher Unterböden in günstigen, meist konkaven Reliefpositionen auffallend (LOTHHAMMER 1996). Im Bereich der Stauf-Schichten herrschen Braunerden aus schwach kiesigem bis steinigem, schluffigem bis lehmigem Sand über Sandsteinersatz vor. Im Gebiet der Trifels-Schichten überwiegen Braunerden aus schwach schluffigem bis schwach lehmigem Sand und in exponierten Reliefpositionen finden sich podsolige Braunerden bis Podsol-Braunerden auf Sand- bis Schuttdecken. Die Vergesellschaftung solcher Bodenformen findet sich auch im Verbreitungsgebiet der Rehberg-Schichten dieses Gebietes (LOTHHAMMER 1985, 1996).

In der Westpfälzischen Niederung ist das Nebeneinander von tiefer liegenden, grundwasserbeeinflussten und höher gelegenen, grundwasserfreien Böden auf den sog. Schachen landschaftstypisch, welche ihre Umgebung inselartig um einige Meter überragen, ähnlich wie die örtlich vorkommenden Dünen und Flugsanddecken. Terrestrische Böden finden sich am Rande der Niederung und auf den Schachen, überwiegend als Braunerden aus schluffigem bis lehmigem Sand über anstehendem Sandstein oder dessen Verwitterungsmaterial. Bei den grundwasserbeeinflussten Böden sind Gleye am häufigsten anzutreffen. Übergangsbildungen von Gleyen zu Mooren sind weit verbreitet. Die ursprünglich großflächig vorhandenen Niedermoore entwickelten sich infolge Grundwasserabsenkung zu Übergangs- und örtlich zu Hochmooren (WALLESCH 1964).

Böden aus Löß und Sandlöß sind im nördlichen Sandsteingebiet der Pfälzer Mulde weiter verbreitet als im Südlichen oder Mittleren Pfälzer Wald (STÖHR 1966, 1969/70, LOTHHAMMER 1985, 1996). Die Substratbegriffe Lößlehm und Sandlößlehm sind im Sinne von entkalktem Löß und Sandlöß zu verstehen. Vorherrschende Bodentypen im Bereich der Lößlehme mit schluffigem Lehm über schluffigem Ton sind Parabraunerden und Pseudogley-Parabraunerden. Die Bodentypengesellschaften im Verbreitungsgebiet der Sandlößlehme aus meist schluffig-lehmigem bis stark lehmigem Sand über sandigem bis sandig-tonigem Lehm zeigen ein breites Spektrum aus

nicht podsolierter, örtlich pseudovergleyter Braunerde, Parabraunerde-Braunerde, Parabraunerde und Bänderparabraunerde bis Pseudogley-Parabraunerde (LOTHHAMMER 2003).

3.1.4 Nordpfälzer Bergland

Sedimentgesteine des Rotliegend und Karbon

Konglomerate, überwiegend quarzitisches, und häufig geröllführende Grob- und auch Mittelsandsteine ergeben mit ihren Verwitterungsprodukten meist saure, skelettreiche Substrate. Ohne merkliche Lößlehmeinflüsse entwickelten sich daraus basenarme Regosole und Braunerden, örtlich mit Podsolierungsmerkmalen, gering verbreitet auch Braunerde-Podsole, welche größtenteils mit Wald bestockt sind. Stärkerer Lößlehmeintrag verbessert die Standorteigenschaften, so dass sich eine Bodengesellschaft aus Braunerden und Bänderparabraunerden entwickeln kann.

Eine Vergesellschaftung von Braunerden, Regosol-Braunerden, Podsol-Braunerden und Bänderparabraunerden aus löblichhaltigem, schutt- oder kiesführendem Schluffsand bis Sandlehm über Sandschutt bis Schutt oder Kies ist häufig im Verbreitungsgebiet von fein- bis mittelkörnigen Arkosen, Sandsteinen mit eingeschalteten Breccien, Tuffen oder örtlichen Terrassenablagerungen ausgebildet.

In Gebieten mit Feinsand-, Schluff- und Tonsteinen, wie z. B. in Schichten der Glan-Subgruppe, entwickelten sich besonders vielfältige Bodenformengesellschaften. Braunerden aus schutt- und löblichführendem Lehm bis Schuttlehm über Lehmschutt bis Schutt oder über Festgestein sind weit verbreitet. Während in Erosionslagen Übergangsformen von Braunerden zu Rankern vorkommen, entwickelten sich in Mittelhanglagen kolluvial überdeckte Braunerden, die in Unterhanglagen von Kolluvisolen überlagert sind. In verschiedenen Tälern des südöstlichen Pfälzer Berglandes treten in Hanglagen Kalkbraunerden und Pararendzinen auf, einerseits bedingt durch residuale Lößvorkommen, andererseits durch karbonatführende Sedimentgesteine mit eingeschalteten Kalksteinlagen.

Auf ebenen bis schwach geneigten Hochflächen treten, besonders häufig im Bereich der tonigen bis feinsandigen Gesteine der Glan-Subgruppe, großflächig tonig-lehmige Graulehne als Reste der mesozoisch-tertiären Verwitterungsdecke auf. Diese bilden infolge ihrer pleistozänen Umlagerung eine verdichtete Schicht, welche meist von locker gelagertem Lößlehm überdeckt ist. Aus dieser Substratschichtung bildeten sich Braunerden über Fersialliten, Pseudogley-Braunerden und Fersiallit-Pseudogley, je nach Relief-, Substrat- und Niederschlagsverhältnissen. Pelosole und Braunerde-Pelosole im Wechsel mit Braunerden finden sich in Gebieten intensiv verwitterter Ton-, Schluff- und Feinsandsteine, wie sie die Sedimentgesteine vom Typ der Standenbühl-Formation darstellen.

Auf Flächen mit starker Lößlehmüberdeckung, welche in mehreren Bereichen des Nordpfälzer Berglandes anzutreffen sind, treten in der Bodenformengesellschaft Parabraunerden mit Übergangsbildungen zu Braunerden und Pseudogleyen auf, wobei in den niederschlagsreichen Gebieten Parabraunerde-Pseudogley und Pseudogley besonders häufig entwickelt sind.

Kolluvisole und Gley-Kolluvisole finden sich vornehmlich in Unterhanglagen und Tälchen aus schutt- und kiesführendem, sandigem bis lehmigem Bodenmaterial; in breiten Auenbereichen der größeren Bäche sind Veggen und Gley-Veggen aus Auensand bis -lehm ausgebildet.

Basische bis intermediäre Magmatite des Rotliegend

Die meist skeletthaltigen bis -reichen Böden werden häufig als Wald aber auch als Ackerland genutzt. In exponierten Lagen, wie z. B. auf Kuppen, Spornen, Plateaurändern und Oberhängen, sind flachgründige, sehr skelettreiche, örtlich mit Blöcken durchsetzte und an Ton und Schluff arme Bodenformengesellschaften ausgebildet: Ranker und Regosole mit Übergängen zu Braunerden geringer bis mittlerer Entwicklungstiefe aus löblehmführendem Sand- bis Lehmschutt über Schutt oder Festgestein sind die wichtigsten Vertreter dieser Trockenstandorte.

Auf Plateaus, in Mittel- und Unterhanglagen sind über den basisch bis intermediären Magmatiten feinerdereichere und skelettärmere Braunerden aus schuttführendem Lößlehm bis Schuttlehm über löblehmführendem Sandschutt bis Schutt oder Anstehendem ausgebildet. In manchen nicht allzu stark geneigten Mittelhanglagen sind die Böden kolluvial überdeckt und gehen in tiefgründige Kolluvisole der Unterhänge über. Vermutlich führte frühere ackerbauliche Nutzung heutiger Waldstandorte zu Bodenabtrag und Akkumulation.

Stauanäseböden treten verschiedentlich im Bereich der Hochflächen auf, besonders in niederschlagsreicheren Gebieten. Pseudogleye bildeten sich dort aus einer skelettarmen Lößlehmschicht als Staunässeleiter über einer ton- und skelettreichen, dicht gelagerten Staunässesohe. Neben der vorherrschenden Staunässe solcher Standorte kann in Geländedepressionen auch Grundwasser auftreten, so dass es zur Ausbildung von Gley-Pseudogleyen kommt.

Viele schmale Tälchen untergliedern die größeren Verbreitungsgebiete der basischen bis intermediären Magmatite. Hier sind die Bereiche der Bachläufe eng mit den flankierenden Unterhanglagen verzahnt, wo Kolluvisole, Gley-Kolluvisole und Gleye aus skelettreichem, sandig-schluffigem Bodenmaterial vergesellschaftet sind.

Saure Magmatite des Rotliegend und deren Konglomerate

Auf sauren Magmatiten bildeten sich vorherrschend skelettreiche und basenarme Standorte, welche überwiegend waldbaulich genutzt werden. In exponierten Lagen, wie Kuppen, Graten und Oberhanglagen sowie bei blockreichen Felsdurchragungen finden sich häufig flachgründige, skelettreiche Böden und solche mit geringer Entwicklungstiefe wie Braunerden, Regosole und Ranker aus schwach schluffigem Sandschutt über Schutt, Blockschutt oder Festgestein.

Am weitesten verbreitet sind Substrate aus löblehmführendem Schuttsand bis Schuttlehm oder Lößlehmschutt über Sandschutt bis Schutt auf Rhyolith. Daraus entwickelten sich in erosionsgeschützten Lagen Braunerden bis Podsol-Braunerden, welche mit Rankern und Regosolen in Erosionslagen vergesellschaftet sind. Die Lößlehmanteile im Solum dieser Böden können sehr stark variieren. Saure Braunerden kommen allgemein dort vor, wo die Feinerde der Böden vom Lößlehm geprägt ist. Mit zunehmendem Sandanteil erhöhen sich die Podsolierungstendenzen. Regional ist zu beobachten, dass die Skelettanteile vieler Böden aus Grus, sehr oft aus Fein- und Mittelgrus, bestehen. Vermutlich ist diese starke Zerkleinerung des Grobbodens nicht nur durch ausgeprägte

Zerklüftung mancher Rhyolithe (LORENZ & HANEKE 1981) und intensive Frostsprengung im Pleistozän bedingt, sondern auch durch ältere Gesteinszersetzung, wie sie während der Ausbildung der mesozoisch-tertiären Verwitterungsdecken wirksam war. Für die Bodengenese hat dies zur Folge, dass sich mit steigendem Feingrusanteil die Anteile der Sandfraktion allmählich erhöhen und dadurch die Podsolierungsprozesse gefördert werden. Auf Plateaus treten mitunter kleinflächig Braunerden aus löblehmführendem über löblehmfreiem Verwitterungssand auf. In Geländedepressionen der Hochflächen finden sich örtlich Pseudogleye, geringer verbreitet Gley-Pseudogleye, aus schuttführendem Schluff und Lehm bis Schuttlehm über verfestigtem Sandschutt bis Schutt aus Rhyolith.

4 Hydrogeologie

4.1 Hydrogeologische Beschreibung der Schichtenfolge

Den größten Teil des Arbeitsgebietes umfassen die Gesteine des Zechstein und Buntsandstein. Es handelt sich um eine Abfolge von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern. Nur im Nord- und Nordwestteil streichen die unterlagernden, in der Regel Grundwasser gering leitenden Gesteine des Rotliegend aus. Hier stehen auch bereichsweise Kluftgrundwasserleiter des Oberkarbon an. Die meist gering durchlässigen Dolomit- und Sandsteinbänke des Muschelkalk überdecken ausschließlich im Süd- und Südwestteil die Schichten des Buntsandstein.

4.1.1 Gesteine des Oberkarbon

Die Gesteine des Oberkarbon stehen im äußersten Nordwestteil des Arbeitsgebietes an. Es handelt sich um sandige Tonsteine und Arkosesandsteine mit Konglomeratbänken, die in der Regel einen gering durchlässigen Kluftgrundwasserleiter bilden. In ihrem Verbreitungsgebiet liegen zahlreiche Quellen, die früher zur Wasserversorgung einzelner Ortschaften der Umgebung genutzt wurden.

4.1.2 Gesteine des Rotliegend (Sedimente)

Rotliegend-Gesteine treten im nördlichen und nordwestlichen Teil des Arbeitsgebietes auf. Sie bauen sich zumeist aus einer Wechselfolge von Ton-, Schluff- und Feinsandsteinen auf, die überwiegend als Grundwassergeringleiter wirken. Höhere Wasserdurchlässigkeiten sind nur in einzelnen Sandstein-, Konglomerat- und z. T. auch Kalksteinbänken zu beobachten. Diese Kluftgrundwasserleiter werden im Arbeitsgebiet wasserwirtschaftlich nicht genutzt.

4.1.3 Magmatische Gesteine des Rotliegend

Kleine Vorkommen von magmatischen Gesteinen finden sich ebenfalls im nördlichen und nordöstlichen Teil des Arbeitsgebietes. Sie weisen im Bereich der Verwitterungszone offene Klüfte auf, die nach der Tiefe zu jedoch meist geschlossen bzw. durch Kalkspat-Tapeten sowie Chalcedon verheilt sind. Daher lassen sich aus diesen Gesteinen keine nennenswerten Wassermengen erschließen und sie sind wasserwirtschaftlich nur vereinzelt von Bedeutung. Bei Wolfstein werden die Stollenwässer eines früheren Bergwerkes noch zur Wasserversorgung mitgenutzt.

4.1.4 Gesteine des Zechstein

Die Stauf-Schichten treten im nördlichen Teil des Arbeitsgebietes mit stark wechselnder Mächtigkeit zutage. Sie bauen sich aus Fein- bis Grobsandsteinen mit wechselnd hohem Schluff-Ton-Gehalt, in Lagen angereicherter Dolomitgehalte und mit häufiger Geröllführung auf. Dabei bilden die grobklastischen Bereiche Kluftgrundwasserleiter, deren Durchlässigkeit je nach ihrem An-

teil an feinkörnigem Material und der Intensität ihrer Klüftung stark wechselt. Die feinkörnigen Bereiche, insbesondere die als Formsande bezeichneten Schichtpartien, stellen dagegen generell Grundwassergeringleiter dar.

4.1.5 Gesteine des Unteren und Mittleren Buntsandstein

Der Großteil des Arbeitsgebietes wird von den Schichten des Unteren und Mittleren Buntsandstein eingenommen. Sie bestehen aus einer Wechselfolge von mürben, dünnschichtigen Sandsteinen und festen, massigen Sandstein-Felsbänken. Ihr Wasserleitvermögen wird von der Matrixdurchlässigkeit, besonders aber von der Durchlässigkeit des Trennflächengefüges bestimmt. Während die Matrixdurchlässigkeit in Dünnschichten und Felsbänken in der gleichen Größenordnung zu liegen scheint, ist die Trennfugendurchlässigkeit in den Felsbänken meist deutlich größer. Daher sind die Sandstein-Felsbänke je nach Ausprägung ihres Trennflächengefüges und ihrer Mächtigkeit in der Regel gute Kluftgrundwasserleiter, während die dünnschichtigen Sandsteine als Grundwassergeringleiter wirken. Schluff-Ton-Lagen kommen in dieser Abfolge nur als Linsen von sehr unterschiedlicher Ausdehnung vor. Sie keilen oft nach kurzer Entfernung aus, so dass sie einen wirksamen, jedoch räumlich eng begrenzten Grundwasserstauer bilden.

Diese Wechselfolge lässt sich in einzelne lithostratigraphische Einheiten gliedern, deren Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit aus den hydrogeologischen Schnitten ersichtlich ist.

Die Basis dieser Abfolge sind die Trifels-Schichten. In ihrem untersten Abschnitt kommen dünnplattige bis feinschichtige, tonig-schluffig-sandige Ablagerungen vor. Der auflagernde, weitaus mächtigere Teil besteht dagegen aus metermächtigen massigen Sandsteinen, in denen sehr vereinzelt auch Tonlagen und -linsen eingelagert sein können.

Die Trifels-Schichten treten im mittleren Teil des Arbeitsgebietes bzw. in der Osthälfte weiter nach Norden reichend zutage. Hier tritt die Schichtgrenze Trifels-/Stauf-Schichten bereichsweise als Quellhorizont in Erscheinung, da die Stauf-Schichten häufig einen StauhORIZONT für die aus den hangenden Trifels-Schichten zufließenden Grundwässer bilden. In weiten Bereichen des Arbeitsgebietes liegen die Trifels-Schichten jedoch unter dem Niveau der Hauptvorfluter. Sie stellen auf Grund ihrer erhöhten Wasserdurchlässigkeit sowie ihrer großen Mächtigkeit den wichtigsten Grundwasserleiter der Pfälzer Mulde dar.

Die Rehberg-Schichten bestehen aus einer Wechselfolge von verkieselten Felsbänken und nicht silikatisch gebundenen Dünnschichten, wobei die Dünnschichten anteilig zum Hangenden hin zunehmen. Letztere bilden Grundwassergeringleiter, während die meist nur wenige Meter mächtigen Felssandsteinbänke gute Grundwasserleiter darstellen. Der Wechsel von gut geklüfteten Felszonen mit geringer durchlässigen Dünnschichten bedingt im Ostteil des Arbeitsgebietes eine Abfolge mehrerer, in der Regel lokaler Quellhorizonte. Quellen treten z. T. an der Basis der Rehberg-Schichten auf, da dieser Grenzbereich häufig durch feinkörnige bis tonige Lagen gekennzeichnet ist. Im Südteil, besonders im Südwestteil, tauchen sie dagegen weitgehend unter Talniveau ab.

Den Kluftgrundwasserleitern der Rehberg-, Trifels- und Stauf-Schichten kommt eine große wasserwirtschaftliche Bedeutung zu. So erfasst im Untersuchungsgebiet ein Großteil aller Brunnen der öffentlichen Wasserversorgung je nach Lage und Tiefe unterschiedliche Abfolgen dieser Grundwasserleiter-Horizonte.

Über den Rehberg-Schichten folgen die Schlossberg-Schichten, die Karlstal-Felszone und die Oberen Karlstal-Schichten. Schlossberg- und Obere Karlstal-Schichten bauen sich überwiegend aus gering leitenden Dünnschichten auf. Felsbänke, die nur von geringer Mächtigkeit sind, spielen eine untergeordnete Rolle. Lagen von „Kaviarsanden“, die sowohl in den Schlossberg-Schichten als auch in den Oberen Karlstal-Schichten vorkommen, bilden geringmächtige Horizonte mit Porengrundwasserleiter-Eigenschaften. Diese sind wasserwirtschaftlich von geringer Bedeutung.

Die Karlstal-Felszone besteht aus mehreren massigen Sandsteinfelsbänken, zwischen denen Einschaltungen von Dünnschichten auftreten. Sie beinhalten damit mehrere Grundwasserleiter-Horizonte, die in weiten Bereichen des Arbeitsgebietes Quellhorizonte an den Talhängen bilden. Dabei sind die Quellaustritte an der Basis der Felsbänke häufig durch Hangschuttüberdeckung in den Ausbissbereich der Schlossberg-Schichten verlegt. Im Südwestteil des Arbeitsgebietes bilden die Felsbänke der Karlstal-Felszone bereichsweise einen zusammenhängenden Grundwasserleiter. Dieser wird durch viele Trinkwasserversorgungsbrunnen erschlossen.

Die Obere Felszone besteht vorwiegend aus stark verkieselten Sandsteinen mit geringmächtigen Einschaltungen aus Dünnschichten. Dieser gute Grundwasserleiter ist im südlichen Teil des Arbeitsgebietes meist ein Schichtglied der Höhenzüge und Bergrücken, wo er häufig markante Quellen speist, die früher wasserwirtschaftlich genutzt wurden.

Das Hauptkonglomerat, ein stark geröllführender Sandstein, ist im Arbeitsgebiet nur lokal im südöstlichen Teil entwickelt. An das Hauptkonglomerat sind ebenfalls räumlich eng begrenzte Quellstockwerke gebunden.

Auch die Violette Grenzzone ist im Arbeitsgebiet nur lokal erhalten bzw. entwickelt. Es sind gering durchlässige Feinsedimente mit Dolomitknauern.

4.1.6 Gesteine des Oberen Buntsandstein

Die im Hangenden der Oberen Felszone bzw. des Hauptkonglomerat und der Violetten Grenzzone folgenden Zwischenschichten bestehen aus einer Wechselfolge von Grob-, Mittel- und Feinsandsteinbänken, die meist hohe Schluffgehalte aufweisen. Zudem sind Ton- und Schluffsteine in die Schichtenfolge eingelagert. Charakteristisches Merkmal der Zwischenschichten sind tonige, partiell ehemals dolomitisch gebundene Sandsteine mit violett gefärbten, tonigen Horizonten sowie Dolomitbröckelbänken. An den Ausbissstellen der Schichtgrenzen von Sandsteinbänken und gering leitenden Ton- und Schluffsteinen treten besonders im Bereich der Sickinger Höhe zahlreiche Schichtquellen auf. Sie wurden früher wasserwirtschaftlich genutzt.

Der Voltziensandstein bildet häufig das höchste Schichtglied der Bergrücken und Höhenzüge der Sickinger Höhe. Grundwasser leitend ist die sog. Werksteinzone, das Basisglied des Voltziensandstein, an deren Liegendgrenze zahlreiche Quellen entspringen. Auf Grund ihrer exponierten Höhenlage bildet sie nur Quellstockwerke von geringer Verbreitung und Bedeutung. Die auflagernde, vorwiegend tonig ausgebildete Lettenregion ist dagegen ein sehr wirksamer Grundwasserstauer.

4.1.7 Gesteine des Unteren Muschelkalk (Muschelsandsteinschichten)

In wenigen Bereichen wird der Voltziensandstein von Gesteinen des Unteren Muschelkalk überlagert. Die nur in geringer Restmächtigkeit vorhandene Abfolge besteht im basalen Teil aus einer Wechselfolge von mergelig-tonigen Schluffsteinen und dünnplattigen oder bankigen, meist dolomitisch gebundenen Sandsteinen. Letztere sind Kluftgrundwasserleiter, die kleinere Quellen auf der Sickinger Höhe speisen, welche jedoch im Sommerhalbjahr meist versiegen. Im Hangenden des Muschelsandstein folgen die Mergeligen Schichten, die sich vorwiegend aus schwach tonigen, deutlich feinsandigen, karbonatischen Schluffsteinen aufbauen und die nur lokal verbreitete, geringmächtige Terebratelzone.

4.1.8 Lockergesteine des Quartär

Quartäre Sande und sandige Kiese stehen sowohl in den schmalen als auch in den größeren Talauen, wie der Westpfälzischen Moorniederung und der Talsenke von Kaiserslautern, unter mehreren Metern Auelehm und gelegentlich auch unter Torf an. Sie bilden einen guten Porengrundwasserleiter, der wasserwirtschaftlich heute jedoch keine Bedeutung hat.

4.2 Grundwasserleiter-Gruppen

Im Arbeitsgebiet wird die Schichtenfolge auf Grund ihrer unterschiedlichen Gesteinsausbildung und ihrer hydrogeologischen Eigenschaften zu Gruppen zusammengefasst (Tab. 4-1).

Die Gesteine des Karbon und des Rotliegend sind überwiegend Grundwassergeringleiter, die nur lokal gute Kluftgrundwasserleiter beinhalten.

Die zahlreichen Grundwasser leitenden Horizonte im Zechstein und im Buntsandstein bilden im Wechsel mit gering leitenden Zwischenschichten mitunter kleinräumig hydraulisch unterschiedlich reagierende Systeme, großräumig heben sich diese Unterschiede jedoch auf Grund tektonisch angelegter Wasserwegsamkeiten sowie fazieller Änderungen auf.

Die in den Stauf-, Trifels- und Rehberg-Schichten vorhandenen Grundwasserleiter sind hydraulisch nicht eindeutig voneinander abgrenzbar. Im regionalen Betrachtungsmaßstab bilden sie einen annähernd homogenen Grundwasserkörper mit meist freiem Grundwasserspiegel. Unter dem Niveau der Hauptvorfluter führen sie gespanntes Grundwasser, deren Druckhöhen jedoch nicht bedeutend voneinander abweichen. Daher wird diese Schichtenfolge als eine Grundwasserleiter-Gruppe zusammengefasst und als Grundwasserleiter-Gruppe 3 (GWL 3) bezeichnet.

Die Trennung dieses großräumigen Grundwasserstockwerks von dem darüber liegenden Grundwasserstockwerk erfolgt nicht durch völlig abdichtende Schichten, sondern durch ein mächtiges gering leitendes Schichtglied.

So wirken über der Grundwasserleiter-Gruppe 3 die überwiegend wenig verfestigten, schluffigen Mittelsande der Schlossberg-Schichten weitgehend als Grundwassergeringleiter.

Tab. 4-1: Grundwasserleiter-Gruppen des Kartiergebietes Kaiserslautern.

Schichtenfolge	Hydrogeologische Funktion	Hydrogeologische Gruppe	
Muschelsandsteinschichten	Grundwassergeringleiter, wenige Grundwasserleiter	Grundwasserleiter-Gruppe 1 (GWLG 1)	Quellstockwerke
Voltziensandstein	Grundwasserleiter im Wechsel mit Grundwassergeringleitern		
Zwischenschichten	Grundwassergeringleiter im Wechsel mit Grundwasserleitern		
Violette Grenzzone	Grundwassergeringleiter		
Hauptkonglomerat	Grundwasserleiter, sehr wenige Grundwassergeringleiter		
Obere Felszone	Grundwasserleiter, sehr wenige Grundwassergeringleiter		
Obere Karlstal-Schichten	Grundwassergeringleiter, wenige Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter	tieferes, großräumig zusammenhängendes Grundwasserstockwerk
Karlstal-Felszone	Grundwasserleiter, sehr wenige Grundwassergeringleiter	Grundwasserleiter-Gruppe 2 (GWLG 2)	
Schlossberg-Schichten	Grundwassergeringleiter, wenige Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter	
Rehberg-Schichten	Grundwasserleiter im Wechsel mit Grundwassergeringleitern	Grundwasserleiter-Gruppe 3 (GWLG 3)	
Trifels-Schichten	Grundwasserleiter, sehr wenige Grundwassergeringleiter		
Stauf-Schichten	Grundwassergeringleiter im Wechsel mit Grundwasserleitern		
Gesteine des Rotliegend	Grundwassergeringleiter, sehr wenige Grundwasserleiter	Grundwassergeringleiter	
Gesteine des Oberkarbon	Grundwassergeringleiter, sehr wenige Grundwasserleiter		

Die überlagernden kieselig zementierten Sandsteinfelsbänke der Karlstal-Felszone bilden dagegen einen ergiebigen Grundwasserleiter mit einem eigenständigen Abflussverhalten in weiten Bereichen des Arbeitsgebietes. Messungen, wie z. B. im Tiefbrunnen II Schafhof und Tiefbrunnen I Schafhof zeigen, dass die Grundwasseroberfläche in der Karlstal-Felszone bis zu 70 m über der mittleren Druckhöhe der Grundwasserleiter-Gruppe 3 liegen kann (HEITTELE, 1993). Die verschiedenen Grundwasserleiter-Horizonte der Karlstal-Felszone werden daher als eine eigene Grundwasserleiter-Gruppe betrachtet und als Grundwasserleiter-Gruppe 2 (GWLG 2) bezeichnet.

Im Hangenden folgen die Oberen Karlstal-Schichten, deren lithologische und hydraulische Eigenschaften denen der Schlossberg-Schichten ähneln. Auch sie bilden vorwiegend einen Grundwassergeringleiter.

In der Oberen Felszone, im Hauptkonglomerat und in den Gesteinen des Oberen Buntsandstein sowie der Muschelsandsteinschichten sind zahlreiche Grundwasserstockwerke ausgebildet. Die Violette Grenzzone, ein Grundwassergeringleiter, ist im Arbeitsgebiet nur lokal erhalten und ist daher kein markanter Trennhorizont.

Da diese Grundwasserstockwerke im Arbeitsgebiet weitestgehend Quellstockwerke mit einem lokalen, kleinräumigen Fließsystem bilden, werden sie hier zur Grundwasserleiter-Gruppe 1 (GWLG 1) zusammengefasst.

Die quartären Sedimente, die häufig einen guten Porengrundwasserleiter bilden, wurden auf Grund ihrer geringen Mächtigkeit und ihrer meist lokalen Verbreitung keiner hydrogeologischen Gruppe zugeordnet.

4.3 Gebirgsdurchlässigkeit

Zur Ermittlung von mittleren Gebirgsdurchlässigkeiten wurden 248 Pumpversuche ausgewertet (Daten aus dem Bohrarchiv und der Pumpversuchsdatenbank des LGB). Die Qualität der Daten variiert stark. Ursachen hierfür sind u. a. Altersspektrum der Daten, Zielsetzung der Versuche, sowie veränderte technische Standards. Dies erschwert zunächst eine gute Vergleichbarkeit der ableitbaren geohydraulischen Kennwerte.

Auf Grund der Einschränkungen hinsichtlich der Datenqualität wurde für die Auswertung der Pumpversuche das vergleichsweise wenige Eingangsdaten benötigende Näherungsverfahren von LOGAN (1964) angewendet. Dieses liefert erfahrungsgemäß hinreichend plausible und im Methodenvergleich gut nachvollziehbare Ergebnisse.

Die Auswertung erfolgte in Form einer Zuordnung der berechneten Werte mittlerer Gebirgsdurchlässigkeit zu Klassen (feste Klassenbreite: eine halbe Größenordnung).

Die Häufigkeitsverteilungen sind entsprechend ihrer hydrogeologischen Zuordnung in der Abbildung 4-1 bis 4-4 dargestellt.

Das Ergebnis der Auswertung lässt sich vergleichend wie folgt darstellen:

- Die für das Unterperm ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte zeigen eine breite Streuung bei gleichmäßiger Häufigkeitsverteilung im Bereich von 5×10^{-4} bis 1×10^{-7} m/s. Die Durchlässigkeiten wurden häufig an Standorten erzielt, die anteilig auch Tal-Alluvionen erschlossen und für die oberirdische Gewässer als mögliche Anreicherungsgrenzen zu berücksichtigen sind (flache Bohrungen, geringe Abdichtungsstrecken). Die geringe Anzahl der Werte spiegelt u. a. die meist geringe Ergiebigkeit der unterpermischen Gesteine wider.
- Für die hangend folgenden Stauf-Schichten zeigt sich eine vom Unterperm deutlich abweichende Häufigkeitsverteilung. Etwa 29 % der Werte fallen in die Klasse $1 - 5 \times 10^{-5}$ m/s und 36 % in die Klasse $1 - 5 \times 10^{-6}$ m/s. Im Bereich dieser Klassen lässt sich somit ein Häufigkeitsmaximum ausmachen. Die übrigen Werte streuen in der Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-7} m/s.
- Für die Trifels- und Rehberg-Schichten lässt sich ein markantes Häufigkeitsmaximum in der Klasse $1 - 5 \times 10^{-5}$ m/s feststellen (40 %). Darüber hinaus zeigt sich eine relativ gleichmäßige Streuung über die Klassen 5×10^{-4} bis 1×10^{-6} m/s. Höhere Durchlässigkeiten (bis 5×10^{-3} m/s) wurden am häufigsten innerhalb dieser Schichtenfolgen angetroffen. Die große Anzahl an Werten spiegelt die im Projektgebiet u. a. auf Grund hoher Ergiebigkeiten stark ausgeprägte Erschließung dieser Schichtenfolgen wider.

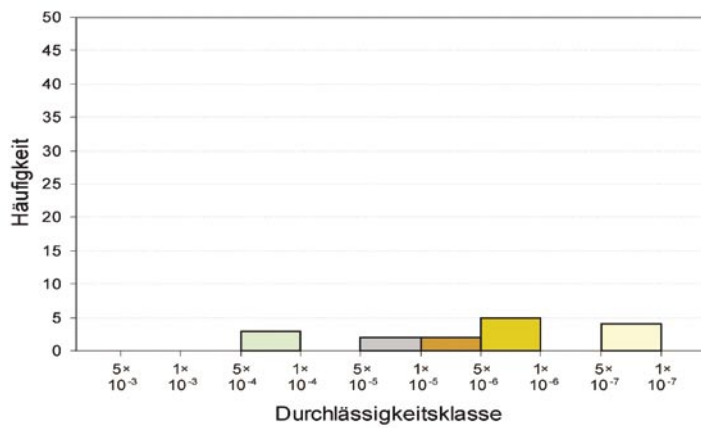


Abb.4-1:
Mittlere Gebirgsdurchlässigkeit k_f in [m/s].
(Unterperm; Pfälzer Sattel; Rotliegend)
(Auswerteverfahren nach LOGAN; n = 16)

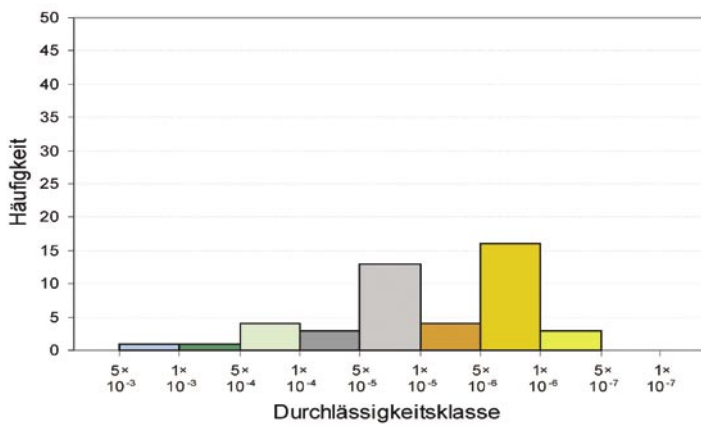


Abb.4-2:
Mittlere Gebirgsdurchlässigkeit k_f in [m/s].
(Oberperm; Pfälzer Mulde; Stauf-Schichten)
(Auswerteverfahren nach LOGAN; n = 45)

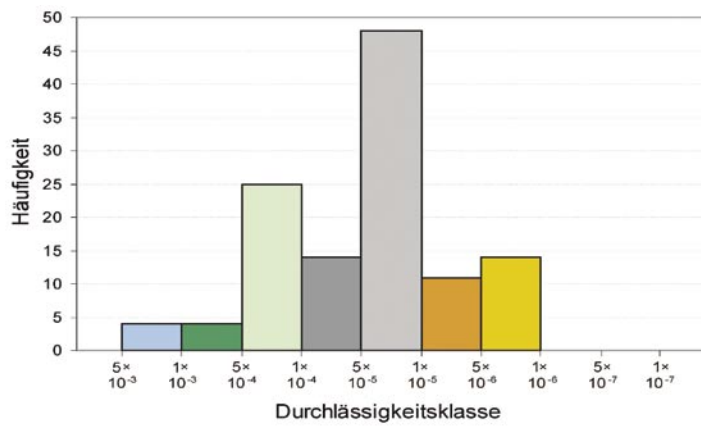


Abb.4-3:
Mittlere Gebirgsdurchlässigkeit k_f in [m/s].
(Buntsandstein; Pfälzer Mulde; Trifels- und Rehberg-Schichten)
(Auswerteverfahren nach LOGAN; n = 120)

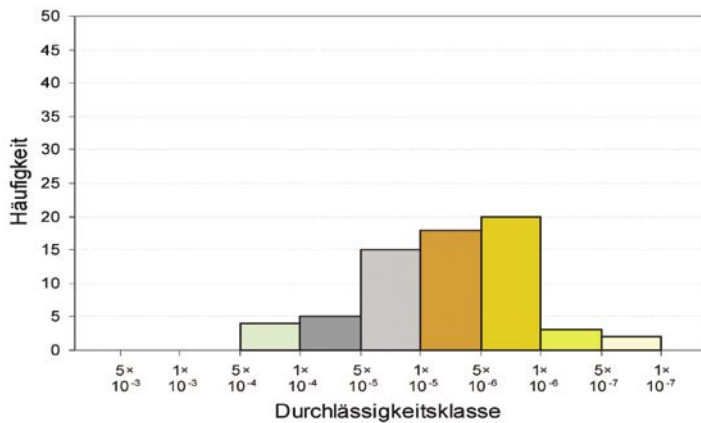


Abb.4-4:
Mittlere Gebirgsdurchlässigkeit k_f in [m/s].
(Buntsandstein; Pfälzer Mulde; Schlossberg-Schichten bis Voltziensandstein)
(Auswerteverfahren nach LOGAN; n = 67)

- Für die Schlossberg-Schichten, Karlstal-Schichten und den hangend folgenden Einheiten des Buntsandstein lässt sich das Häufigkeitsmaximum in den Klassen 5×10^{-5} bis 1×10^{-6} m/s feststellen. Innerhalb dieses Bereiches streuen die Werte sehr gleichmäßig.
- Für die Gesamtheit aller Daten lässt sich eine in den Durchlässigkeitsklassen 5×10^{-4} bis 1×10^{-6} m/s (ca. 90% aller Werte) relativ gleichmäßige Verteilung und damit breite Streuung der Werte feststellen. Das Häufigkeitsmaximum der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte liegt in der Klasse 5×10^{-5} bis 1×10^{-6} m/s.

Aus den erläuterten Häufigkeitsverteilungen ergeben sich Hinweise auf einen zwischen den Stauff-Schichten und dem vergleichsweise gering durchlässigen Unterperm markanten Durchlässigkeitskontrast.

Innerhalb des Buntsandstein werden für die Schichtenfolgen der Rehberg- und Trifels-Schichten die höchsten Durchlässigkeiten festgestellt.

Aus den Pumpversuchen lassen sich bei dem verwendeten Auswerteverfahren keine Hinweise auf die Anteile des Kluft- und Matrixsystems am durchflusswirksamen Hohlraumvolumen in den hydrogeologischen Gruppen ableiten.

4.4 Fließrichtung des Grundwassers

Die Ermittlung der großräumigen Fließrichtungen erfolgte auf der Grundlage eines konzeptionellen Grundwassergleichenplanes. In die Erstellung des Planes flossen neben den Stichtagsmessungen in Brunnen und Grundwassermessstellen zusätzliche Informationen wie z. B. die Lage und die Schüttungsdaten von Quellen und der hydrogeologische Bau ein.

Für die hier vorliegenden großräumig zusammenhängenden Kluftgrundwasserleiter (GWL 2, GWL 3) wurde die Fließrichtung durch Pfeile dargestellt (Karte 8). Angaben zur Höhe des Grundwasserspiegels finden sich in den Hydrogeologischen Schnitten (Karte 4 bis Karte 7).

Da bei geringen hydraulischen Gradienten zeitliche und räumliche Änderungen der Grundwasserneubildung zu größeren Schwankungen der Lage der Grundwasserscheiden führen können und zudem in den Hochlagen nicht genügend Stützpunkte vorhanden sind, wird die laterale Schwankungsbreite der unterirdischen Wasserscheiden als Zone dargestellt.

Im Nahbereich der als hydrogeologische Vorflut wirkenden Flüsse und Bäche stellen sich die Fließrichtungen in Richtung auf die Vorfluter ein. Die lokalen Richtungen werden nicht mit Pfeilen dargestellt und bleiben Detailuntersuchungen vorbehalten.

4.4.1 Grundwasserfließrichtung der Grundwasserleiter-Gruppe 3 (GWL 3)

Die GWL 3 ist mit Ausnahme von Bereichen im Norden und Nordwesten im gesamten Untersuchungsgebiet ausgebildet und besitzt eine geschlossen verbreitete Grundwasserdruckfläche. Sie entwässert in das regionale Vorflutsystem, wobei der Vorfluter in den anstehenden Schichten der GWL 3 liegt oder sich im Hangenden der hydrogeologischen Gruppe befindet.

Der Fließrichtungsplan der GWLG 3 zeigt eine etwa Ost-West verlaufende Grundwasserscheide. Sie liegt weitestgehend südlich der oberirdischen Wasserscheide und trennt einen nach Norden gerichteten Grundwasserstrom von einem Grundwasserstrom, der großräumig nach Süden gerichtet ist.

An diese unterirdische Wasserscheide sind zwei nach Süden verlaufende Grundwasserscheiden angeschlossen, die eng mit den oberirdischen Wasserscheiden zusammenfallen. Sie trennen den Grundwasserkörper des Moosalbtalgebietes und des Westlichen Pfälzer Waldes von dem Grundwasserkörper im Bereich der Sickinger Höhe sowie dem Grundwasserkörper im Bereich des Talpfälzer und Hohen Pfälzer Waldes voneinander ab.

Innerhalb dieser Grundwasserkörper ist die Fließrichtung des Grundwassers weitestgehend auf den Mittel- und Unterlauf der Flüsse und Bäche gerichtet. Im oberen Moosalbtal wirken unter einem Höhengniveau von ca. 330 m NN, im Hirschalbtal von ca. 300 m NN die Bäche als Vorflut für die GWLG 3. Die Vorflutwirkung der Wallhalbe und deren Oberläufe Arnbach und Stuhlbach sowie dem Wiesbach setzt für die GWLG 3 ab einem Höhengniveau von ca. 270 m NN ein.

Der Speyerbach im Südosten des Kartiergebietes schneidet tief in die hydrogeologische Einheit der GWLG 3 ein. Die Fließrichtung des Grundwassers ist somit stark in Richtung des Flusslaufes orientiert.

Nördlich der Ost-West verlaufenden Grundwasserscheide ist der Grundwasserstrom mit einem relativ starken hydraulischen Gefälle nach Norden auf die Moorniederung und das Kaiserslauterer Becken gerichtet. Das Grundwasser wird hier z. T. über ein Netz von Bächen in Richtung Westen, z. T. über größere Bäche wie die Lauter nach Norden abgeführt. In der Moorniederung sind verbreitet geringe (< 2 m) Grundwasserflurabstände anzutreffen.

Weiter nördlich nimmt die Mächtigkeit der GWLG 3 immer weiter ab. Die Fließrichtung der GWLG 3 ist der Morphologie folgend nach Süden gerichtet. Das hydraulische Gefälle ist, wie in der Moorniederung, gering. Grundwasserscheiden sind kleinräumig ausgebildet und richten sich vorwiegend nach den morphologischen Gegebenheiten.

4.4.2 Grundwasserfließrichtung der Grundwasserleiter-Gruppe 2 (GWLG 2)

Die GWLG 2 ist nur im südlichen Teil des Projektgebietes ausgebildet. Ihre Mächtigkeit liegt insgesamt zwischen 27 m und 48 m.

In der GWLG 2 lässt sich ein Gebiet einer morphologisch zergliederten GWLG 2, in der das Grundwasser an Hangquellen austritt und eine schwebende GWLG bildet sowie ein Gebiet mit einer regional zusammenhängenden GWLG 2, in der die Vorfluter an die Grundwasseroberfläche angebunden sind, unterscheiden.

Der zergliederte Teilbereich der GWLG 2 liegt im Westlichen Pfälzer Wald im Bereich des Aschbachs und der Moosalbe sowie im Moosalbtalgebiet in einem Teil der Moosalbe und der Hirschalbe. An den Talrändern bzw. in den Tälern streichen im Liegenden der GWLG 2 die Schlossberg-Schichten als Grundwasser gering leitende Trennschicht zwischen der GWLG 3 und der GWLG 2 aus. Das Grundwasser tritt zumeist an Quellen aus und fließt den Vorflutern zu. In diesem Gebiet

ist keine regional zusammenhängende Grundwasseroberfläche ausgebildet. Im Fließrichtungsplan sind keine Pfeile dargestellt, da die kleinräumige Fließrichtung stark von der zergliederten Morphologie sowie der Lage der Quellaustritte abhängt.

Im Bereich des Oberlaufs der Hirschalbe bis zum südlichen Rand des Kartiergebietes werden die Flächen der zusammenhängenden Grundwasseroberfläche zunehmend größer. Die Moosalbe ist unterhalb des Zusammenflusses mit der Hirschalbe in die zusammenhängende Grundwasseroberfläche der GLWG 2 angebunden. Auch der Queidersbach wirkt etwa bis in die Ortschaft Queidersbach hinein als Vorfluter.

Im Gebiet der Sickinger Höhe ist die Grundwasseroberfläche der GWLG 2 regional zusammenhängend ausgebildet. Das Niveau der Grundwasseroberfläche liegt in den Hochflächen über dem der Grundwasserdruckfläche der GWLG 3. Stromabwärts des Zusammenflusses von Stuhlbach und Arnbach ist dagegen kaum eine Differenz der Grundwasserspiegellage beider Grundwasserleiter-Gruppen zu erwarten. Die Vorflutwirkung der Bäche setzt für die GWLG 2 ab einem Höhengniveau von etwa 280 m NN ein.

Der Fließrichtungsplan für die GWLG 2 zeigt, dass die vorhandenen Grundwasserscheiden mit den entsprechenden oberirdischen Wasserscheiden nahezu gleich verlaufen. Im Gebiet der Sickinger Stufe fließt ein erheblicher Grundwasseranteil der Bruchniederung zu, wobei an den ausstreichenden Schichten der GWLG 2 wenige Quellaustritte zu finden sind. Der Grundwasserzstrom zur Bruchniederung findet offensichtlich flächenhaft statt.

4.5 Meteorologische und hydrologische Verhältnisse

4.5.1 Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1979 bis 1998)

Der Darstellung der mittleren jährlichen Niederschlagshöhen im Zeitraum 1979 bis 1998 liegen nach der Methode REGNIE (DWD 1996–2003) regionalisierte Niederschlagshöhen zugrunde. Die Methode REGNIE bestimmt den räumlichen Ausgleich aktueller täglicher, monatlicher und jährlicher Niederschlagsverteilungen unter Verwendung regionalisierter Niederschlagsbezugswerte des Zeitraumes 1961 bis 1990. Die Werte liegen für ein Raster von 30 geogr. Sekunden längenparallel und 60 geogr. Sekunden breitenparallel für die gesamte Bundesrepublik Deutschland vor.

Dieser Ansatz geht davon aus, dass mit der durchgeführten Regionalisierung der Niederschlagsbezugswerte 1961 bis 1990 in Abhängigkeit von

- Höhe
- geogr. Länge und Breite
- Expositionsrichtung des Geländes und
- Betrag der Exposition

bereits die wesentlichen klimatologischen Besonderheiten der Niederschlagsverteilung erfasst sind. Die verbleibenden Abweichungen in den aktuellen Niederschlagsmessungen an den Stationen werden demgegenüber als witterungsbedingt – „nichtklimatologisch“ – eingestuft.

Die aktuellen Niederschlagshöhen an den Stationen können daher in Form von Relativwerten zum Niederschlagsbezugswert entfernungsabhängig interpoliert und auf das Raster übertragen werden (Hintergrundfeld-Methode). Die für jedes Rasterfeld interpolierten Relativwerte werden anschließend durch Multiplikation mit den absoluten Niederschlagshöhen des Bezugfeldes in mm-Angaben umgerechnet.

Als Hintergrundfelder für die Berechnung der aktuellen täglichen Niederschlagshöhen werden die entsprechenden mittleren monatlichen Niederschlagsbezugsfelder des Zeitraumes 1961/90 verwendet.

Für die vorliegende Darstellung wurden die REGNIE-Werte auf ein 500 m Raster übertragen.

Da die Niederschlagsmessung einen systematischen Fehler (RICHTER 1995) aufweist – sie liefert stets zu geringe Werte – wurden alle Rasterwerte wie folgt in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Temperatur korrigiert (DEMUTH et al. 2001):

Niederschlagskorrektur

Lufttemperatur $\geq 0,5$ °C

$$N_{\text{kor}} = N \times (1,025 + 0,01 \times u)$$

N = unkorrigierter Niederschlag [mm]

Lufttemperatur $< 0,5$ °C

$$N_{\text{kor}} = N \times (1,02 + 0,07 \times u)$$

u = Windgeschwindigkeit [m/s]

Das Kartenblatt (Karte 9) zeigt entsprechend dem Relief des Untersuchungsgebietes deutliche regionale Unterschiede in den mittleren jährlichen Niederschlagshöhen. Im Hohen Pfälzer Wald werden mit Werten zwischen 1130 und 1160 mm die höchsten Jahressummen erreicht. Auch auf der Sickinger Höhe (ca. 1050 mm) und im Bereich von Potzberg und Königsberg spiegelt sich das Relief in höheren Niederschlagssummen wider. Im Landstuhler Bruch und im Kaiserslauterer Becken werden jährliche Niederschlagshöhen von ca. 800 mm erreicht. Die geringsten Niederschläge (650–700 mm) fallen infolge ihrer Lage im Lee der benachbarten Höhenzüge im Bereich Sembacher Platten und Stumpfwald im Nordosten des Kartenblattes.

4.5.2 Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhe (1979 bis 1998)

Unter Verdunstung (Evapotranspiration) wird der Übergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand verstanden. Dieser Phasenübergang vollzieht sich sowohl an belebten (Vegetationsdecke) wie auch an unbelebten Oberflächen (Wasser, Fels, Boden) und wird von den aktuellen Wetterbedingungen und der Vegetation angetrieben. In die Wasserbilanz geht die Verdunstung als Verlustgröße ein und limitiert damit das nutzbare Wasserdargebot.

Eine verlässliche Ermittlung der Verdunstungshöhe ist besonders schwierig, da sie nicht direkt messbar ist und weil beim Verdunstungsvorgang neben rein physikalischen auch biologische Prozesse beteiligt sind. Zudem kann die Verdunstung räumlich und zeitlich stark variieren, was vor allem auf die häufig wechselnden Standorteigenschaften wie Topographie, Meereshöhe, Landnutzung oder Bodenbeschaffenheit und die klimatische Variabilität zurückzuführen ist.

Für das vorliegende Kartenblatt erfolgte die räumlich differenzierte Berechnung der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe im Zeitraum 1979 bis 1998 mit dem Verdunstungsmodell TRAIN (MENZEL 1997). Die Struktur des Verdunstungsmodells ist in Abb. 4-5 dargestellt. Das Simulationsverfahren besteht aus einer Abfolge selbständiger Teilmodelle. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten kurz charakterisiert:

- Strahlungsberechnung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einstrahlungs- und Abschattungsbedingungen
- Angaben zu unterschiedlichen Landnutzungen, wie z. B. Wuchshöhe, Blattflächenentwicklung, Albedo
- Schneedeckenaufbau, Schneeschmelze sowie Verdunstung von Schnee- und Eisflächen
- Interzeption und Interzeptionsverdunstung
- Verdunstung der Pflanzen (Transpiration) in Abhängigkeit des aktuellen Entwicklungszustandes der Vegetation, der Bodenfeuchte und der Witterungsbedingungen: das Teilmodell zur Berechnung der Transpiration basiert auf der Penman-Monteith-Beziehung. Für die erforderliche Bereitstellung von Bestandeswiderständen wird auf den Ansatz von MENZEL (1997) zurückgegriffen.
- Verdunstung der offenen Wasserflächen (Evaporation)
- Aktuelle Wasserverfügbarkeit im Boden: im Boden-Teilmodell liegt der Schwerpunkt auf der möglichst realitätsnahen Prognose des für die Pflanzen und damit für die Transpiration nutzbaren Bodenwasser-Angebotes. Angaben zur nutzbaren Feldkapazität, bezogen auf die durchwurzelbare Tiefe, wurden auf der Grundlage von Bodeninformationen des Landesamt für Geologie und Bergbau bereitgestellt. In Abhängigkeit des Wasserspeichervermögens der Böden wird die Wasserleitfähigkeit zur Beschreibung der Perkulationsgeschwindigkeit im Boden festgesetzt. Kapillarer Aufstieg ist in der derzeit verwendeten Version von TRAIN noch nicht berücksichtigt.

Die zur Berechnung notwendigen meteorologischen Daten entstammen dem Klima- und Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes. Für die flächenhafte Interpolation der Klimadaten wurde eine Kombination (mit Ausnahme des Niederschlags, siehe Kap 4.5.1) aus höhenabhängiger Regression und Abstandsgewichtung verwendet (SCHULLA 1997). Weitere von TRAIN benötigte Datensätze sind die Landnutzung (CORINE (StBA 1997)), das digitale Höhenmodell und davon abgeleitete Informationen zu Hangneigungen und Expositionen.

Zur flächendifferenzierten Modellierung der Verdunstung wurde das Untersuchungsgebiet in ein regelmäßiges Gitter mit 500 m Maschenweite unterteilt. Sämtliche meteorologischen Daten standen als Tagessätze, interpoliert auf das Gitternetz, zur Verfügung. Für jede Gitterzelle konnte die aktuelle Verdunstung somit in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1978 bis 1998 berechnet werden.

Das vorliegende Kartenblatt gibt die Jahresmittel der aktuellen Verdunstung der 20-jährigen Referenzperiode wieder. Durch die Kombination der Einflüsse von Klima, Höhenlage, Exposition, der Landnutzung sowie der Bodenbeschaffenheit ergibt sich ein äußerst flächendifferenziertes

Bild der Verdunstung. Wie für das gemäßigte Klima und die mittleren Höhenlagen im Untersuchungsgebiet zu erwarten, spiegelt die Verdunstung aber vor allem die unterschiedlichen Landnutzungen wider.

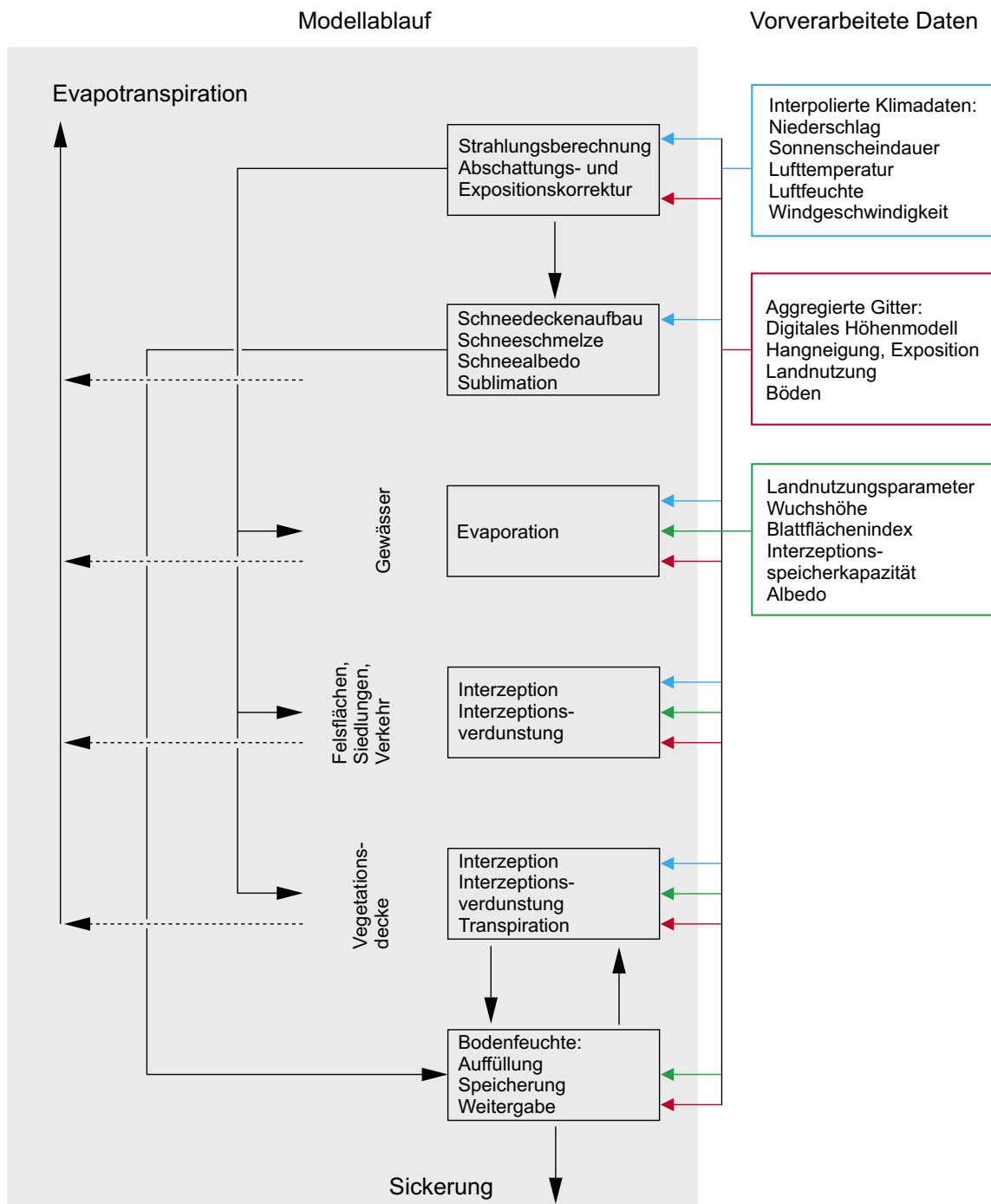


Abb. 4-5: Struktur des Verdunstungsmodells TRAIN.

Deutlich erkennbar ist der Westliche Pfälzer Wald, der Tal-Pfälzer Wald und der Hohe Pfälzer Wald. Hier macht sich die hohe Verdunstung (~ 650 mm) des Waldes bemerkbar. Auch die waldbestandenen Flächen im Spesbach-Landstuhler Bruch, im Kaiserslauterer Becken und im Otterberger Wald erreichen hohe Verdunstungswerte, da die Böden sowie die klimatischen Bedingungen der Transpiration gute Voraussetzungen bieten. Nur in den Waldbereichen am nordöstlichen Rand des Untersuchungsgebietes wird die Verdunstung durch die geringen Niederschlagshöhen begrenzt.

Die von Siedlungen, Industrie und Verkehr beanspruchten Flächen heben sich durch vergleichsweise niedrige Verdunstungswerte heraus. Auf den ersten Blick fallen hier die Stadt Kaiserslautern und der Flugplatz Ramstein im Zentrum des Untersuchungsgebietes auf.

Verdunstungshöhen um 450 mm wurden für die weiten, landwirtschaftlich genutzten Flächen im Bereich der unteren Lauterhöhen, des Kuseler Berglandes und der Sickinger Höhe ermittelt.

4.5.3 Mittlere jährliche Abflüsse (1979 bis 1998)

Zur Darstellung der Abflussverhältnisse wurde eine Regionalisierung der mittleren Abflusswerte ausgewählter Pegel vorgenommen. Räumliche Grundlage für die Regionalisierung bilden die Teileinzugsgebiete entsprechend der Basisversion des Gewässerkundlichen Flächenverzeichnisses von Rheinland-Pfalz (8026 Teileinzugsgebiete) (LfW 2000).

Diese Teileinzugsgebiete variieren hinsichtlich ihrer Gebietsgröße, im Mittel handelt es sich aber um Flächen zwischen 2 und 3 km².

Die Datengrundlage für die Regionalisierung stellen die langjährigen Beobachtungsreihen der Abflüsse dar. Für die räumliche Verteilung werden der mittlere Niederschlag und die mittlere tatsächliche Verdunstung herangezogen. Damit sind implizit auch die klimatischen Verhältnisse, die Landnutzung und die Bodenverhältnisse berücksichtigt.

Die 20-jährigen Reihen (i.d.R. 1979 bis 1998) folgender im Gebiet liegender Pegel der rheinland-pfälzischen Wasserwirtschaftsverwaltung finden Verwendung:

- Nanzdietschweiler/Glan
- Obermohr/Mohrbach
- Rodenbach/Bruchbach
- Untersulzbach/Lauter
- Würschhäuser Mühle/Wallhalbe

Außerdem gehen die Daten von zwölf weiteren Pegeln in die Berechnungen ein. Diese Pegel liegen außerhalb des Untersuchungsgebietes; deren Einzugsgebiete decken aber Teile desselben ab. Das gesamte von den Pegeln erfasste Einzugsgebiet beträgt etwa die 2,5-fache Fläche des Untersuchungsgebietes.

Da die Daten der Pegel jeweils nur eine summarische Information für ihr Einzugsgebiet geben, werden die räumlich detaillierten Ergebnisse der Niederschlags- und Verdunstungskarten (Karte 9) benutzt, um eine Flächendetaillierung des mittleren Abflusses vorzunehmen.

Die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung lautet:

$$\text{Abfluss} = \text{Niederschlag} - \text{Verdunstung}$$

$$(A = N - V)$$

Alle Glieder dieser Gleichung sind, wie oben dargelegt, bekannt. Maßgebend für den Gebietsabfluss sind die Abflüsse an den Pegeln. Das räumliche Verteilungsmuster kann durch die Differenz von Niederschlag und Verdunstung beschrieben werden. Bei einer Aufsummierung der N-minus-V-Werte im jeweiligen Pegelinzugsgebiet kommt es naturgemäß zu gewissen Abweichungen von den gemessenen Pegelwerten. Da aber die Pegelwerte, wie oben erwähnt, maßgebend sind, wird ein linearer Abgleich der N-minus-V-Werte auf die Pegelwerte vorgenommen. Die anschließende Aggregation erfolgt entsprechend den Teileinzugsgebieten des Gewässerkundlichen Flächenverzeichnisses.

Das sich daraus ergebende Verteilungsmuster führt zu einer den tatsächlichen Verhältnissen sehr nahe kommenden flächendetaillierten Darstellung des mittleren Abflusses (Karte 10). Daher beschreibt die mittlere Abflussspende den im Abschnitt (Elementarzelle des Gewässerkundlichen Flächenverzeichnisses) entstehenden Abfluss. Die Spende wird flächennormiert in der Einheit $l/(s \times km^2)$ angegeben. Im Gegensatz hierzu ist unter dem kumulierten Abfluss die Summe der Abflüsse in m^3/s aus den gewässerkundlichen Elementarzellen entlang des Gewässerverlaufs unter Einbeziehung der Nebengewässer zu verstehen. Hiermit kann der Abfluss an jeder Stelle des Gewässers abgeschätzt werden.

Entsprechend der Landnutzung und der räumlichen Verteilung des Niederschlags ergibt sich ein sehr differenziertes Bild des mittleren Abflusses. Der dicht besiedelte Bereich Kaiserslautern, die Flugplätze Ramstein und Sembach wie auch viele kleine Ortschaften zeichnen sich durch hohe Abflussspenden auf Grund der geringen Verdunstung dieser Flächen aus. Der Landstuhler Bruch weist dagegen relativ geringe Abflussspenden auf. Dies ist zum einen durch die hohe Verdunstung im Bruchgebiet selbst (verdunstende Waldflächen in Verbindung mit Grundwasseranschluss des Wurzelraumes), zum anderen durch die in diesem Raum relativ geringen Niederschläge bedingt.

Die nordwestlich anschließenden Gebiete der Lauterhöhen und des Kuseler Berglandes sind infolge höherer Niederschläge und der geringer verdunstenden landwirtschaftlichen Flächen wieder durch höhere Abflussspenden geprägt. Im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nehmen die Niederschläge ab. Dieses Gebiet zeichnet sich infolgedessen durch geringere Abflussspenden aus. Aber auch hier ist der Einfluss der Landnutzung auf die Abflussspenden erkennbar (Otterberger Wald – geringere Abflussspenden; landwirtschaftliche Nutzung im Bereich der Sembacher Platten – höhere Abflussspenden).

Die nach Südosten im Pfälzer Wald stark ansteigenden Niederschläge (weit über 1000 mm/a) bewirken hohe Abflussspenden trotz der hohen Verdunstung des Waldes. Der Bereich der Sickinger Höhe weist ebenfalls hohe Abflüsse auf, obwohl die Niederschläge geringer als im Hohen Pfälzer Wald sind. Hier wirkt sich die geringe Verdunstung der landwirtschaftlichen Nutzung abflusserhöhend aus.

4.6 Grundwasserabflüsse an Pegeln und Messwehren

4.6.1 Grundwasserneubildung nach WUNDT, KILLE und dem MNQ-Verfahren

Die Ermittlung der Grundwasserneubildung eines Gebietes aus Gewässer-Abflussdaten beruht auf der Möglichkeit, den an einem Gewässerpegel gemessenen Gesamtabfluss A in einen Oberflächenabflussanteil A_O und einen grundwasserbürtigen Abflussanteil A_U aufzuteilen. Dazu wird eine Zeitreihe auf der Basis mittlerer Tagesabflüsse mittels hydrologischer Verfahren ausgewertet und die ermittelte A_U -Spende der gesuchten Grundwasserneubildungsrate gleichgesetzt. Alle Verfahren gehen von der Annahme aus, dass der Niedrigwasserabfluss in Trockenwetterzeiten dem grundwasserbürtigen Abflussanteil entspricht.

Instrument für die Berechnung der Grundwasserneubildung ist das „Modell zur Regionalisierung des mittleren Niedrigwasserabflusses in Rheinland-Pfalz“ (LfW 2002). Mit dem Modell wurde der an den Landespegeln ermittelte mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) – als arithmetisches Mittel der 20 niedrigsten Jahres-NQ-Werte der Reihe 1979 bis 1998 – nach hydrogeologischen Aspekten in die Pegel Einzugsgebietsflächen verteilt. Hierzu standen das Gewässerkundliche Flächenverzeichnis (LfW 2000) mit einer Untergliederung der Landesfläche in rd. 8000 Gewässerabschnitte und die Karte der 14 Grundwasserlandschaften (LfW 1989) mit empirisch ermittelten Grundwasserneubildungsraten zur Verfügung. Nach dem Verschnitt der Gewässerabschnitte mit den Flächenanteilen der Grundwasserlandschaften wurde der Abfluss (MNQ) der Pegelzwischen Einzugsgebiete in die Gewässerabschnitte verteilt. Nach diesem Berechnungsschritt ergibt die Summation aller MNQ-Werte im Einzugsgebiet den gemessenen Abfluss am Pegel. Das Modell liefert mittlere Niedrigwasserabflusswerte für jeden Gewässerabschnitt wie auch für beliebige Einzugsgebiete.

Zur Berechnung der Grundwasserneubildungsraten im Untersuchungsraum wurde das Modell in modifizierter Weise verwendet. Hierzu wurden die Abflussdaten von 16 Pegeln ausgewertet, wobei 5 Pegel im Bearbeitungsgebiet liegen. Um mit natürlichen Abflusswerten rechnen zu können, mussten die am Pegel gemessenen Abflusswerte in mehreren Schritten korrigiert werden.

So wurden die Grundwasserentnahmen der öffentlichen und privaten Wasserversorgung als „abflussschwächende“ Komponente im Pegel Einzugsgebiet zum gemessenen Abfluss addiert und die Schmutzwassereinleitungsmengen der öffentlichen Kläranlagen sowie der Direkteinleiter als „abflusserhöhende“ Komponente vom gemessenen Abfluss subtrahiert. Außerdem waren an einigen Pegeln die Niedrigwasserabflusswerte durch Verkrautung im Gerinne unplausibel hoch. Sie wurden durch Vergleich mit unbeeinflussten Ganglinien benachbarter Pegel korrigiert.

Mittlerer Niedrigwasserabfluss (MNQ)

Die mittlere Niedrigwasserabflussspende beträgt für das Bearbeitungsgebiet 137 mm/a. Da in die Berechnung nur die niedrigsten Jahres-NQ-Werte der Reihe 1979/1998 eingehen, liegt der MNQ-Wert deutlich unter der mittleren Grundwasserneubildungshöhe der anderen Karten der Abflussabtrennungsverfahren.

Grundwasserneubildung nach WUNDT

Der MoMNQ-Wert nach WUNDT (1953) ist der arithmetische Mittelwert der 240 monatlichen NQ-Werte der Reihe 1979/1998. Da bei diesem Verfahren auch die monatlichen NQ-Werte des Winterhalbjahres berücksichtigt werden, errechnen sich hier vergleichsweise hohe Grundwasserneubildungshöhen. Für das Bearbeitungsgebiet wurde eine durchschnittliche Grundwasserneubildungshöhe von 201 mm/a ermittelt. Im Oberkarbon- und Rotliegend-Gebiet im Norden liegen die Grundwasserneubildungshöhen zwischen 25 und 100 mm/a, im Zechstein- und Buntsandstein-Gebiet zwischen 150 und 275 mm/a.

Grundwasserneubildung nach WUNDT_{SOMMER}

Der MoMNQ_{SOMMER}-Wert nach WUNDT (1958) ist der arithmetische Mittelwert aus 120 monatlichen NQ-Werten der hydrologischen Sommerhalbjahre der Reihe 1979/1998.

Für das Bearbeitungsgebiet wurde eine durchschnittliche Grundwasserneubildungshöhe von 173 mm/a ermittelt. Im Oberkarbon- und Rotliegend-Gebiet liegen die Grundwasserneubildungshöhen zwischen 25 und 75 mm/a, im Zechstein- und Buntsandstein-Gebiet zwischen 125 und 225 mm/a.

Grundwasserneubildung nach KILLE

Mit einem weiteren Verfahren wurden die MoMNQ_r-Werte nach KILLE (1970) ermittelt. Direkt- und Zwischenabfluss sowie Anteile von rasch abfließendem Grundwasser werden bei diesem Verfahren durch Medianbildung von 240 monatlichen NQ-Werten eliminiert. Für das Bearbeitungsgebiet ergibt sich eine durchschnittliche Grundwasserneubildungshöhe von 186 mm/a. Das Oberkarbon- und Rotliegend-Gebiet zeigt Grundwasserneubildungshöhen von 25 bis 100 mm/a, das Zechstein- und Buntsandstein-Gebiet von 150 bis 275 mm/a.

4.6.2 Grundwasserneubildung nach NATERMANN im Einzugsgebiet des Schwarzbachs bis zum Pegel Thaleischweiler

Der Abflusspegel Thaleischweiler befindet sich außerhalb des eigentlichen Untersuchungsgebietes. Das etwa 370 km² große Einzugsgebiet liegt jedoch zum größten Teil im südöstlichen Kartiergebiet und wird – genau wie das außerhalb gelegene Gebiet – fast ausschließlich von Gesteinen des Buntsandstein aufgebaut. Es eignet sich daher sehr gut als Testgebiet für die Abflusseparierung in Buntsandstein-Gebieten und dient somit der besseren Beurteilung der Grundwasserabflüsse, wie sie aus den Hauptzahlen der amtlichen Pegeldata gewonnen werden (Kap. 4.6.1).

Zur Ermittlung der verschiedenen Abflussanteile und damit auch zur Ermittlung der Grundwasserneubildung wurden die Pegeldata in Anlehnung an das Verfahren nach NATERMANN (1951, 1958) unter Einbeziehung von Quellschüttungsganglinien grafisch ausgewertet (Abb. 4-6).

Insgesamt lassen sich vier Abflussanteile voneinander abtrennen, die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten zugeordnet werden:

1. Abflussanteil: Abflussspitzen bis zu drei Tagen nach Ende des Niederschlagsereignisses

Bei dem sehr schnell abfließenden Wasser handelt es sich um reinen Oberflächenabfluss, der den Bächen zufließt.

2. Abflussanteil: sehr hohe Abflüsse über ein bis zwei Wochen je nach Regendauer

Dieser Abflussanteil kann dem kurzfristig im Boden zurückgehaltenen Wasseranteil zugeordnet werden, der als Interflow oder Deckschichtenabfluss bezeichnet wird. Diese Wassermenge versickert in den Untergrund, tritt aber nach einem kurzen Fließweg in die Vorfluter über, ohne dabei das Grundwasser zu ergänzen. Hinzu kommen noch Anteile von räumlich sehr eng begrenzten schwebenden Grundwasserstockwerken sowie die Abflussspitzen sehr hoch gelegener Quellstockwerke mit geringem Flurabstand.

3. Abflussanteil: Abnahme eines erhöhten Abflusses im Zeitraum zwischen einem halben Monat und vier Monaten bei fehlender Grundwasserergänzung

Dieser Anteil, der den Abfluss mittel- bis langfristig erhöht, stammt aus den Quellen bzw. dem diffus zutretenden, kurzfristig gespeicherten, großräumig zusammenhängenden Grundwasser im Einzugsgebiet. Im Pegelinzugsgebiet Thaleischweiler liegen die Quellaustritte zu etwa 80 % an der Grenze Karlstal-Felszone/Schlossberg-Schichten. Die übrigen Quellen liegen innerhalb der GWLG 1. Sie treten an den Grenzen zwischen Grundwasser leitenden Sandsteinbänken und gering leitenden Ton- und Schluffsteinen aus.

4. Abflussanteil: zeitlich stark verzögerte und gedämpfte Zunahme des Grundwasseranteils und langsame Abnahme über Halbjahreszeiträume bei längeren Trockenphasen als Folge des guten Speicher- und Rückhaltevermögens dieser Aquifere sowie der starken zeitlichen Verzögerung der Durchsickerung hangender Grundwasserleiter und Zwischenschichten

Der Abflussanteil stammt aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk und dem Basisabfluss aus Quellstockwerken. Er findet zumeist als diffuser Zutritt in die Gewässer statt (Kap. 4.6.3). Seltener tritt dieser Grundwasseranteil an Talrandquellen aus (Kap. 4.7).

Auf 10 bis 20 % der Fläche des Einzugsgebietes ist eine regional zusammenhängende GWLG 2 ausgebildet. Auf 80 bis 90 % der Fläche bildet die GWLG 3 das tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasserstockwerk. Somit stammt der beschriebene Abflussanteil hauptsächlich aus der GWLG 3.

Ergebnis

Die grafische Zeitreihenauswertung mit täglichen Messdaten wurde zu Monatswerten zusammengefasst, so dass für jeden Monat der Jahresreihe jeweils ein Wert für die vier Abflussanteile vorliegt. Ausnahmen bilden bestimmte Sommermonate, in denen der Pegel auf Grund von Verkrautung nicht ausgewertet werden konnte. Für diese Zeiträume wurden Abschätzungen auf der Grundlage der Daten in vollständig auswertbaren Jahren vorgenommen.

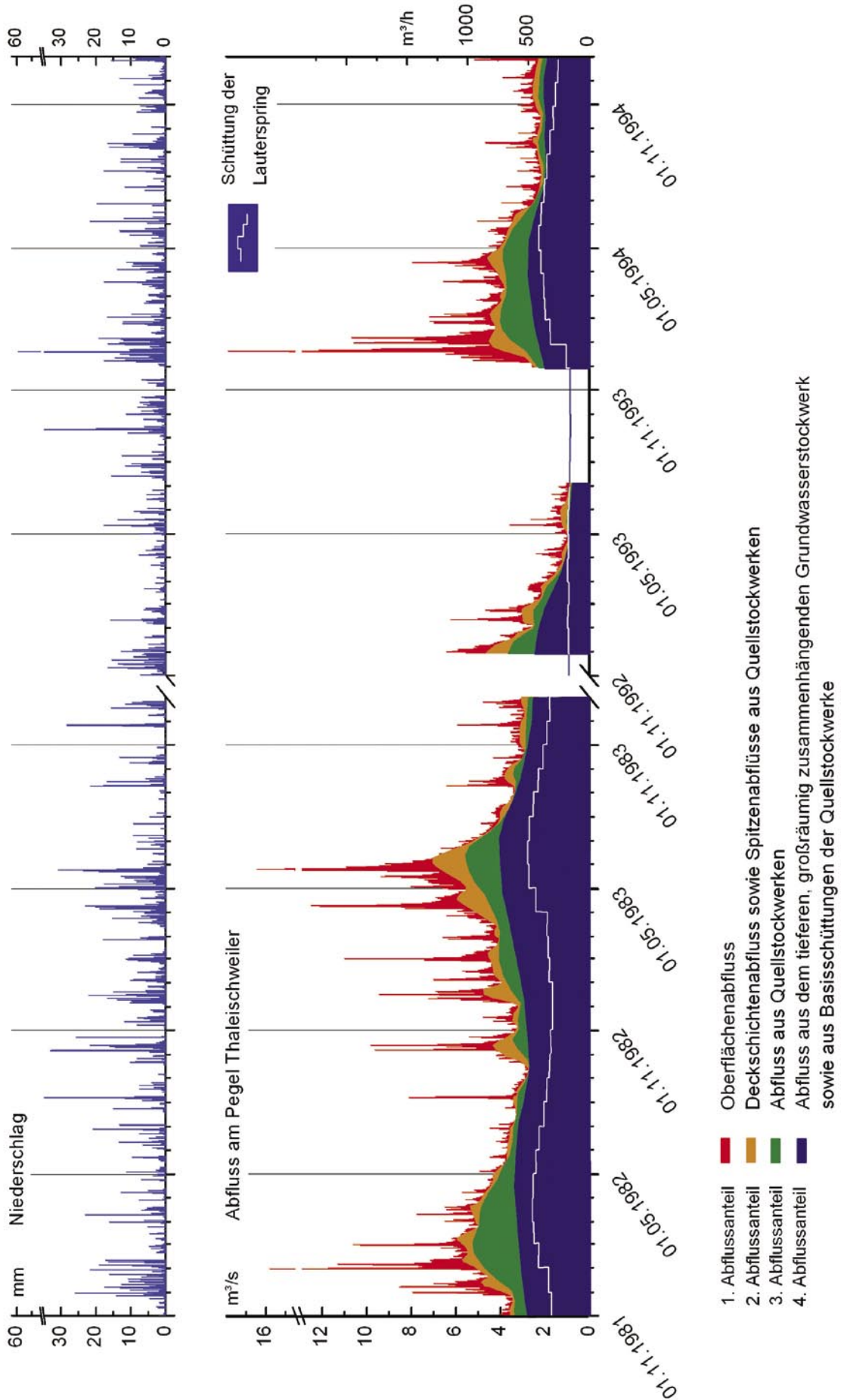


Abb. 4-6: Abflussepazierung in Anlehnung an das Verfahren nach NATERMANN.

In der Abb. 4-6 wird für jeden Monat ein Mittelwert der Abflussanteile aus mehreren Jahren einer gemittelten Niederschlagsmenge prozentual gegenübergestellt. Die kumulativ gestapelten Abflussanteile zeigen den gemittelten Jahresverlauf des Gesamtabflusses.

Oberflächenabfluss, Deckschichtenabfluss, Spitzenabfluss aus Quellstockwerken und schwebenden Grundwasserstockwerken

Im Einzugsgebiet des Pegels Thaleischweiler liegt der mittlere monatliche Anteil des reinen Oberflächenabflusses an der Niederschlagsmenge bei 3 bis 6%, im Jahresmittel bei ca. 4%. In den Monaten Dezember bis Februar ist der Anteil des Oberflächenabflusses erhöht, wohingegen der Anteil im Sommer nur etwa 3% ausmacht.

Dieser sehr geringe Anteil ist trotz des starken Reliefs auf die gute Durchlässigkeit der Sandböden zurückzuführen, die einen beträchtlichen Teil der Niederschläge aufnehmen. Der Deckschichtenabfluss (Interflow) sowie die Abflussspitzen der Quellen sind relativ unbedeutend und liegen im Monatsmittel konstant zwischen einem und zwei Prozent des Niederschlagswertes. Der Anteil dieses sehr schnell abfließenden Grundwassers wird umso größer, je stärker und häufiger kräftige Niederschläge sind.

Grundwasserneubildung der Quellstockwerke

Der Abflussanteil aus den Quellstockwerken sowie der schnell abfließende Anteil aus dem großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk liegt im monatlichen Mittel der Jahresreihe 1979 bis 1998 zwischen 0,5 bis 20% der Niederschlagsmenge. Im langjährigen Jahresmittel sind zwischen 6 und 17% zu erwarten. Die Grundwasserneubildungsrate für die Quellstockwerke liegt bei etwa 50 bis 160 mm/a, in trockenen Jahren bei minimal 20 mm/a, in feuchten Jahren bei bis zu maximal 180 mm/a.

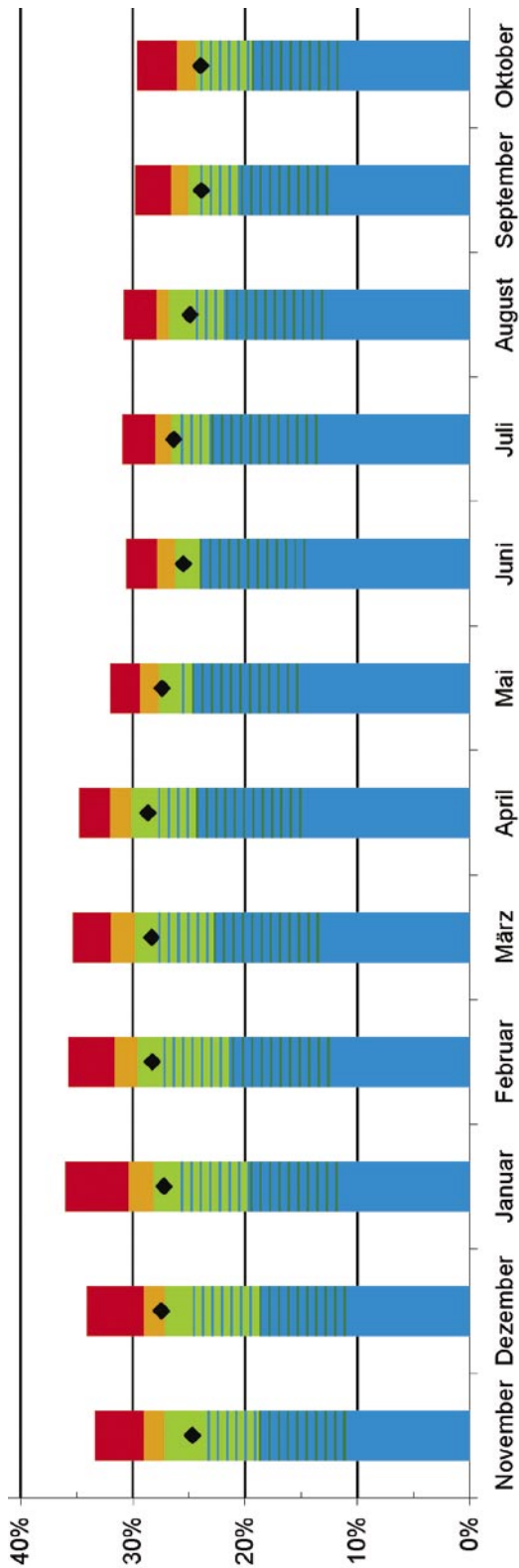
Der große Schwankungsbereich ergibt sich aus den unterschiedlichen Höhenlagen sowie den stark schwankenden Mächtigkeiten der Grundwasserüberdeckung, die u. a. die Sickerwasserzeiten entscheidend beeinflussen.

Aus den Daten zeigt sich, dass die Grundwasserneubildung im Quellstockwerk mit einer Verzögerung von ein bis zwei Monaten auf die Niederschlagsereignisse der Herbst- und Wintermonate stattfindet. Das Minimum der Quellschüttungen wird zumeist im September/Okttober erreicht.

Grundwasserneubildung des tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerks

Der Abflussanteil des tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerks leitet sich aus dem Vergleich der Pegelraten mit der Schüttung der Lauterspringquelle und anderer Talrandquellen ab.

Der Abfluss aus diesem Grundwasserstockwerk liegt im mittleren monatlichen Anteil des Untersuchungszeitraumes zwischen 11 bis 30% der mittleren monatlichen Niederschlagsmenge. Der mittlere Grundwasserabfluss für die gesamte Jahresreihe 1979 bis 1998 liegt zwischen 13 und 26% des Niederschlags.



	Niederschlag (absolut)	Verdunstung und Grundwasserabstrom	1. Abflussanteil Oberflächenabfluss	2. Abflussanteil Deckschichtenabfluss sowie Spitzenabflüsse aus Quellstockwerken	3. Abflussanteil Minimaler, Mittlerer und Maximaler Abfluss aus Quellstockwerken	4. Abflussanteil Minimaler, Mittlerer und Maximaler Abfluss aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk sowie aus Basiserschütungen der Quellstockwerke
November	68 mm	72%	2%	1%	2%	12%
Dezember	92 mm	65%	9%	2%	2%	12%
Januar	117 mm	57%	8%	3%	4%	12%
Februar	64 mm	63%	4%	2%	3%	14%
März	85 mm	63%	3%	2%	2%	14%
April	75 mm	61%	3%	2%	3%	15%
Mai	112 mm	64%	5%	2%	3%	16%
Juni	83 mm	66%	2%	2%	3%	15%
Juli	65 mm	66%	4%	2%	2%	15%
August	60 mm	66%	3%	1%	2%	14%
September	82 mm	70%	2%	1%	2%	13%
Oktober	115 mm	67%	6%	2%	2%	12%
Gesamjahr	1019 mm	65%	4%	2%	2%	14%
Gesamjahr	1019 mm	663 mm	43 mm	17 mm	25 mm	140 mm
Gesamjahr*	1019 mm	623 mm	43 mm	17 mm	57 mm	163 mm
					179 mm	277 mm
					316 mm	316 mm

*Berücksichtigung von 17% Grundwasserabstrom aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk in andere oberirdische Einzugsgebiete

Abb. 4-7: Gesamtabfluss und Abflussanteile für die Jahresreihe 1979 bis 1998.

Zu dieser Menge müssen die Höhe des Grundwasserabstroms nach Norden in das Einzugsgebiet der Lauter und der Moorniederung noch hinzugezählt werden, desgleichen die Wassermengen, die durch Entnahmen aus dem Einzugsgebiet herausgeführt werden.

Für die langfristige Grundwasserneubildung ergibt sich somit ein Wert von 244 mm/a, der sich aus 204 mm/a Grundwasserabfluss plus 34 mm/a Grundwasserabstrom plus 6 mm/a Entnahme, die nicht wieder im Einzugsgebiet eingeleitet werden, zusammensetzt (Einleitungen: 2.500.000 m³/a, Entnahmen: 5.000.000 m³/a).

Die kontinuierliche Zeitreihenauswertung in Anlehnung an das Verfahren nach NATERMANN zeigt, dass in extrem trockenen Jahren die Grundwasserneubildungsrate für die tieferen Grundwasserleiter-Gruppen unter 140 mm/a liegt und in Nassjahren bis zu 300 mm/a erreichen kann.

Zwischen den Niederschlägen, die zur Grundwasserneubildung führen und dem Abfluss aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk liegt ein Zeitraum zwischen zwei und sechs Monaten.

Die Aufteilung der Abflussanteile zeigt, dass der überwiegende Teil der Sickerwassermenge zur Anreicherung des tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerkes beiträgt. Die geringer durchlässigen Zwischenschichten, insbesondere die Schlossberg-Schichten, sind vor allem verzögernd wirksam.

4.6.3 Ermittlung von Zuwachsspenden anhand von Stichtagsmessungen

In den Jahren 1992 und 2001 wurden im Bereich des Untersuchungsgebietes Trockenwetterabflussmessungen insbesondere an kleineren Vorflutern vorgenommen. Dadurch lassen sich Grundwasserabstrommengen räumlich differenziert quantifizieren.

Aus den genannten Jahren kommen jeweils Messungen der Monate September/Oktober zur Auswertung. Im Jahre 1992 wurden Niedrigwasserabflüsse an 62 Messstellen im Zeitraum vom 4. September bis 14. Oktober zur Auswertung herangezogen, 2001 waren es Abflüsse an 46 Messstellen im Zeitraum vom 4. bis 20. September. Des Weiteren wurden Abflussdaten von 14 Pegeln der Wasserwirtschaftsverwaltung verwendet.

Auf Grund der relativen Dichte der Abflussmessungen kommt das Prinzip der Abflusszuwachsspenden zur Anwendung (MATTHESS & THEWS 1963). Hierbei wird den im Verlauf eines Vorfluters gemessenen Abflüssen jeweils das (oberirdische) Einzugsgebiet zugeordnet. Der Abflusszuwachs jeweils zweier aufeinander folgender Messstellen sowie deren Einzugsgebietszuwachs werden einander in Beziehung gesetzt, so dass sich für das Zuwachsgebiet eine charakteristische Abflussspende (= Abflusszuwachsspende in l/(s × km²)) ergibt.

Die räumliche Auflösung der Zuwachsspenden hängt von der Anzahl und räumlichen Verteilung der Messwehre und Pegel ab. So ist die Stichtagsmessung 1992 in den meisten Bereichen stärker differenziert als die Stichtagsmessung 2001. In einigen Bereichen – wie z. B. im oberen Moosalbtal – können weniger starke Zuwachsspenden von sehr hohen unterschieden werden, die in der Stichtagsmessung 2001 nur als Mittelwert erscheinen.

In einigen Teilbereichen sind die Messungen und damit auch die Ergebnisse durch anthropogene Eingriffe wie Wasserentnahmen an Brunnengruppen bzw. Einleitungen an Kläranlagen beeinflusst.

Eine größere Abflusszuwachsspende als für das Oberliegergebiet bedeutet unter natürlichen Trockenwetterabflussverhältnissen, dass entweder ein Grundwasserzustrom aus anderen Gebieten erfolgt oder bereichsweise erhöhte Wasserdurchlässigkeiten im Gebirge eine erhöhte Dränung bewirken; eine niedrigere Abflusszuwachsspende lässt dagegen einen Abstrom vermuten. Negative Spenden auf Grund zu hoher Grundwasserentnahmen wurden nicht beobachtet.

Die Abflusszuwachsspendenkarten ergänzen und bestätigen das Bild der Grundwasserfließrichtungen (Kap. 4.4). Die Ergebnisse aus den Messwehzeitreihen (Kap. 4.6.4) liefern für einige Teilinzugsgebiete noch weitere, detailliertere Informationen.

Das Jahr 1992 war ein trockenes Jahr, entsprechend gering waren die Abflüsse. Die Abflüsse an den Pegeln lagen für diese Periode bei etwa 80 % des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses (MNQ). Das Jahr 2001 hingegen liegt in einer Reihe feuchterer Jahre, entsprechend höher waren die Abflüsse. Sie beliefen sich auf etwa 150 % des MNQ.

Westlicher Pfälzer Wald und Moosalbtalgebiet

Das gesamte Aschbachtal hat bei beiden Stichtagsmessungen eine sehr geringe Zuwachsspende. Die Schüttung aus den Quellstockwerken ist nahezu zum Erliegen gekommen und die tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasseroberfläche liegt unter dem Bachniveau des Aschbachs. Sie ist insbesondere im westlichen Teil des Aschbachtals durch die Entnahmen der Brunnengruppe Süd (~ 3,5 Mio m³/a) abgesenkt. Weiter östlich findet ein natürlicher Abstrom aus dem Talbereich nach Norden in das Kaiserslauterer Becken bzw. zur Lauterspring statt. Die teils natürliche, teils anthropogene Überleitung des Grundwassers in das Kaiserslauterer Becken bildet sich in den Zuwachsspenden nördlich der Kaiserslauterer Kläranlage ab (siehe unten).

Im oberen Moosalbtal kann insbesondere durch die Stichtagsmessung 1992 eine sehr hohe Zuwachsspende ab dem Bereich südlich von Trippstadt festgestellt werden, während in den darüber liegenden Hochtälern eine mäßige Zuwachsspende (2,8 l/(s x km²)) ermittelt wird. Bachabwärts dieses Talbereichs ist die obere Moosalbe – möglicherweise auch durch eine Störungszone begünstigt – als Vorflut an die tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasseroberfläche angebunden. Eine Beeinflussung durch die 1997 errichteten Brunnen im oberen Moosalbtal (~1,2 Mio m³/a) ist auf Grund des vergleichsweise höheren Gesamtabflussniveaus in den Stichtagsmessungen 2001 nicht erkennbar.

Im südlich gelegenen Hirschaltal ist an den geringen Zuwachsspenden zu erkennen, dass sich der Bach größtenteils über der tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasseroberfläche befindet. Es kann von einem annähernd natürlichen Zustand ausgegangen werden, da die Entnahmemengen mit 200.000 m³/a vergleichsweise gering sind. Die sehr hohen Zuwachsspenden zur Moosalbe (26,4 l/(s x km²)) im Bereich der Zusammenflüsse von Moosalbe und Hirschalbe sind ein starker Hinweis dafür, dass erst in den tief eingeschnittenen Talbereichen die zusammenhängende Grundwasseroberfläche an die Vorfluter vollständig angebunden ist.

Im Kolbental, Walkmühltal und Queidersbachtal werden ebenfalls geringe Zuwachsspenden ermittelt. Im Kolbental findet eine Beeinflussung durch Entnahmen statt (siehe unten), wobei auf Grund des Höhenunterschiedes auch ein natürlicher Abstrom in die Moorniederung anzunehmen ist. Der Anschluss der Vorfluter an die tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasseroberfläche wird nur im Queidersbach ab etwa + 275 m NN erreicht.

Sickinger Höhe

Für das Gebiet der Sickinger Höhe zeigen die Stichtagsmessungen des Jahres 1992 deutliche Zuwachsspendenunterschiede zwischen hoch gelegenen Randbereichen nahe der Wasserscheiden und den tiefliegenden Talbereichen.

Die geringen Zuwachsspenden von $0,2 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$ in den hochgelegenen Tälern, in denen sich zahlreiche Quellen der GWLG 1 befinden, verdeutlichen den geringen Anteil des Grundwassers aus Quellen am oberirdischen Abfluss zu Trockenzeiten. Der diffuse Zufluss des Grundwassers aus der tiefer liegenden GWLG 2 und der GWLG 3 ist mit $22,6 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$ wesentlich größer. Er zeigt den Anschluss der Vorflut an die tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasseroberfläche und liefert eine Begründung für die Grundwasserscheide zwischen dem Moosalbtalgebiet und der Sickinger Höhe (Karte 8).

Sickinger Stufe, Spesbach-Landstuhler Bruch und Untere Lauterhöhen

Im Bereich von Landstuhl wird durch die vergleichsweise hohe Zuwachsspende von $11,4 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$ (1992) der Grundwasserabstrom von der Sickinger Höhe in die Moorniederung deutlich. Der östlich anschließende Bereich bei Kindsbach wird durch Entnahmen von etwa $800.000 \text{ m}^3/\text{a}$ beeinflusst und zeigt sehr geringe Zuwachsspenden. Außerdem findet nur ein geringer Grundwasserzustrom aus dem südlich der oberirdischen Wasserscheide, morphologisch tiefliegenden Kolbental, in dem ebenfalls etwa $900.000 \text{ m}^3/\text{a}$ entnommen werden, statt.

Westlich von Kottweiler-Schwanden wird der Unterschied der hydrogeologischen Eigenschaften von Rotliegend und Buntsandstein deutlich: während im Rotliegend der Zustrom aus langfristig gebildetem Grundwasser gering ist, findet in Trockenperioden aus den Buntsandstein-Schichten ein relativ starker Zustrom zu den Gewässern statt.

Kaiserslauterer Becken, Lautertal, Otterberger Wald und Sembacher Platten

Im südlichen Stadtgebiet von Kaiserslautern und insbesondere im Lautertal gibt es einen starken natürlichen Zufluss aus dem Buntsandstein des Westlichen Pfälzer Waldes, der allerdings noch von den anthropogenen Zuleitungen überlagert wird.

Beide Zuwachsspendenkarten bilden die hohen Einleitungsmengen der Kläranlage von Kaiserslautern (durchschnittlich $21 \text{ Mio m}^3/\text{a}$) auf Grund verschiedener Messpunkte unterschiedlich stark differenziert ab. In der Stichtagsmessung 1992 wird vom nördlichen Stadtgebiet Kaiserslautern bis nach Otterberg eine sehr starke Zuwachsspende von $59 \text{ l}/(\text{s} \times \text{km}^2)$ ermittelt. Bei der Stichtagsmessung 2001 können die Einleitungsmengen nur auf das gesamte Einzugsgebiet zwischen der Wasserscheide Kaiserslautern/Aschbach und dem Messpunkt am Pegel Untersulzbach gemittelt dargestellt werden.

Das in die Kläranlage eingeleitete Wasser stammt z. T. aus der Lauterspring, der Brunnengruppe Ost, aus Quellen, die in das Kanalsystem von Kaiserslautern einspeisen, aber auch aus den Aschbach- und Moosalbthalbrunnen, die sich südlich der oberirdischen Wasserscheide befinden.

Das Bild der natürlichen Zuwachsspenden, welches im Wesentlichen ausgeglichener ist als das hier darstellbare anthropogen überprägte, wird durch die Zuwachsspende der Quelle Lauterspring (schraffierte Darstellung in beiden Zuwachsspendenkarten, 5 bzw. 10 l/(s x km²)) verdeutlicht, da sie weitestgehend unbeeinflusst von Brunnenentnahmen ist. Hieraus leitet sich u. a. ein natürlicher Zustrom aus dem Westlichen Pfälzer Wald in das Kaiserslauterer Becken ab.

Die Zuwachsspenden in den übrigen Teileinzugsgebieten des nordöstlichen Untersuchungsgebietes zeigen, dass aus den Gesteinen des Rotliegend ein im Vergleich sehr geringer Grundwasseranteil in die Vorfluter einströmt, während aus den hier geringmächtig ausgebildeten Stauf-Schichten des Buntsandstein ein mittlerer Zuwachs erfolgt.

4.6.4 Abflussspenden ausgewählter Kleineinzugsgebiete zwischen 1991 und 1994

In der Zeit von Februar 1991 bis April 1994 wurde vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz im 2-Wochen Rhythmus der Abfluss an 16 Messwehren erfasst (Abb. 4-8).

In der Jahresreihe 1979 bis 1998, die bei den Ermittlungen der Grundwasserneubildung als repräsentativer Zeitraum ausgewählt wurde, ist die Zeit zwischen April und August 1993 der Zeitraum mit den geringsten Abflussmengen und Quellschüttungen. Die eineinhalb Jahre zwischen April 1991 und Oktober 1992 können ebenfalls als relativer Trockenzeitraum bezeichnet werden, da vergleichsweise sehr geringe Niederschlagsmengen fielen und der Abfluss an Quellen und Pegeln überwiegend sehr gering war.

Das arithmetische Mittel der Abflussspenden in Trockenzeiträumen (vgl. Abb. 4-8) zeigt Abb. 4-9. Die mittleren Zuwachsspenden der Trockenperiode liegen überwiegend geringfügig über denen der Stichtagsmessung 1992. Sie zeigen, dass geringe Zuwachsspenden über einen 2-Jahres-Zeitraum anhalten können.

Dem Mittelwert ist auch die maximale Zuwachsspende (Einzelmessung, zumeist Frühjahr 1993) gegenübergestellt. Aus den Maximalwerten wird u. a. ersichtlich, dass im östlichen Aschbachtal auch zu Zeiten hoher Schüttungsmengen der Abfluss vergleichsweise gering ist.

Der Einfluss der hydrogeologischen Eigenschaften auf das unterschiedliche Abflussverhalten wird deutlich: der Abfluss an den Messwehren M10 und M08, in deren Einzugsgebiet überwiegend Rotliegend-Schichten anstehen, erreicht bereits nach den vergleichsweise geringen Niederschlagsmengen des Novembers 1992 in etwa das Niveau, das auch nach der kräftigen Niederschlagsperiode im Dezember 1993 erreicht wird, d.h. in Feuchtphasen wird schnell ein annähernd maximaler oberirdischer Abfluss erreicht. Im abklingenden Ast gehen die Schüttungsmengen relativ schnell auf das geringe Ausgangsniveau zurück. Die gering durchlässigen Rotliegend-Gesteine mit ihren schluffig-tonigen Böden begünstigen einen hohen oberirdischen Abflussanteil und Interflow. Dagegen wird der mittel- und langfristige Grundabfluss kaum erhöht.

Am Pegel Untersulzbach sowie an den meisten Messwehren in den Zechstein- und Buntsandstein-Schichten erreichen die Abflüsse ihr Maximum der Untersuchungsreihe erst nach der zweiten Niederschlagsperiode. Die Zunahme der Abflüsse bei den Novemberriederschlägen 1992 (erste Niederschlagsperiode) ist dagegen an vielen Messwehren sehr gering. Die Böden und Gesteine der Zechstein- und Buntsandstein-Schichten wirken bei geringen bis mittleren Niederschlagsmengen stark wasserspeichernd, was neben den Klüften auch auf den Porenraum dieser Schichten zurückzuführen ist.

Nach längeren Niederschlagsperioden erhöhen sich die gemessenen Abflüsse deutlich. Sie scheinen sich vor allem in den hochgelegenen Talbereichen von Aschbach, oberer Moosalbe und Walkmühltal – wie im sehr schwach abklingenden Schüttungsast zu beobachten ist – überwiegend aus langfristigen Grundwasseranteilen zusammensetzen. Teilweise wird bei voll wassergesättigtem Boden aber auch der insgesamt geringe oberirdische Abflussanteil erhöht, wie sich in manchen Spitzenabflüssen zeigt.

Ein abweichendes Abflussverhalten zeigen die Bäche, die sich in der Moorniederung bzw. an der Grenze zur Sickinger Stufe befinden (Messwehre M11, M12, M14 und M15). Sie sind offensichtlich von den schwankenden Grundwasserständen bei einem geringen Grundwasserflurabstand beeinflusst.

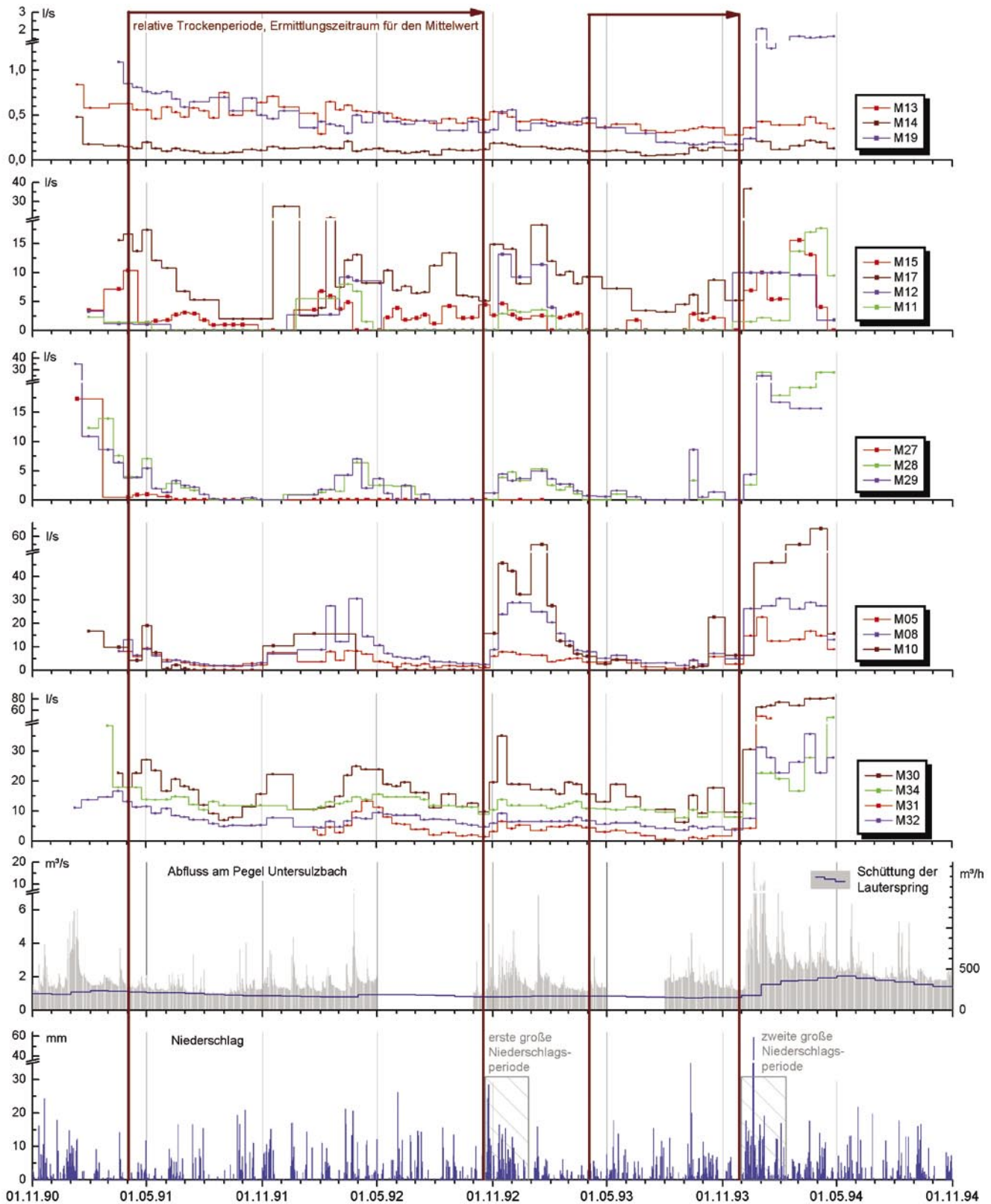


Abb. 4-8: Abflüsse ausgewählter Bäche im Vergleich zu Niederschlag, Schüttung der Lauterspring und Abfluss am Pegel Untersulzbach. Lage der Messwehre siehe Abb. 4-9.

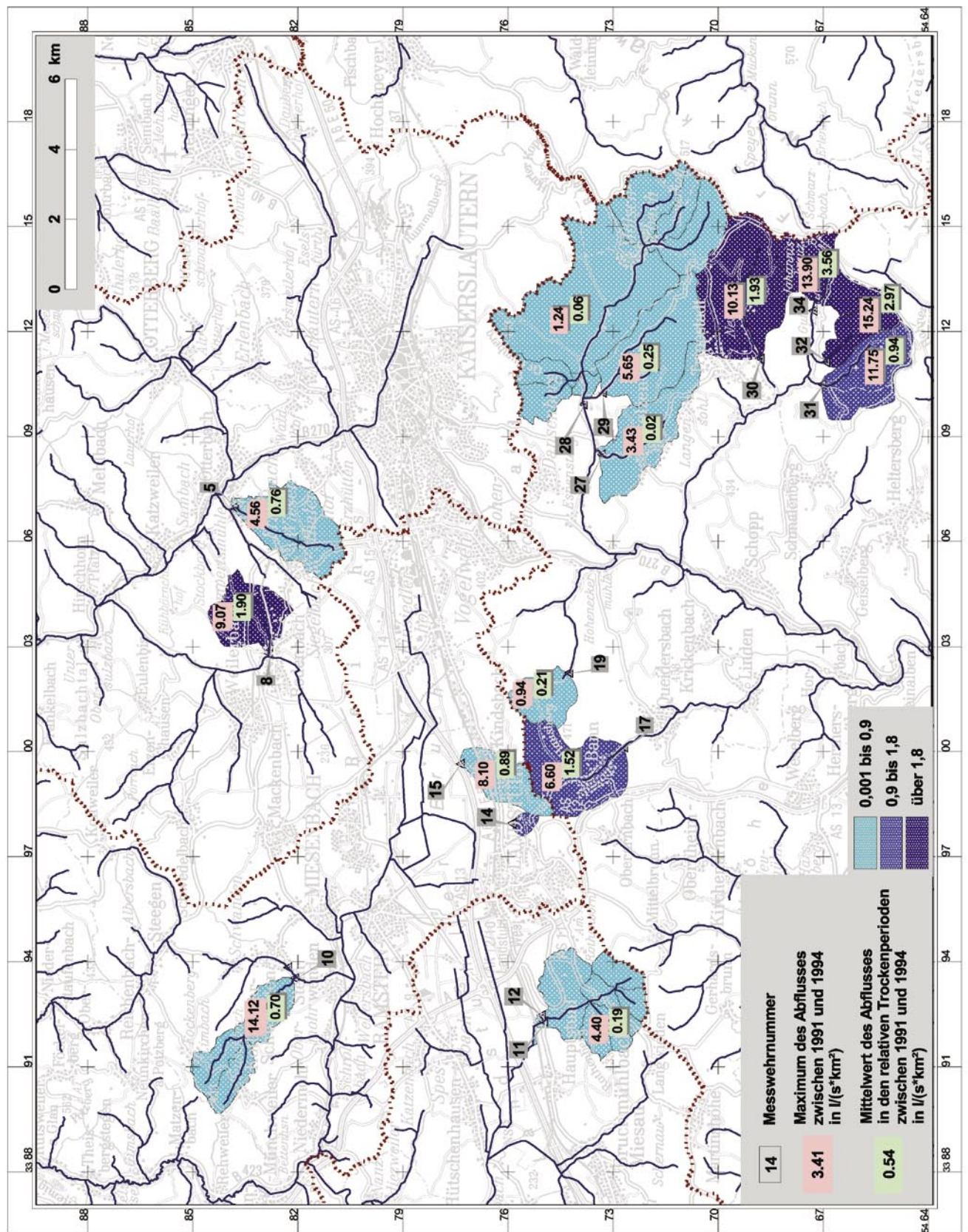


Abb. 4-9: Lage und Einzugsgebiete der Messwehre mit Angabe der durchschnittlichen Minimal- und Maximalschüttung in l/(s x km²).



4.7 Quellschüttungen

Im Kartiergebiet treten verschiedene Quelltypen auf (Abb. 4-10), die aus unterschiedlichen Grundwasserstockwerken gespeist werden.

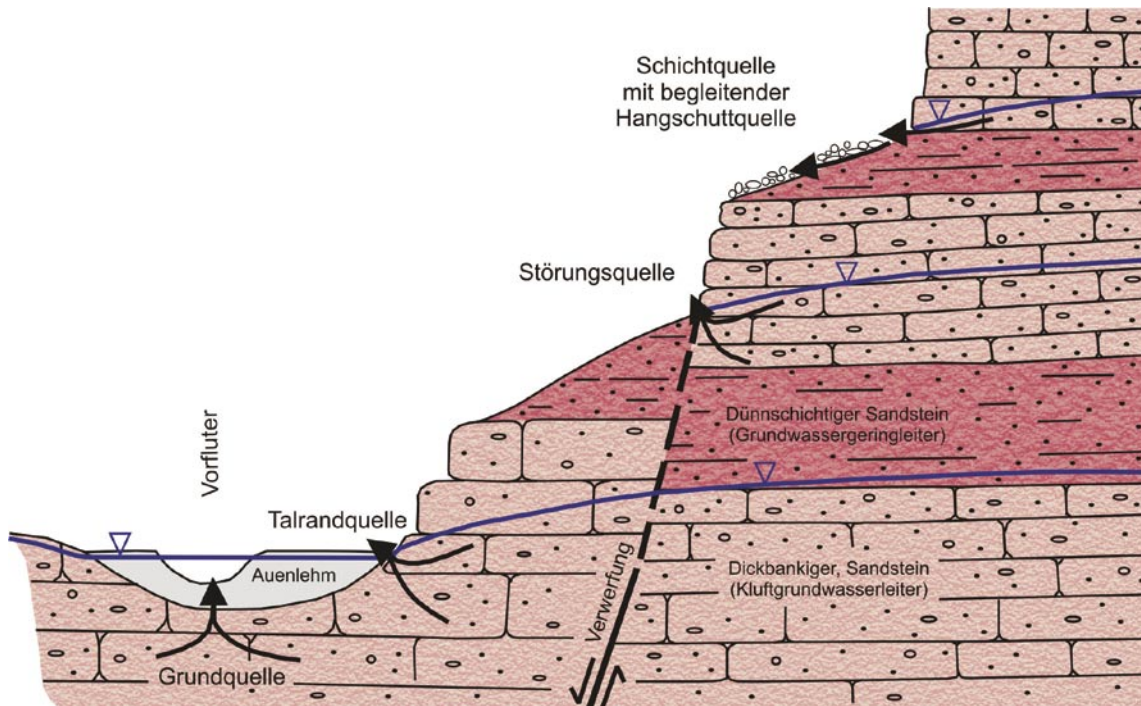


Abb. 4-10: Häufige Quelltypen im Buntsandstein des Pfälzer Waldes.

Die meisten der beobachtbaren Quellen in den Zechstein- und Buntsandstein-Schichten werden von dem oberen Grundwasserstockwerk durch absteigendes Grundwasser gespeist (Schichtquellen, Hangschuttquellen). Einige Quellen besitzen einen aufsteigenden Grundwasseranteil und treten zumeist in den Tälern als Talrand- bzw. Störungsquelle auf. Darüber hinaus gibt es in den Talauen zahlreiche Grundquellen (z. B. Moosalbe, Wallhalbe), die sich der direkten Beobachtung entziehen, sich aber in den Abflussmessungen (Kap. 4.6.3) durch deutliche Zuwachsspanden bemerkbar machen. Im Einzugsgebiet des Schwarzbachs bis zum Pegel Thaleischweiler macht der diffuse Zutritt aus diesen Quellen etwa $\frac{3}{4}$ des Gesamtgrundwasserumsatzes aus.

4.7.1 Jahresreihe 1992/94 und 2002/03

In Abb. 4-11 sind Quellschüttungen aus den Jahren 2002/03 und der Jahre 1992 bis 1994 zusammen mit den täglichen Niederschlagsdaten und den täglichen Abflussdaten des Schwarzbachs vom Pegel Thaleischweiler (mit Ausnahme der verkrauteten Zeiträume) dargestellt (zur Lage der Quellen siehe Abb. 4-12).

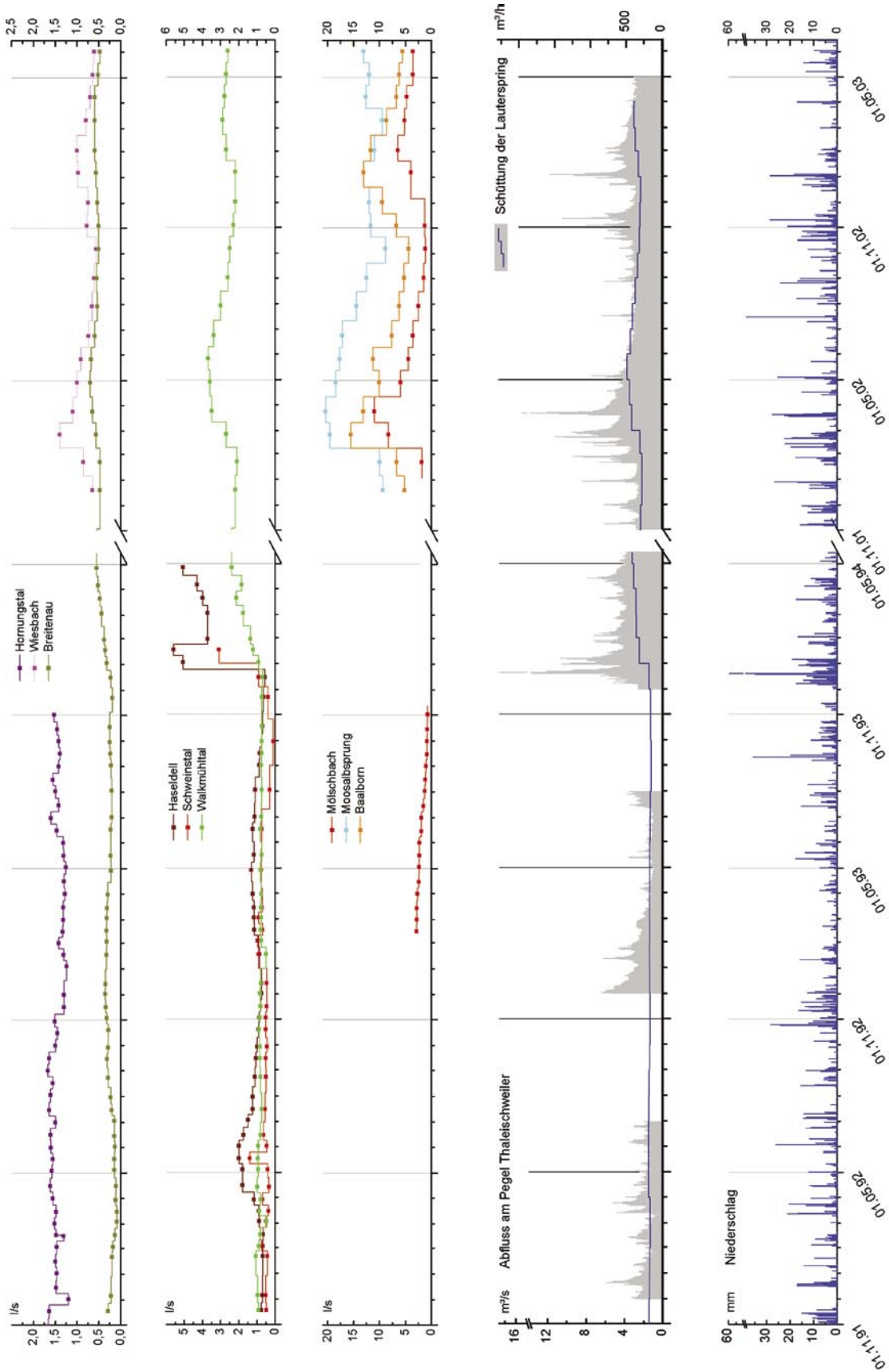


Abb. 4-11: Schüttungsmengen ausgewählter Quellen im Vergleich zu Niederschlag, Schüttung der Lauterspring und Abfluss des Schwarzbachs am Pegel Thaleischweiler.

Es wird deutlich, dass sich in den trockenen Jahren 1992 und 1993 das Niveau der Quellschüttungen und der Abflüsse an den Pegeln auch in den Wintermonaten auf einem vergleichsweise sehr niedrigen Stand befindet. In den Jahren 2002 und 2003 ist der Gesamtabfluss an den Pegeln in den Wintermonaten wie auch in den Sommermonaten etwa doppelt so groß. Die Quellschüttungen haben in diesem Zeitraum einen ausgeprägteren Jahresgang.

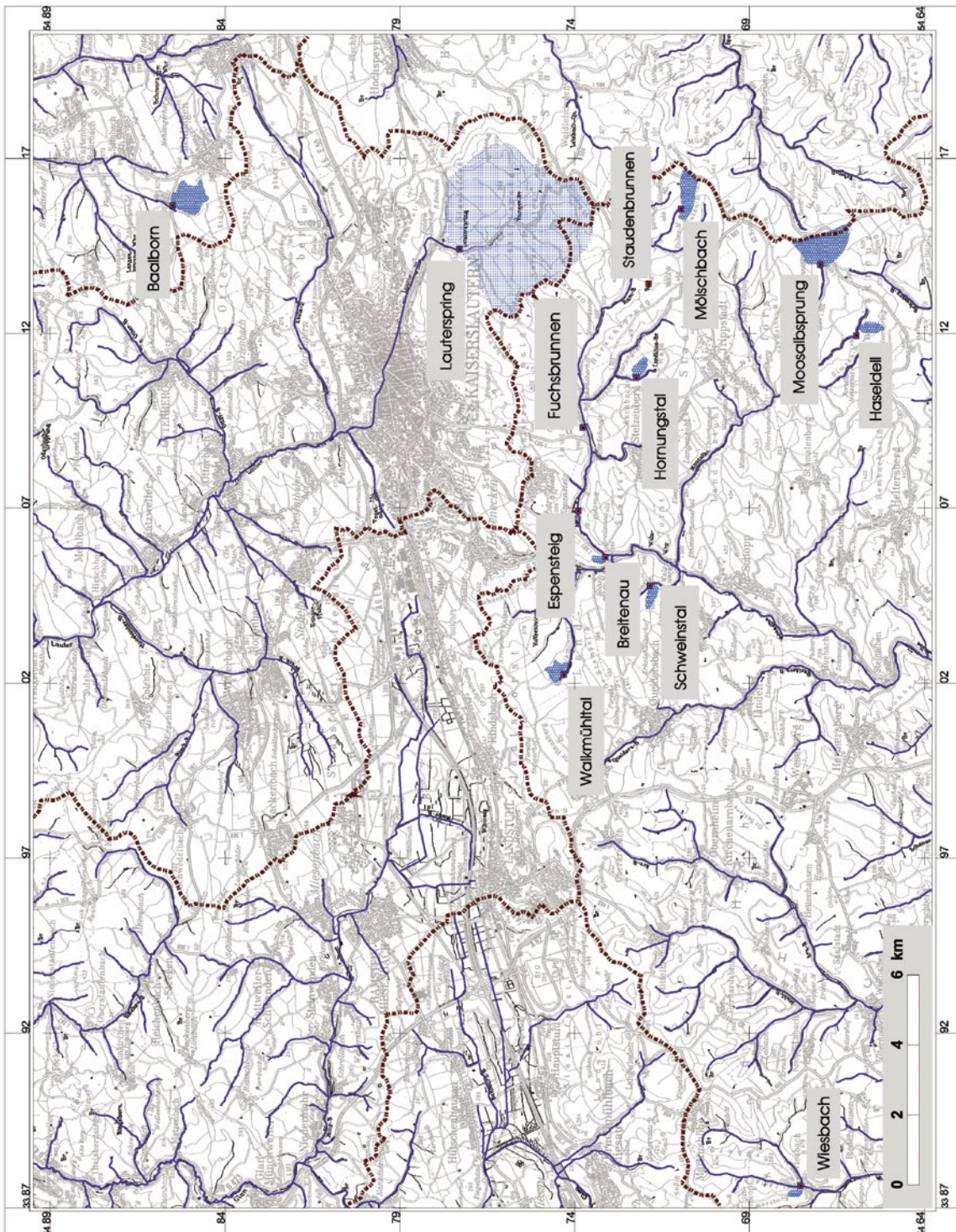


Abb. 4-12: Lage ausgewählter Quellen mit den dazugehörigen Einzugsgebieten.

Charakteristik der beobachteten Quellen

Die Reaktion der Quellschüttungen auf Niederschläge hängt neben der Sickerwassermenge unterhalb der durchwurzelten Zone vor allem von der vertikalen Durchlässigkeit sowie der Mächtigkeit der über dem Quellhorizont liegenden Schichten ab. Je höher die Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone wird, desto ausgeglichener ist die Quellschüttung (z. B. Quellen Breitenau und Walkmühltal, Abb. 4-11). Im Gegensatz dazu reagieren andere Quellen (z. B. Quelle Baalborn, Wiesbach) relativ rasch mit einem starken Anstieg, der auch wieder stark abfällt. Dabei ist ein gewisser Interflowanteil vermutlich vorhanden, lässt sich jedoch auf Grund fehlender kontinuierlicher Messungen nicht quantifizieren. Diese Quellen sind deshalb im Hinblick auf Schadstoffeinträge auffälliger.

Ein Zusammenhang zu geologisch-tektonischen Gegebenheiten ist nicht erkennbar (Tab. 4-2).

Zuordnung und Einstufung der Quellen

Für die Quellen der Zeitreihe 2002/03 wurde aus den zu Grunde gelegten Einzugsgebieten und den Schüttungsmengen die Grundwasserneubildung im Gebiet der Quellen ermittelt (Tab. 4-2).

Der Interflowanteil nimmt bei Abnahme der Einzugsgebietsgröße zu. Dies gilt nicht für Quellen des tieferen Stockwerks, da sie keinen Interflow-Anteil haben.

Tab. 4-2: Hydrogeologische Einstufung der Quellen.

Name der Quelle	Quellentyp	Stratigraphie	GWS ¹⁾	Schüttung ²⁾ (Gwneu) ²⁾	Einzugsgebiet [ha]	Flächennutzung in %			
						Wald	Land-wirt.	Grün-land	sonst. ³⁾
Lauterspring	Talrand- und Störungsquelle	Rehberg-, Trifels-Schichten	2	101,9 (7,4)	1375	> 95			< 5
Wiesbach	Hangquelle	Obere Felszone	1	0,85 (11,0)	7,7	10	90		
Baalborn	Störungs- oder Schichtquelle	Trifels-Schichten	1 2	8,8 (12,9)	68,3	< 1	90	< 10	
Mölschbach	Hangquelle	Karlstal-Felszone	1	3,94 (9,9)	40,3	> 95	< 5		< 1
Moosalbsprung	Störungs- oder Schichtquelle	Schlossberg-Schichten, Karlstal-Felszone	1 2	14,8 (13,1)	113	> 95			< 5
Breitenau	Talrand- oder Störungsquelle	Rehberg-Schichten	2	0,58 (11,2)	6,0	100			
Walkmühltal	Störungs- oder Schichtquelle	Karlstal-Schichten	1 2	2,87 (11,9)	24,2	100			

1) GWS (Grundwasserstockwerk): 1: Quellstockwerk, 2: tieferes, großräumig zusammenhängendes Grundwasserstockwerk

2) mittlere Schüttung in l/s im Jahr 2002 und Grundwasserneubildung in l/(s x km²)

3) Siedlungen, Verkehrswege, Gewässer

4.7.2 Quellabflüsse im Aschbach- und Moosalbtal im hydrologischen Jahr 1983

Im Rahmen einer Diplomarbeit von BECK (1984) wurden nahezu alle Quellen des Aschbachs und der Moosalbe gemessen. Die Daten zeigen einige wichtige Besonderheiten für den Randbereich zwischen Westlichen Pfälzer Wald und Kaiserslauterer Becken.

Die beobachtete Zeitreihe (September 1982 bis Juni 1983) der Quellschüttungsmessungen liegt in einem vergleichsweise sehr feuchten Zeitraum. So liegen die mittleren Niedrigwasserabflüsse am Pegel Thaleischweiler in diesem Zeitraum auf dem höchsten Niveau der Jahresreihe 1979 bis 1998.

Auf Grund eines regenreichen Winterhalbjahres 1982 gibt es zu Beginn der Zeitreihe bereits hohe Grundwasserstände sowie hohe Schüttungswerte der Quellen.

Der überwiegende Teil der beobachteten Quellen wird aus der Karlstal-Felszone (GWLG 2) gespeist. Die Quellen treten z. T. auch in den Schlossberg-Schichten aus, wobei es sich überwiegend um Hangschuttquellen handelt. Einige wenige Quellen im Aschbachtal sowie einige Quellen im Moosalbtal (Karte 8) entwässern aus der GWLG 3. Sie haben einen hohen Anteil an der Grundschüttungsmenge in den Sommermonaten. Hierzu gehört auch die Lauterspring, die aus den Trifels- und Rehberg-Schichten schüttet. Sie entwässert nach Norden zur Lauter, greift aber mit ihrem Einzugsgebiet in das Aschbachtal hinein. Sie spiegelt in ihrem Verlauf die Grundwasserneubildung im tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk wider.

Quellen im Moosalbtal und Aschbachtal

Die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes des oberen Moosalbtales (~37 km²) entspricht etwa dem des Aschbachtals (~46 km²). In Abb. 4-13 sind die Summen aller erfassten Schüttungen der Quellen für die beiden Täler gegenübergestellt. Zum Vergleich ist auch der Verlauf der Schüttungsmenge der Lauterspring dargestellt.

Die beobachtete Zeitreihe kann in vier Hauptphasen gegliedert werden. In der ersten Phase, die bis zum Dezember 1982 reicht, wird die Grundschüttung der Quellen in beiden Tälern vor der Grundwasserneubildungsphase wiedergegeben. Die Schüttungen der Quellen im Aschbachtal betragen zu Beginn der Zeitreihe nur etwa $\frac{1}{3}$ der Menge der Moosalbtalquellen. Dieses Verhältnis zeigen auch die Trockenwetterabflüsse in den Vorflutern (BECK 1984), wobei nur ca. $\frac{1}{4}$ der Menge aus den Quellen und ca. $\frac{3}{4}$ aus diffusen Zutritten stammt.

Kräftige Niederschläge im Dezember 1982 führen in der zweiten Phase zu einem gleichmäßigen Ansteigen der Schüttungsmengen in beiden Tälern.

In der dritten Phase, nach den großen Niederschlagsereignissen im April und Mai des Jahres 1983, steigt die Gesamtschüttungsmenge der Quellen des Aschbachtals wesentlich stärker an als im Moosalbtal und erreicht in den Spitzen vergleichbare Schüttungsmengen.

Gegen Ende der Zeitreihe (vierte Phase) ist im abfallenden Ast der beiden Schüttungskurven eine deutlich schnellere Schüttungsabnahme im Aschbachtal zu erkennen, was auf das geringere Retentionsvermögen der Grundwasserleiter zurückzuführen ist. Die Kluftdurchlässigkeiten scheinen hier etwas höher als im oberen Moosalbtal zu sein.

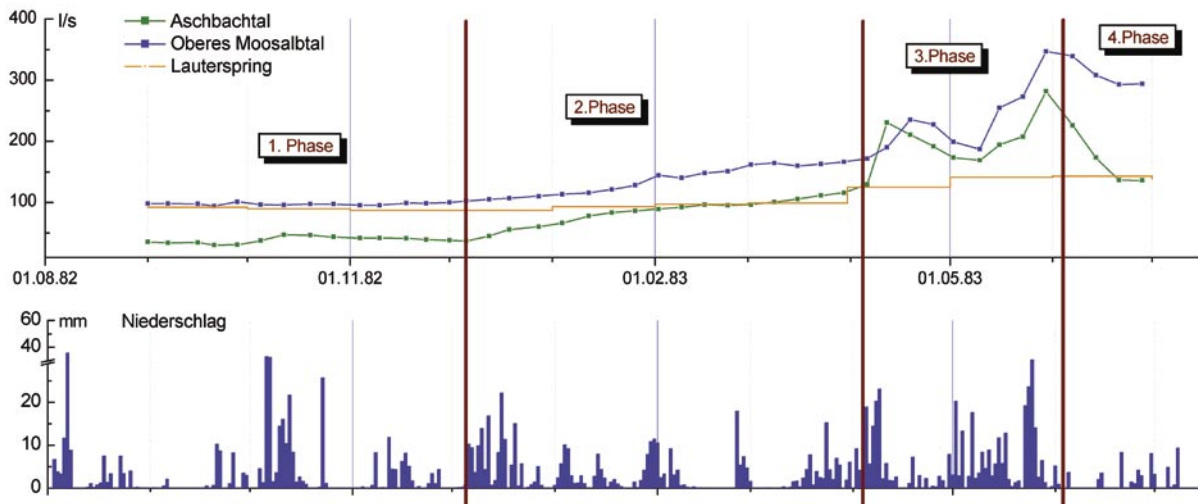


Abb. 4-13: Summe der Quellschüttungen im Aschbach- und Moosalbtal und Quellschüttung der Lauterspring im hydrologischen Jahr 1983.

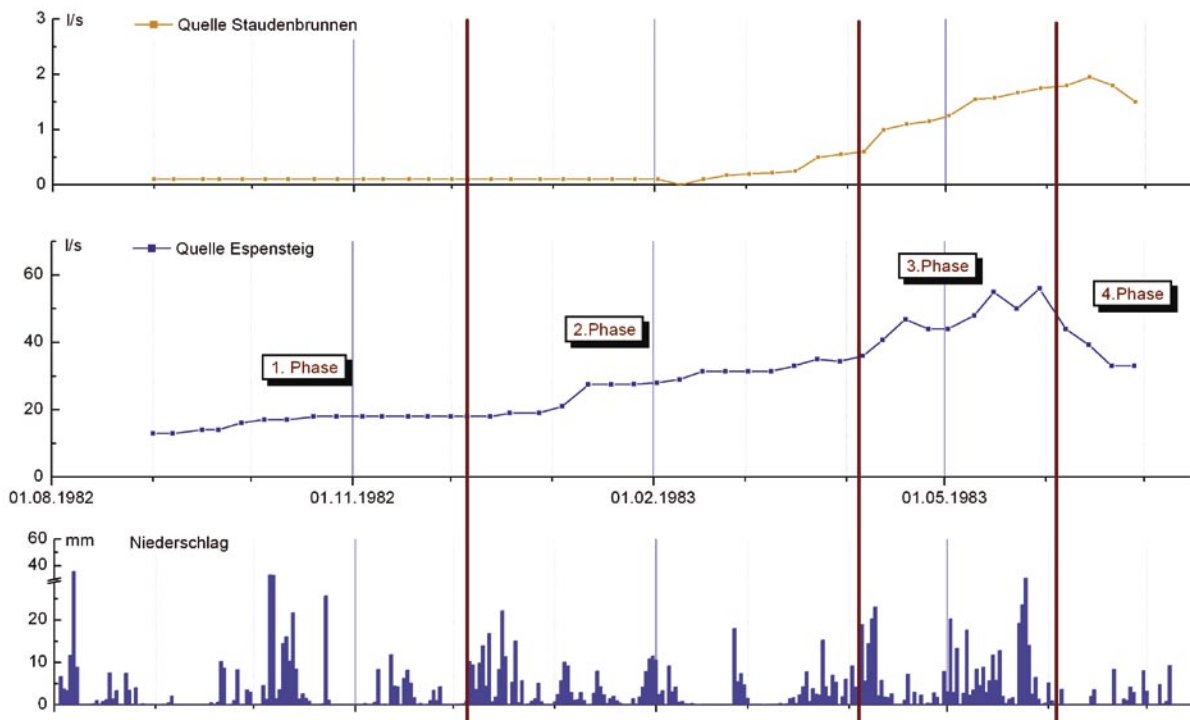


Abb. 4-14: Jahresgang von Quellen mit Anschluss an die tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasseroberfläche.

Quellen der GWLG 3

Die Quellen, welche die GWLG 3 entwässern, zeichnen sich durch eine vergleichsweise hohe Schüttung in Trockenphasen aus. Außerdem erfolgt die Reaktion auf Niederschlagsereignisse mit einer größeren Verzögerung und einem relativ ausgeglichenen Schüttungsverhalten.

Zwei dieser Quellen, die sich in der Tallage des Aschbachtals befinden, sind in Abb. 4-14 dargestellt. Die Quellaustritte liegen im oberen Teil der Rehberg-Schichten (GWLG 3).

Die Beobachtungen an den Quellen zeigen, dass in extremen Feuchtphasen, wie hier im Frühjahr 1983, die zusammenhängende Grundwasseroberfläche bis in den Talbereich ansteigt, während der Grundwasserspiegel der GWLG 3 in trockenen Phasen in diesem Bereich des Aschbachtals unter das Talniveau absinkt.

4.8 Grundwasserneubildung

4.8.1 Mittlere jährliche Differenzen aus Niederschlag und Verdunstung (1979 bis 1998)

Die Differenz aus Niederschlag (N) und aktueller Verdunstung (V) spiegelt den möglichen Gesamtabfluss eines betrachteten Raumes wider. Sieht man von Bereichen mit größeren Anteilen an Oberflächenabfluss ab, so ist die Differenz N-V in den meisten Fällen der Sickerwassermenge unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gleichzusetzen. Dort wo kein Interflow stattfindet, ist die Differenz aus N und V als potenzielle Grundwasserneubildung anzusehen.

Die Ermittlung der N-V-Höhen (mm/a) wurde unter Verwendung der mittleren jährlichen Niederschlagshöhen und der mittleren jährlichen Verdunstungshöhen (Karte 9) durchgeführt. Die Daten liegen ebenfalls in einem regelmäßigen Gitter mit 500 Meter Maschenweite vor.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind der Karte 9 zu entnehmen. Das Verteilungsmuster der N-V-Höhen ähnelt der Karte der mittleren jährlichen Abflüsse (Karte 10), wenngleich die Beträge der Einzelwerte unterschiedlich sein können. Auf Grund der unsicheren Datenlage (insbesondere beim Niederschlag) und der „nur“ modellierbaren Verdunstung ist davon auszugehen, dass die N-V-Werte tendenziell zu hoch liegen.

Auffallend sind der dicht besiedelte Bereich Kaiserslautern, die Flugplätze Ramstein und Sembach wie auch viele kleine Ortschaften, die sich durch hohe N-V-Werte auszeichnen. Bei diesen Flächen tritt zwar eine geringe Verdunstung auf, aber der weitaus größte Teil des Niederschlags kommt auf Grund der Versiegelung nicht der potenziellen Grundwasserneubildung zugute.

Auch ohne diese Flächen ergibt sich für die Verteilung der potenziellen Grundwasserneubildung im Betrachtungsgebiet ein stark differenziertes Bild. Im Kaiserslauterer Becken und Landstuhler Bruch sowie auf der Sembacher Platte und dem Otterberger Wald ist die potenzielle Grundwasserneubildung mit durchschnittlich 100 bis 200 mm vergleichsweise gering. Sie steigt mit zunehmender topographischer Höhe im Pfälzer Wald, der Sickinger Höhe sowie auch auf den Lauterhöhen und dem Kuseler Bergland auf 400 bis 600 mm an.

Die N-V-Karte verdeutlicht insbesondere das Verteilungsmuster der Grundwasserneubildung, weniger die echten Grundwasserneubildungsmengen. Diese liegen, wie die Abflussdaten zeigen (Kap. 4.8.2), deutlich darunter.

4.8.2 Grundwasserneubildung aus Abflussdaten

In stark reliefierten Mittelgebirgslagen lässt sich aus den Abflussdaten (Kap. 4.6 und 4.7) die Grundwasserneubildung relativ genau ermitteln. Voraussetzung ist, dass keine relevante Verschiebung der unterirdischen Wasserscheiden vorliegt.

Grundwasserneubildung im Buntsandstein

Als repräsentativ für den Buntsandstein wurde das Einzugsgebiet des Schwarzbachs ausgewählt, das sich auf Grund seiner Größe und der langjährigen Messreihen am Pegel Thaleischweiler besonders eignet. Darüber hinaus weist es einen recht einheitlichen hydrogeologischen Bau sowie einheitliche Böden und einheitliche Landnutzung (zumeist Mischwald) auf. Bis auf einen abschätzbaren Grundwasserabstrom im Norden zur Moorniederung und zum Kaiserslauterer Becken kann man davon ausgehen, dass das gesamte Grundwasser am Pegel zum Abfluss kommt. Nach der Abflussseparierung in Anlehnung an das Verfahren nach NATERMANN (Kap. 4.6.2) lässt sich ein Vergleich zu den Verfahren nach WUNDT, WUNDT_{SOMMER}, KILLE und dem MNQ-Verfahren ziehen (Abb. 4-15). Die grafische Abtrennung des NATERMANN-Verfahrens liefert dabei die differenziertesten Aussagemöglichkeiten.

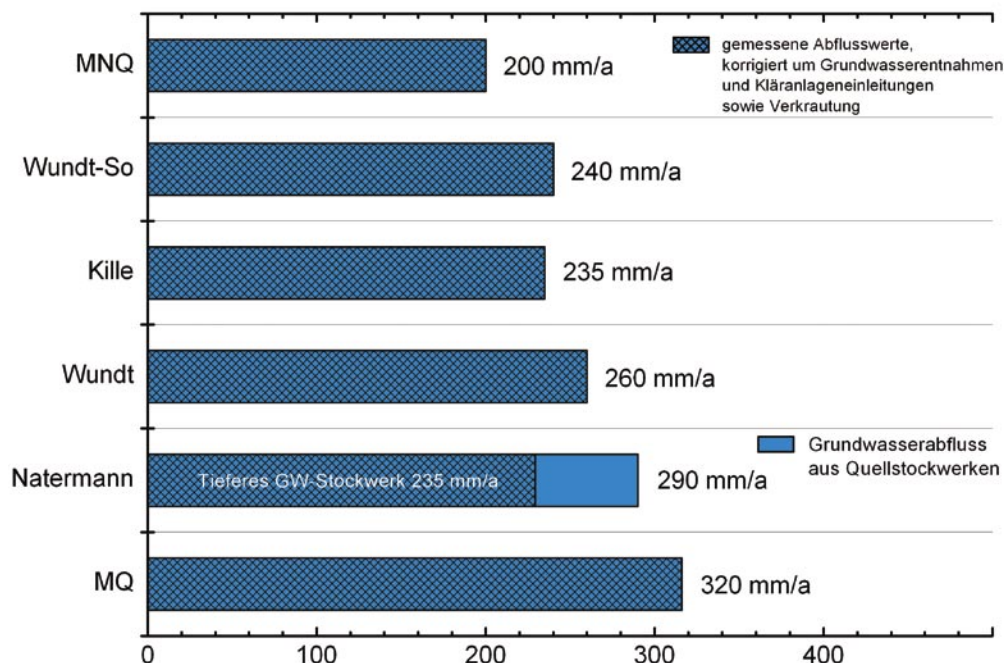


Abb. 4-15: Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Ermittlung langfristiger Grundwasserabflüsse des Schwarzbachs (Pegel Thaleischweiler).

Mit diesem Verfahren wird die höchste Grundwasserneubildungsrate von 290 mm/a ermittelt. Im Vergleich dazu zeigt das $WUNDT_{\text{SOMMER}}$ - und das KILLE-Verfahren, dass sie den länger gespeicherten Anteil vor allem aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserleiter wiedergeben. Das $WUNDT$ -Verfahren, das die NQ-Abflüsse sowohl der Sommer- als auch der Wintermonate berücksichtigt, erfasst auch einen Teil des Grundwasserabflusses aus den Quellstockwerken. Das MNQ-Verfahren, das nur den niedrigsten Pegelabfluss eines Jahres berücksichtigt, liefert eine Neubildungshöhe, die im Wesentlichen die langfristigen Mindestabflüsse aus den tieferen Grundwasserleitern wiedergibt.

Der Vergleich der Grundwasserneubildung nach verschiedenen Abflussabtrennungsverfahren mit dem statistischen Wert „Mittlerer Abfluss“, der auch Anteile von oberirdischen Abflüssen enthält, verdeutlicht, dass im Buntsandstein des untersuchten Gebietes ein sehr hoher Anteil am Gesamtabfluss ($\frac{2}{3}$ und mehr) aus Grundwasserabflüssen stammt.

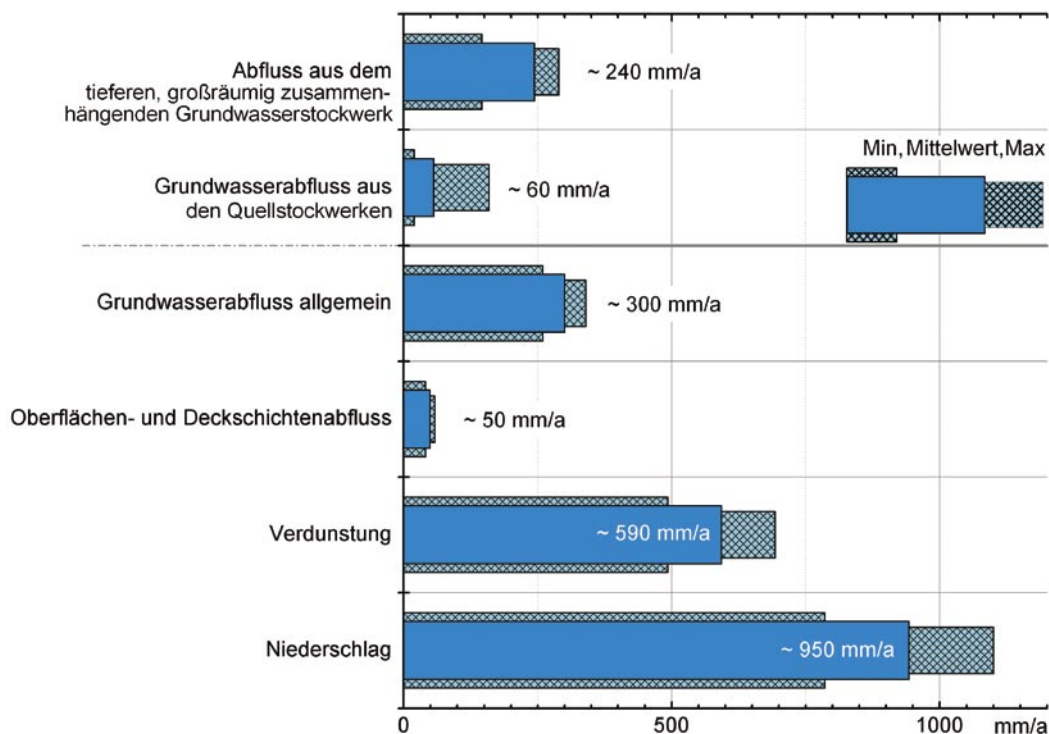


Abb. 4-16: Mittlere langjährige Wasserbilanzgrößen im Buntsandstein des Kartiergebietes.

Unter Einbeziehung der Zuwachsspends (Kap. 4.6.3), der Abflussspends (Kap. 4.6.4) und der Quellschüttungen (Kap. 4.7) kann man davon ausgehen, dass die Wasserbilanzgrößen des Schwarzbacheinzugsgebietes maßgebend für den Buntsandsteinanteil insbesondere der Rehberg- und Trifels-Schichten des Kartiergebietes sind (Abb. 4-16). Die Grundwasserneubildung im Kaiserslauterer Becken und im Landstuhler Bruch ist demgegenüber stark reduziert (Kap. 4.8.1). Die mittlere Grundwasserneubildungshöhe für diesen Raum liegt bei 100 bis 200 mm.

Für das Gebiet der Sickinger Höhe ergeben sich nach den Abflussdaten ebenfalls reduzierte Grundwasserneubildungshöhen, die zwischen 190 und 250 mm liegen (Kap. 4.6).

Grundwasserneubildung im Karbon und Rotliegend

Wie schon aus den allgemeinen hydrogeologischen Eigenschaften der Karbon- und Rotliegend-Gesteine (Kap. 4.1) ableitbar ist, ergibt sich auch aus den Abflusswerten eine sehr geringe Grundwasserneubildung, die im starken Kontrast zur potenziellen Grundwasserneubildung der N-V-Karte (Karte 9) steht. Nach allen angewendeten Abflusseparierungsverfahren liegt die ermittelte Grundwasserneubildung unter 100 mm/a, im Durchschnitt bei etwa 60 mm/a. Manche Quellen in der Auflockerungszone des Gebirges können in feuchten Jahren einen höheren Grundwasserabfluss liefern. Die Abflussmessungen zeigen aber, dass der oberirdische Abfluss im Vergleich zum Zechstein und Buntsandstein deutlich höher ist.

4.9 Hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer

Die hydrochemische Beschaffenheit wird anhand vorhandener und projektbezogen erhobener Daten zeitlich und räumlich beschrieben. Ziel der Auswertungen ist es, die langfristige Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit aufzuzeigen, die zugrundeliegenden hydrochemischen Prozesse zu beschreiben sowie tiefendifferenziert regionale Zusammenhänge zu erkennen.

4.9.1 Datengrundlage

Im Rahmen der Kartierung wurden Grundwasserproben aus Brunnen, Messstellen und gefassten Quellen entnommen und hydrochemisch analysiert. Der Gesamtdatensatz wurde für die Auswertung entsprechend der Zugehörigkeit zu den hydrogeologischen Einheiten aufgeteilt. Die Zuordnung der Bohraufschlüsse zu den hydrogeologischen Einheiten erfolgte über die filterwirksame Strecke, hilfsweise über die Filterstrecke.

Für die statistischen Auswertungen wurden alle zwischen dem 01.01.1980 und dem 31.12.2001, ausnahmsweise bis zum 02.06.2003, erhobenen Daten verwendet. Häufig sind mehrere Analysen eines Grundwasseraufschlusses in dem Datensatz enthalten. In der Karte 13 sind jeweils die Ergebnisse der jüngsten Analyse dargestellt.

Organik

Untersuchungsergebnisse organischer Verbindungen (Pflanzenschutzmittelwirkstoffe, leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) liegen ausschließlich vom Landesamt für Wasserwirtschaft vor, die im Rahmen des Landesgrundwasserdienstes an ca. 140 Grundwasseraufschlüssen erhoben worden sind. Wie zu erwarten fällt bei den Pflanzenschutzmittelwirkstoffen Atrazin (6 von 76 Analysen über der Nachweisgrenze) sowie dessen Metabolit Desethylatrazin (6 Analysen von 76 über der Nachweisgrenze) mit wenigen positiven Nachweisen auf, während alle anderen untersuchten Wirkstoffe bedeutungslos bleiben. Für Desethylatrazin liegt dabei nur an einer Messstelle mit 0,26 µg/l ein erhöhter, bislang nicht bestä-

tigter Wert vor. Bei den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) ist lediglich das ubiquitär vertretene Fluoranthren vereinzelt und in unauffälligen Konzentrationen nachgewiesen. Alle anderen untersuchten PAK sind nicht nachweisbar. Dagegen ist der relativ häufige Nachweis (bis 35% der 135 Analysen) von leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen im Wesentlichen auf die niedrigen analytischen Bestimmungsgrenzen zurückzuführen, durch die quasi-ubiquitäre Verteilungen erkennbar sind. Lokale Besonderheiten lassen sich dabei nicht erkennen.

4.9.2 Zeitreihenauswertung

Ausgewählte Messstellen werden seit vielen Jahren im Rahmen des Landesgrundwasserdienstes des Landesamtes für Wasserwirtschaft beprobt. Ergänzend zu der langfristigen Entwicklung wurden im Rahmen dieses Projektes zwischen Dezember 2001 und Juni 2003 an sieben Quellen Schüttung und Grundwasserbeschaffenheit durch das Landesamt für Geologie und Bergbau in Zusammenarbeit mit den Technischen Werken Kaiserslautern regelmäßig untersucht (Abb. 4-12, Kap. 4.7.1).

Kurzfristiges hydrochemisches Verhalten

Als repräsentative Referenzmessstelle wurde die Quelle Lauterspring wegen ihres sehr großen Einzugsgebietes und der entsprechend hohen Schüttung ausgewählt. Die weiteren Quellen sollten zum einen die höher gelegenen Quellstockwerke (Hangquellen) und zum anderen die zum regional zusammenhängenden Grundwasserleiter gehörenden Talrandquellen repräsentieren (Abb. 4-17 bis 4-19 und Tab. 4-2, Kap. 4.7.1).

Quelle Lauterspring

Die Quelle Lauterspring besitzt ein großes unterirdisches Einzugsgebiet. Sie wird aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk gespeist und zeigt daher einen langfristig ausgeglichenen Schüttungsverlauf ohne größere erkennbare Interflow-Anteile (Kap. 4.7.1).

Der recht ausgeglichene Verlauf der hydrochemischen Zeitreihen deutet eine weitgehend flächige Zusickerung aus dem oberflächennahen in den tieferen Aquifer an, die zu einer Mittelung eventueller Eintragungsspitzen führt. Die Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe sind, ausgenommen Magnesium, wahrscheinlich auf Grund der längeren Verweilzeit im Untergrund relativ hoch.

Wiesbachquelle

Die Wiesbachquelle ist eine Hangquelle mit einer geringen Schüttung auf Grund des vergleichsweise kleinen Einzugsgebietes. Die Schwankungsbreite der Schüttung ist relativ hoch, was auf eine schnelle Reaktion des Speichers auf Sickerwassereinträge schließen lässt.

Die vergleichsweise hohen Nitratwerte (Abb. 4-19 und 4-21), wie auch die höheren Sulfat- und Kaliumwerte, werden durch die überwiegend landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet verursacht.

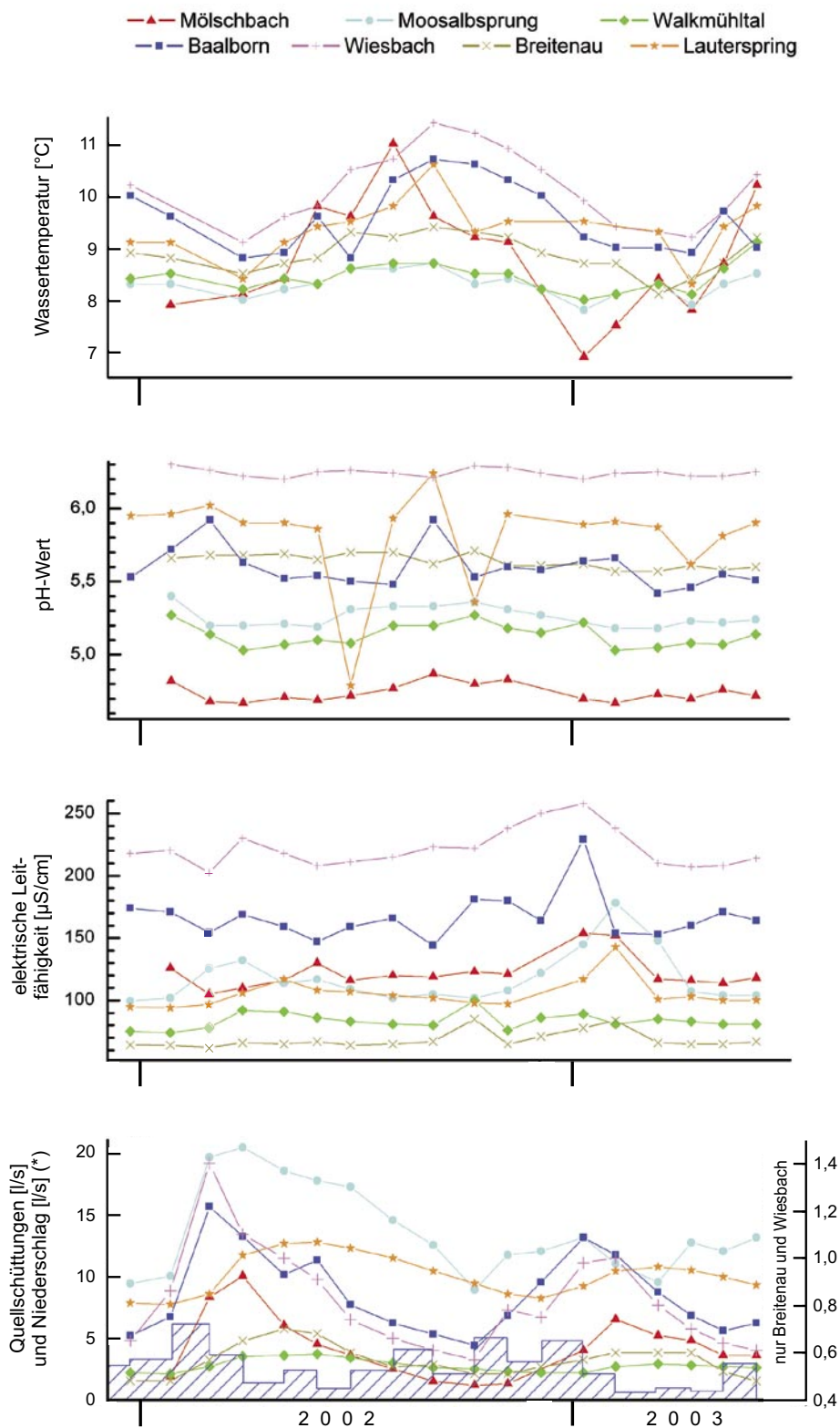


Abb. 4-17: Ausgewählte Zeitreihen der zwischen Dezember 2001 und Juni 2003 regelmäßig beprobten Quellen. Darstellung der Geländeparameter.

(*) Die Tageswerte des Niederschlags wurden für die jeweiligen Beprobungsintervalle addiert und in l/s umgerechnet. Die Schüttung der Quelle Lauterspring ist in 10 l/s angegeben.

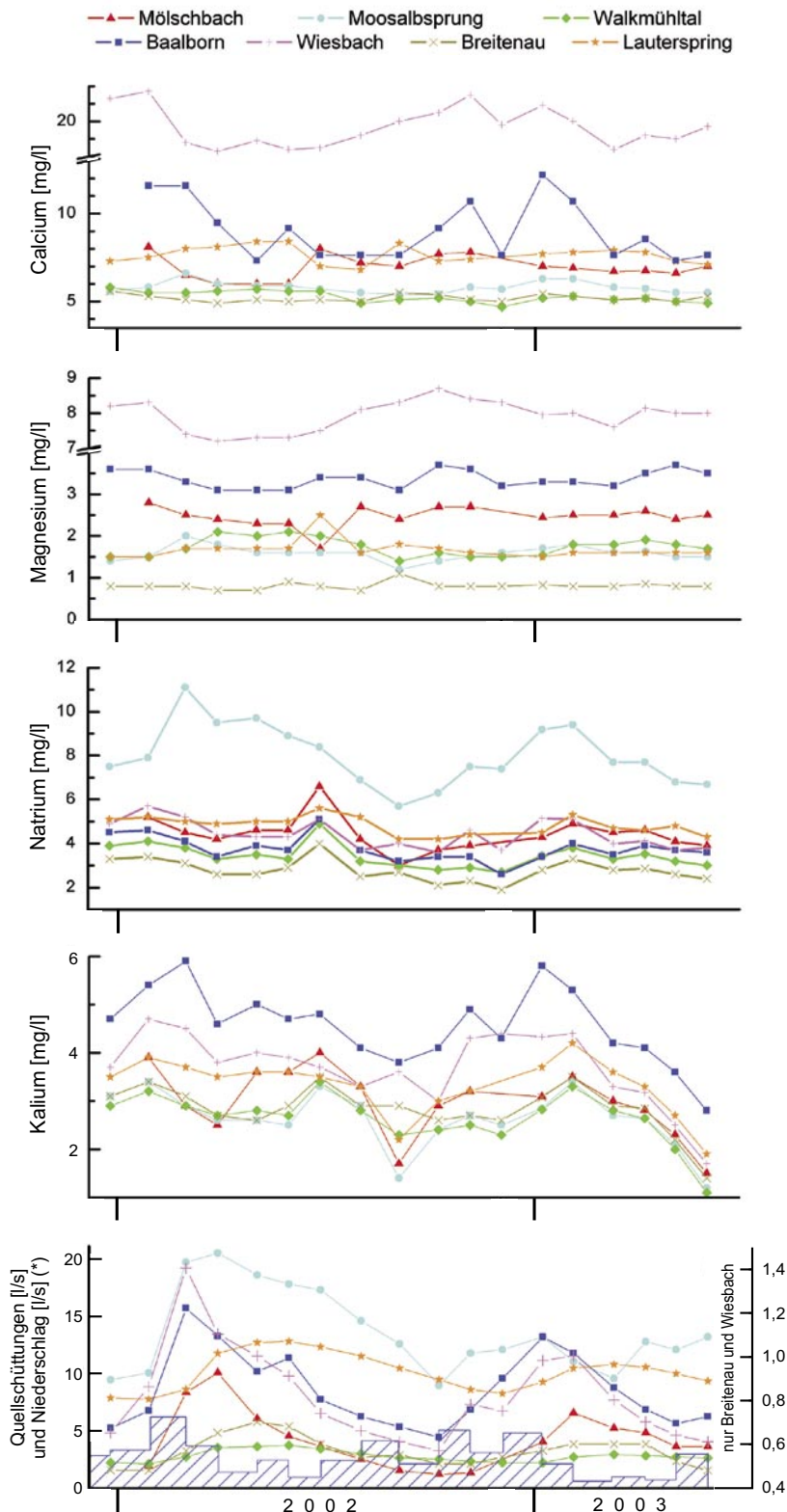


Abb. 4-18: Ausgewählte Zeitreihen der zwischen Dezember 2001 und Juni 2003 regelmäßig beprobten Quellen. Darstellung der Hauptinhaltsstoffe: Kationen.

(*) Die Tageswerte des Niederschlags wurden für die jeweiligen Beprobungsintervalle addiert und in l/s umgerechnet. Die Schüttung der Quelle Lauterspring ist in 10 l/s angegeben.

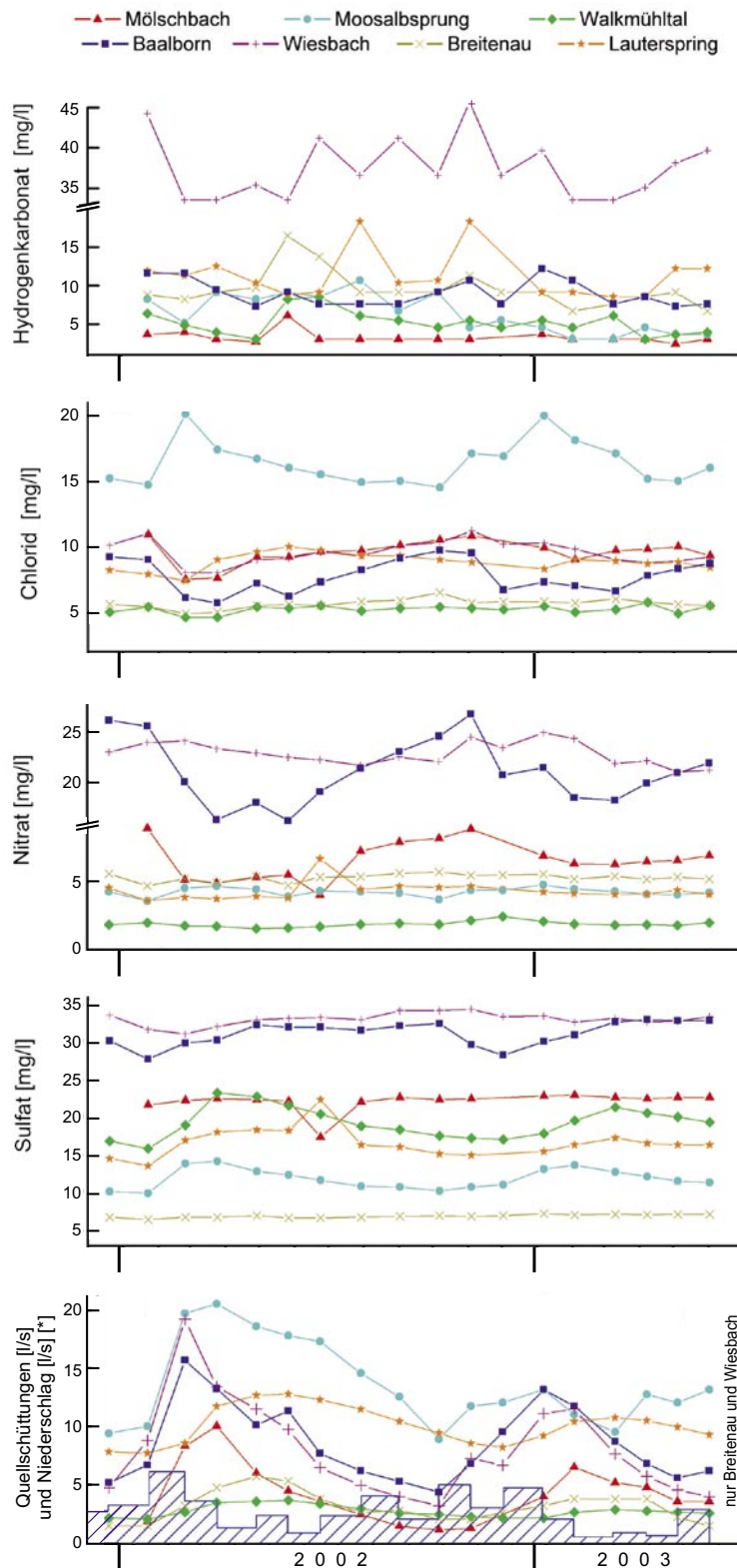


Abb. 4-19: Ausgewählte Zeitreihen der zwischen Dezember 2001 und Juni 2003 regelmäßig beprobten Quellen. Darstellung der Hauptinhaltsstoffe: Anionen.

(*) Die Tageswerte des Niederschlags wurden für die jeweiligen Beprobungsintervalle addiert und in l/s umgerechnet. Die Schüttung der Quelle Lauterspring ist in 10 l/s angegeben.

Die Stoffkonzentrationen werden von der Schüttungsänderung (maximal 1,4 l/s im Februar 2002 und minimal 0,57 l/s im Oktober 2002) beeinflusst. Die Gehalte der Hauptinhaltsstoffe Calcium und Magnesium werden bei zunehmender Quellschüttung verdünnt. Die Konzentrationen von Nitrat, Natrium und Kalium verlaufen dagegen in etwa parallel mit der Quellschüttung. Der nahezu konstante pH-Wert (6,2 bis 6,3) deutet auf eine gute Pufferung hin.

Baalbornquelle

Aus dem Schüttungsverhalten der Quelle (vgl. Kap. 4.7.1) lässt sich auf eine Störungs- oder Schichtquelle mit einem langzeitlichen Grundabfluss und einem oberflächennahen Spitzenabfluss (Interflow) aus dem Nahbereich der Fassung schließen.

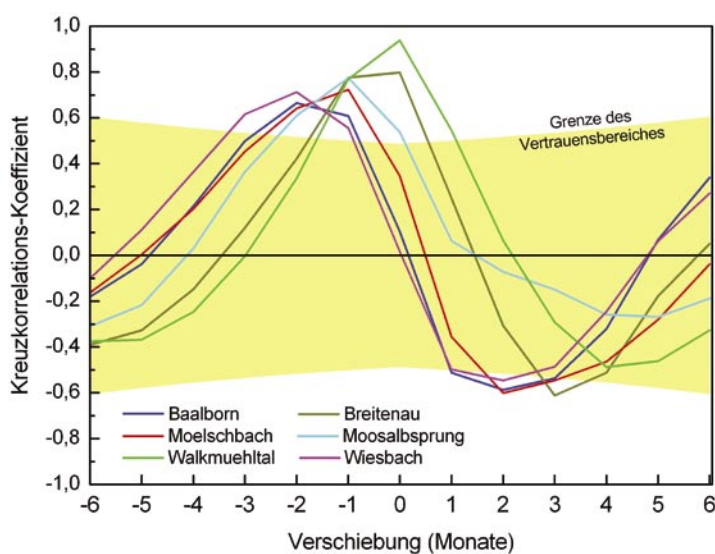


Abb. 4-20: Kreuzkorrelationen der monatlich gemessenen Quellschüttungen im Vergleich zur Referenzquelle Lauterspring. Je früher das Schüttungsmaximum erreicht wird, desto größer ist der Anteil schnell fließenden Grundwassers in der jeweiligen Quelle. In den Quellen Walkmuehltal und Breitenau korreliert die Schüttung ohne Verschiebung mit der Quelle Lauterspring, d.h. der Basisabfluss dominiert die Quellschüttung. In den Quellen Mölschbach und Moosalbsprung ist ein höherer Anteil jüngeren Grundwassers enthalten, da die beste Übereinstimmung mit der Referenzquelle einen Monat früher auftritt. Den größten Teil jungen Grundwassers zeigen die Quellen Wiesbach und Baalborn, die zwei Monate früher die beste Übereinstimmung zeigen. Der Vertrauensbereich umfasst die doppelte Standardabweichung.

Die überwiegend landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet zeigt sich an erhöhten Sulfat- und Nitratgehalten (Abb. 4-19 und 4-21), wobei eine Verdünnung der Nitratkonzentrationen bei steigender Schüttung stattfindet.

Wie die Kreuzkorrelation der Quellschüttung mit dem Nitratgehalt (Abb. 4-21) zeigt, finden Auswaschungseffekte mit bis zu rund 2 bis 3 Monaten Verzögerung statt.

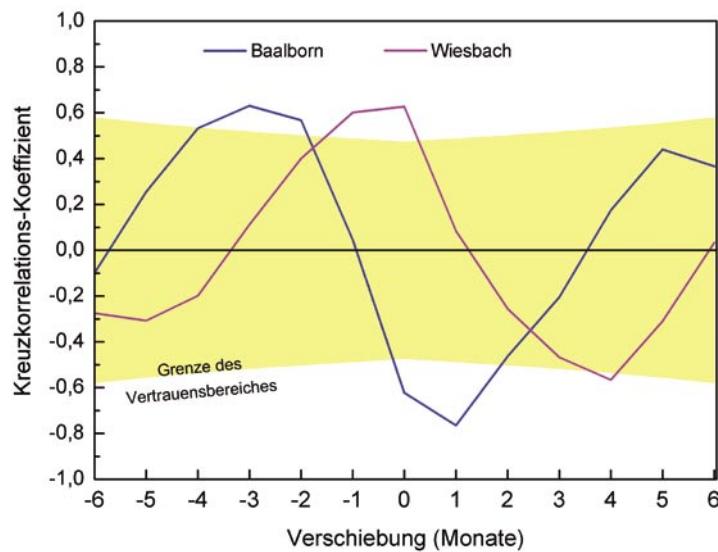


Abb. 4-21: Kreuzkorrelation zur Darstellung des signifikanten Zusammenhangs zwischen der Quellschüttungsmenge und dem Nitratgehalt der Quellen mit anthropogen erhöhten Nitratkonzentrationen. Bei der überwiegend oberflächennah angeströmten Wiesbachquelle führen Niederschlagsereignisse zu einem sehr gering verzögerten Austrag von Nitrat. Das im relativ großen Einzugsgebiet der Quelle Baalborn ausgewaschene Nitrat erreicht diese erst nach ca. drei Monaten. Der Vertrauensbereich umfasst die doppelte Standardabweichung.

Quelle Mölschbach

Die Quelle Mölschbach reagiert auf Niederschläge zeitlich verzögert mit einem typischen Trockenwetterabfluss in den Sommermonaten.

Die sehr niedrigen pH-Werte (unter 4,9) korrelieren mit erhöhten Aluminiumkonzentrationen (Abb. 4-22). Mittels Kreuzkorrelation ist ein signifikanter negativer Zusammenhang von Aluminium mit dem pH-Wert und mit Kieselsäure erkennbar. Der Karbonatpuffer ist vollständig aufgebraucht und der hohe Gehalt an Protonen (Säurebildnern) führt zu einer beschleunigten Aluminiumsilikatverwitterung (Glimmer, evtl. Feldspäte) und dementsprechend zur Freisetzung von Aluminium.

Die vergleichsweise niedrigen SiO_2 -Gehalte im Grundwasser (Abb. 4-23) sowie die negative Korrelation mit Aluminium sprechen für eine unabhängige Lösung von Quarz einerseits und Glimmern/Feldspäten andererseits. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Gesteinsanalysen des Landesamtes für Geologie und Bergbau, nach denen die Sandsteine nur 1% bis ca. 5% Al_2O_3 enthalten. Zudem durchläuft die Löslichkeit von Quarz im Bereich des pH-Wertes 4 ein Minimum (STUMM & MORGAN 1996), ebenfalls eine Bestätigung für unabhängige Lösungsvorgänge im Grundwasserleiter.

Quelle Moosalbsprung

Der Grundabfluss der Quelle Moosalbsprung ist relativ hoch, kurzfristige Sickerwassereinträge im Winter wie im Sommer machen sich in einem verzögerten Auslaufverhalten bemerkbar (Abb. 4-17).

Bei den Hauptinhaltsstoffen Chlorid, Sulfat und Natrium ist ein saisonaler Gang zu beobachten, der parallel zur Quellschüttung verläuft. Die Konzentrationen der Erdalkalien und von Nitrat schwanken dagegen geringfügig, ohne dass ein deutlicher Zusammenhang mit der Schüttungsmenge erkennbar ist. Es ist anzunehmen, dass die Gehalte an Chlorid und Natrium auf Streusalzeinträge – das Einzugsgebiet wird von der B 48 und der L 299 gequert – zurückzuführen sind, da sie gegenüber den natürlichen Gehalten erhöht sind (Cl: 15–20 mg/l gegenüber 5–10 mg/l; Na: 5,7–11,1 mg/l gegenüber 1,5–6,6 mg/l).

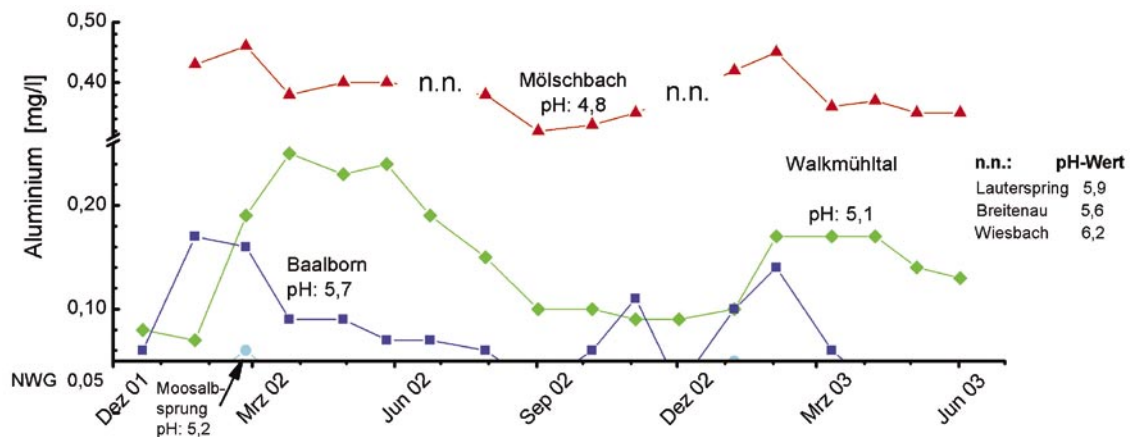


Abb. 4-22: Aluminiumkonzentrationen der Quellen mit Angabe der mittleren pH-Werte. Die Aluminiumgehalte sind bei niedrigen pH-Werten tendenziell höher. Sie werden durch das meist geringe Angebot in den Grundwasser leitenden Gesteinen in der absoluten Höhe jedoch begrenzt. Die drei Quellen mit nicht nachweisbaren Aluminiumkonzentrationen sind der Vollständigkeit halber ergänzt.

Quelle Breitenau

Die Quelle Breitenau weist trotz des sehr kleinen oberirdischen Einzugsgebietes (Tab. 4-2) nur geringe saisonale Schwankungen der Schüttung und der Stoffinhalte auf, da sie hydraulisch an das tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasserstockwerk angeschlossen ist. Die elektrische Leitfähigkeit als Zeichen des Lösungsinhaltes ist die niedrigste der monatlich gemessenen Quellen und zeugt damit von einem geringen Lösungsangebot des Untergrundes. Die Kreuzkorrelation (Abb. 4-20) zeigt, dass die Schüttung nur geringfügig vor der Quelle Lauterspring einsetzt und deutet damit das weitestgehende Fehlen eines Interflow-Anteils an.

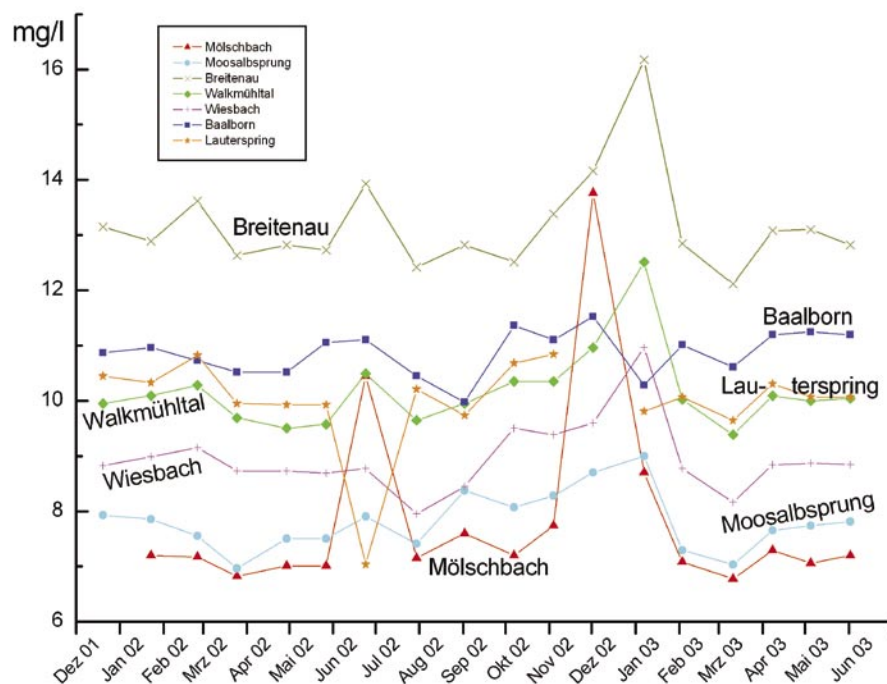


Abb. 4-23: Kieselsäuregehalte in den Quellwässern. Die pH-Werte bestimmen die Löslichkeit des Quarzes.

Quelle Walkmühltal

Wie bei der vorgenannten Quelle sind Schüttung und Stoffkonzentrationen der Quelle Walkmühltal im Jahresverlauf recht konstant (Abb. 4-17 bis 4-20). Auf Grund der zeitlichen Verzögerung zwischen Niederschlagsereignis und der Reaktion der Quellschüttung kann ein nennenswerter Interflowanteil ausgeschlossen werden. Ein Zustrom aus dem tieferen, großräumig zusammenhängenden Grundwasserstockwerk ist für einen höheren Grundwasserstand anzunehmen (vgl. Kap. 4.7.1). Dementsprechend wird von diesem nur der oberste Bereich erfasst, der auf Grund der Neubildung im Winterhalbjahr unter der mittleren Jahrestemperatur liegt. Deshalb folgt die Wassertemperatur (8,0–9,1 °C) mit geringer Verzögerung dem Jahresverlauf, ist aber deutlich niedriger als in der Quelle Lauterspring (8,4–10,6 °C), die den gesamten tieferen Aquifer erfasst. Einen deutlichen saisonalen Gang zeigen Sulfat und Aluminium. Die Grundwasserneubildung setzt mit einem markanten Anstieg der Sulfatkonzentration ein. In der Kreuzkorrelation tritt ein scheinbares „Vorauslaufen“ von Sulfat gegenüber der Quellschüttung auf. Dieser Effekt ist auf eine Auswaschung von Sulfat aus dem Sickerwasserraum zurückzuführen. Der pH-Wert und die Kieselsäure korrelieren signifikant negativ mit der Quellschüttung. Der pH-Wert erniedrigt sich bei ansteigender Schüttung, der Kieselsäuregehalt wird bei steigender Schüttung verdünnt.

Die Quelle im Walkmühltal ist mit einem pH-Wert von 5,0 bis 5,3 versauerungsgefährdet, wie auch die erhöhten Aluminiumgehalte von bis zu 0,25 mg/l zeigen (Abb. 4-22). Erwartungsgemäß ist die Kreuzkorrelation Aluminium und pH-Wert signifikant negativ.

Die Nitratgehalte sind mit meist unter 2 mg/l sehr gering (Abb. 4-19). Möglicherweise findet während der Untergrundpassage ein Nitratabbau statt, der sich an einzelnen positiven Nachweisen von Ammonium (bis 0,03 mg/l) und Nitrit (0,22 mg/l) zeigt.

Die natürliche Grundwasserbeschaffenheit ausgewählter Quellen

Die hydrochemische Zusammensetzung des oberflächennahen Grundwassers wird auch von den nassen und trockenen ubiquitären Depositionen beeinflusst, die u.a. unter dem Schlagwort „saurer Regen“ zusammengefasst werden. Nach den derzeitigen Modellrechnungen (GAUGER et al. 2000) können aus den Depositionen über die Grundwasserneubildungsrate die atmo-gen bedingten Konzentrationen der Stoffeinträge berechnet werden (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Stoffdepositionen aus der Atmosphäre (nach GAUGER et al. 2000) und Berechnung der Stoffeinträge in den Boden unter Berücksichtigung des Abflusses (Kap. 4.7.1) und Vergleich mit den Messergebnissen ausgewählter Quellen (Austrag).

Depositionen	kg/(ha x a)						
	Natrium	Calcium	Magnesium	Kalium	Stickstoff	Schwefel	Chlorid ¹
Minimum	11,6	4,9	0,3	2,12	19,32	21,34	0,49
Mittel	14,3	8,5	0,82	2,68	21,44	41,78	1,4
Maximum	16,9	12,0	1,34	3,23	23,56	62,22	2,31

¹ nur Nassdeposition, seewasserkorrigiert

	mg/l						
	Natrium	Calcium	Magnesium	Kalium	Nitrat	Sulfat	Chlorid
Eintrag	3,3–4,8	1,4–3,4	0,09–0,38	0,6–0,92	24,3–29,7	18,2–53	0,14–0,66
Breitenau	1,9–4,0	4,9–5,6	0,9–1,1	1,4–3,4	4,7–5,6	6,5–7,3	4,9–6,5
Austrag Walkmühltal	2,7–4,9	4,7–5,8	1,4–2,1	1,1–3,4	1,6–2,4	15,9–23,2	4,6–5,7
Lauterspring	4,2–5,6	7,1–8,4	1,5–2,5	1,9–4,2	3,6–6,7	13,6–22,4	7,4–10

Die meeresbürtigen Natriumeinträge sind als einzige weitgehend mit den Gehalten im Grundwasser vergleichbar. Bei den Erdalkalien und beim Kalium sind die Konzentrationen im Grundwasser z. T. deutlich höher als die Einträge, während die Stickstoff- und Schwefeleinträge erheblich über den Austrägen liegen. Da von Chlorid nur der relativ geringe Anteil der Nassdeposition bekannt ist, der zudem seesalzkorrigiert vorliegt, können aus dem konservativen Stoff keine Rückschlüsse gezogen werden.

Die Unterschiede können durch den Nährstoffbedarf der Pflanzen (Nitrat und Sulfat) erklärt werden, der zu einer Erniedrigung der Austräge führt bzw. durch die Gesteinsverwitterung, die eine Erhöhung der Stoffabfuhr (Erdalkalien und Kalium) zur Folge hat. Stoffumsetzungen im Boden und Gestein, Zwischenspeicherung und -freisetzung können ebenfalls zu unterschiedlichen Einträgen und Austrägen führen.

Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit

Die systematische Beobachtung der Grundwasserbeschaffenheit an amtlichen Messstellen im Kartiergebiet setzt mit dem Jahr 1981 ein. Seit dieser Zeit wird in einem West-Ost-Profil an insgesamt sechs Standorten das oberflächennahe Grundwasser regelmäßig untersucht. Bis 1997 erfolgten die Beprobungen dreimal pro Jahr, seither jedoch nur noch zweimal jährlich. Neben den Hauptkationen und -anionen wird regelmäßig der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, der Permanganatindex, der DOC (dissolved organic carbon), der AOX (adsorbierbar organisch gebundene Halogene), der SAK (spektraler Absorptionskoeffizient), der Sauerstoffgehalt und die Tritiumaktivität bestimmt. Dieser Parameterumfang wird unregelmäßig erweitert um die Bestimmung ausgewählter LHKW, Pflanzenschutzmittelwirkstoffe sowie Schwermetalle.

Neben diesen Profilmessstellen werden seit etwa 1985, beginnend mit dem Aufbau des LAWA-Grundmessnetzes, weitere 22 Messstellen an 15 Standorten ein- bis zweimal pro Jahr hydrochemisch untersucht. Die tiefste Messstelle (3040 III–Heltersberg) weist dabei eine Ausbautiefe von 90 m unter Gelände auf.

Daneben stehen die Untersuchungsergebnisse von derzeit insgesamt 44 Rohwassermessstellen an Wasserfassungen der öffentlichen Wasserversorgung zur Verfügung. Seit 1991 werden im Rahmen einer freiwilligen Kooperationsvereinbarung die Ergebnisse der Roh- und Trinkwasseruntersuchungen von den öffentlichen Wasserversorgungsbetreibern an das Landesamt für Wasserwirtschaft gemeldet. Dieses Datenkollektiv ist jedoch sehr inhomogen, so dass es sich für eine Analyse von Zeitreihen weniger eignet (LfW 2001).

Zeitreihenanalysen eignen sich insbesondere zu Trendaussagen bei Wasserinhaltsstoffen, die im Wesentlichen anthropogener Herkunft sind. Geogene Parameter hingegen sollten sich in ihrer zeitlichen Entwicklung durch eine weitgehende Konstanz der Messwerte auszeichnen. Auch lassen sich durch Zeitreihenanalysen Parameter ihrer Herkunft nach abgrenzen, die sowohl geogener als auch anthropogener Natur sein können.

So zeigt die Dreifach-Messstelle 3040 I-III–Heltersberg als Besonderheit relativ hohe Werte für Gesamt-Phosphor; ein Parameter, der in erhöhten Konzentrationen üblicherweise für eine anthropogene Beeinflussung des Grundwassers steht (Abwasser, Düngung). In ihrer Zeitreihe sind die Phosphatwerte jedoch sehr stabil (Abb. 4-25), was in Verbindung mit der nach der Tiefe hin steigenden Konzentration für geogene Quellen spricht. Phosphor ist ein wichtiger Bestandteil der Lithosphäre, der sich vor allem im Apatit findet. Er ist mit 529 mg/kg am Aufbau der Sandsteine beteiligt (MATTHESS 1990), geogen jedoch meist außerordentlich immobil. Erhöhte Phosphatwerte stammen damit in aller Regel aus anthropogenen Quellen.

Das Bohrprofil der Messstelle 3040 zeigt im Bereich 31 bis 43 m unter Gelände „einzelne Eisenerzrinden“ und im Bereich 76,5 bis 97 m unter Gelände „zahlreiche Eisenerzrinden“. Mögliche Eisenerzminerale sind Heterosit (Fe, Mn)[PO₄] bzw. Purpurit (Mn, Fe)[PO₄]. Beschrieben wird auch das In-Lösung-Gehen von Apatit Ca₅(F, Cl)[PO₄]₃ durch Versauerungseinwirkung in Buntsandstein-Sedimenten, wobei aber hier die oberen Horizonte betroffen wären. Die Sandsteine sind im Profil bis etwa 30 m Tiefe hell und erzfrei (also ausgebleicht), darunter eher dunkel und zunehmend erzführend beschrieben. Damit gibt es mit zunehmender Tiefe ein gewisses Phosphatangebot, mit der Folge, dass das Grundwasser an diesem Standort Werte bis zu 0,4 mg/l aufweist.

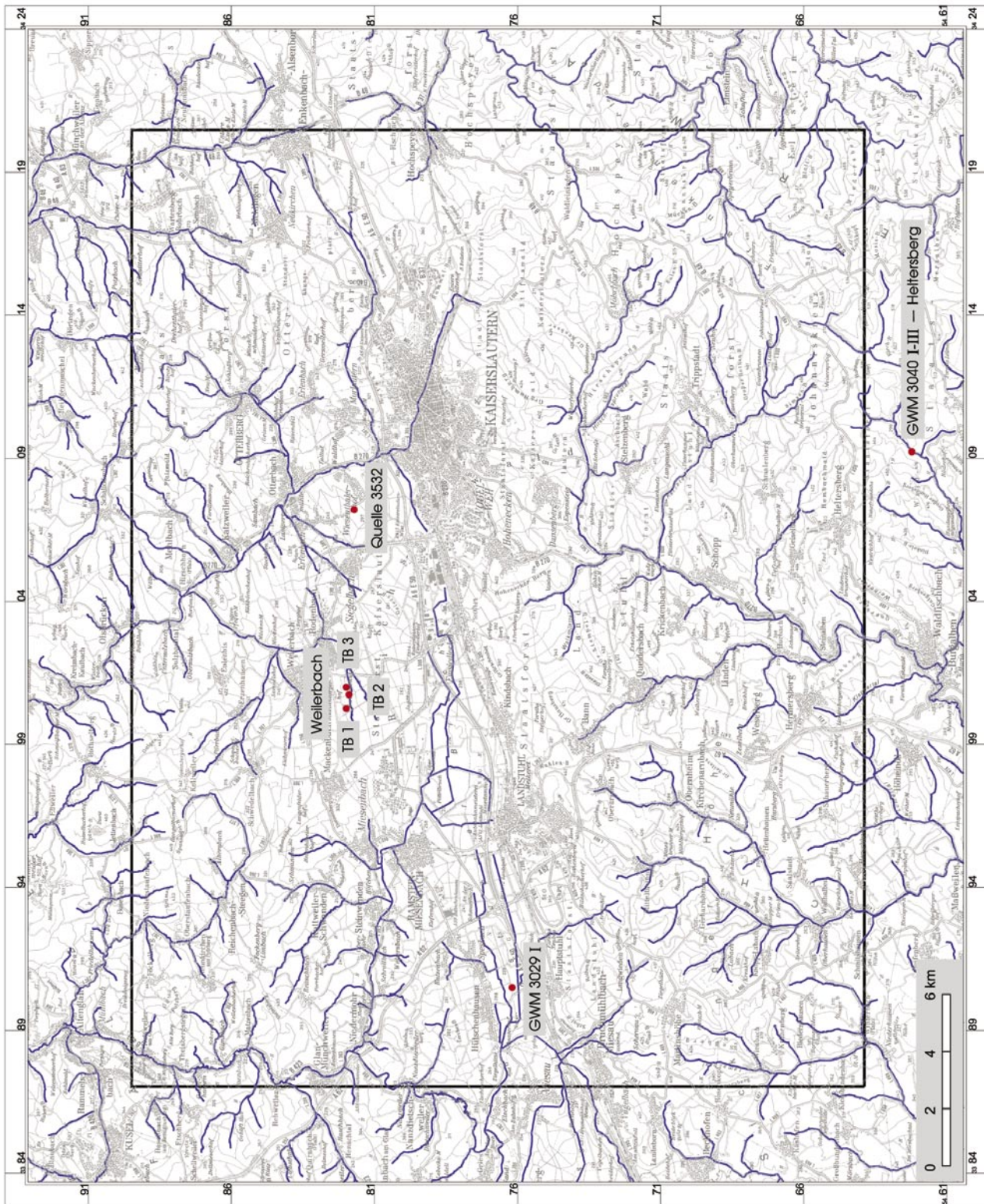


Abb. 4-24: Lage ausgewählter Messstellen.



Diese Messstelle zeigt exemplarisch, dass es im Buntsandstein, im Bereich von Vererzungszonen zu geogenem Auftreten erhöhter Phosphatwerte im Grundwasser kommen kann.

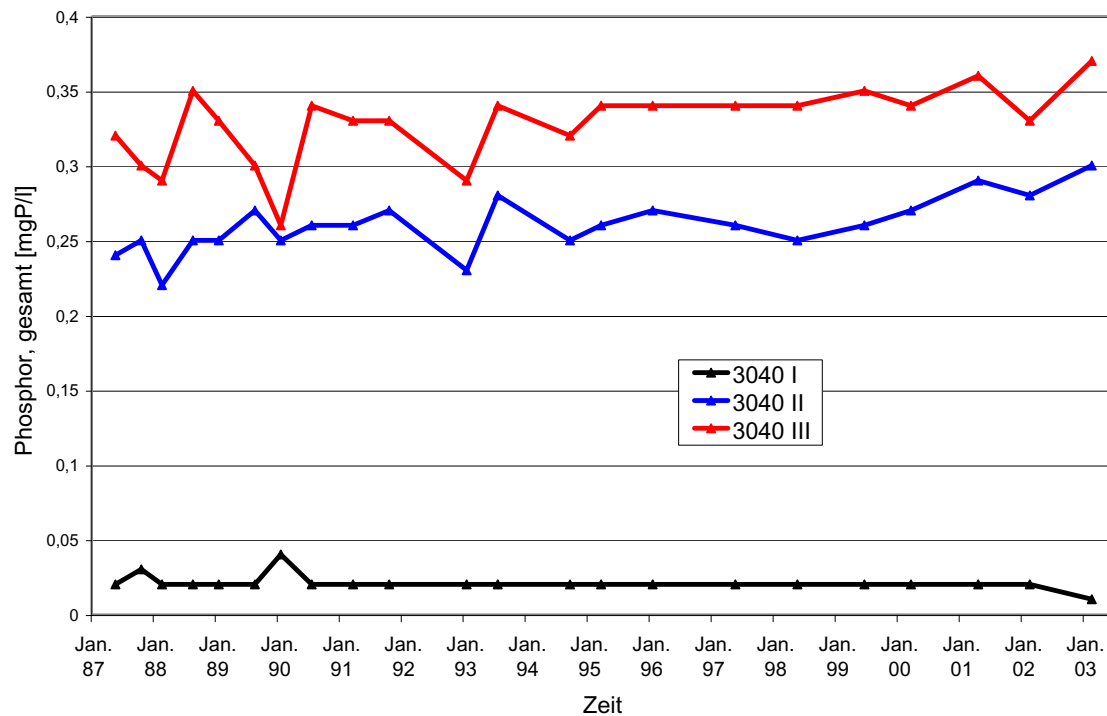


Abb. 4-25: Entwicklung des Gesamt-Phosphorgehaltes an der Dreifach-Messstelle 3040 I-III.

Zu den flächenhaften, ausschließlich anthropogenen Grundwasserbelastungen zählt hingegen das mögliche Auftreten erhöhter Nitratkonzentrationen im Grundwasser. Während bio- und pedogen maximal Werte von 5 bis 8 mg/l zu erklären sind (Abb. 4-32), müssen höhere Werte in der Regel auf die Beeinflussung durch die landwirtschaftliche Bodennutzung bzw. den Düngemiteleinsatz zurückgeführt werden. Darüber hinaus spielt im Untersuchungsgebiet auf Grund der Basenarmut insbesondere des oberen Buntsandstein der atmogene Stickstoffeintrag als Folge des sauren Regens ebenfalls eine Rolle.

Höhere Nitratwerte im Grundwasser finden sich im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Böden insbesondere im Gebiet der Sickinger Höhe (Karte 13). Dabei werden im oberflächennahen Bereich Nitratwerte der Klasse 25 bis 50 mg/l relativ häufig erreicht, während Werte über 50 mg/l Einzelfälle ohne flächenhafte Ausbreitung sind und damit Punktquellen zugeordnet werden müssen. Durch die Klüftigkeit des Gesteins können jedoch insbesondere bei Wasserentnahmen aus tieferen Grundwasserbereichen – und damit nach unten gerichteten Strömungsgradienten – Nitrationen in größere Tiefen verlagert werden. Im Bereich dreier Entnahmebrunnen sind bei Brunnenausbauteufen von 140 bis 170 m unter Gelände sowie Ringraumabdichtungen bis zu 34 m unter Gelände dennoch Nitratwerte um 20 bis 40 mg/l zu beobachten (Abb. 4-26). Fehlende organische Substanz sowie relativ hohe Sauerstoffgehalte des Grundwassers führen im Kartierungsbereich nicht zur flächigen Ausbildung reduzierender Milieus, die eine mikrobiologische Nitratzehrung zur Folge haben können, wie dies z. B. in den Lockergesteinssedimenten des Rheingrabens zu beobachten ist.

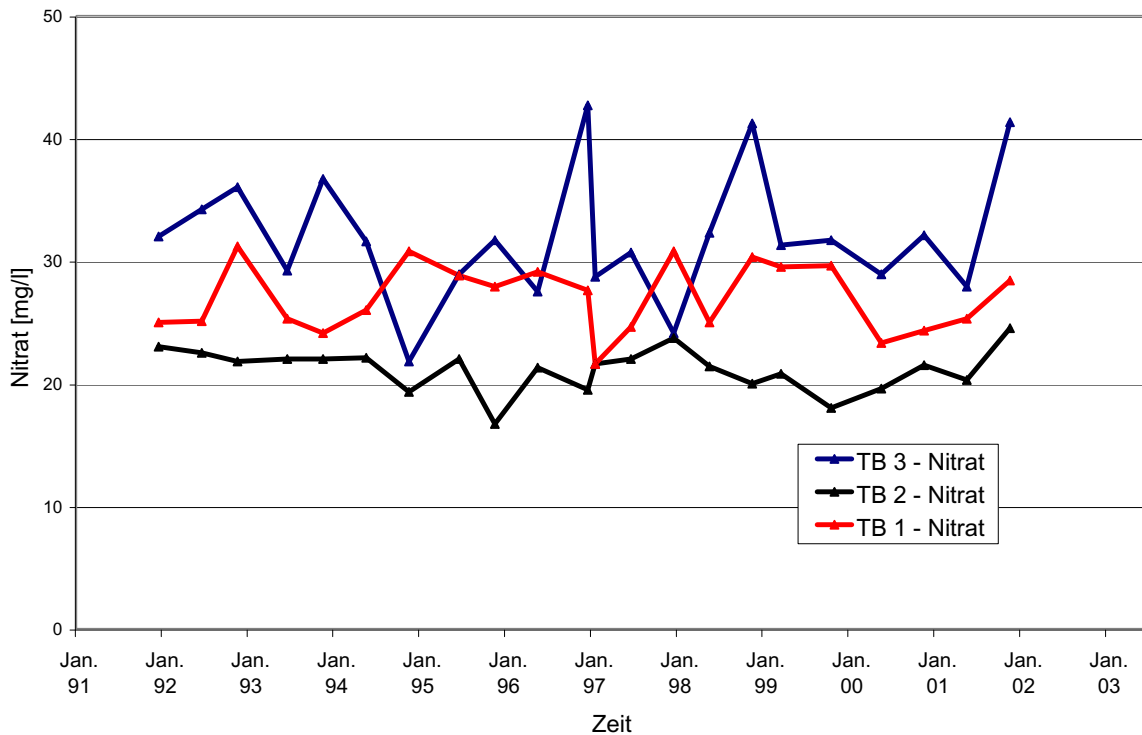


Abb. 4-26: Entwicklung der Nitratwerte im Grundwasser der Tiefbrunnen Weilerbach.

Abzugrenzen von diesen auf den Düngemiteleintrag, das geringe Rückhaltevermögen der Böden sowie den klüftigen Untergrund rückführbaren lokalen Nitratbelastungen des Grundwassers sind die atmosphären (Stick-)Stoffeinträge. Auf Grund der geringen Säureneutralisierungskapazität des Buntsandstein können nicht nur in exponierten Hanglagen, sondern auch an einigen oberflächennahen Grundwassermessstellen im Landstuhler Bruch fallende pH-Werte gemessen werden. So zeigt die Messstelle 3029 I seit Beginn der Beobachtungen ab 1981 einen kontinuierlich fallenden pH-Wert in Verbindung mit dem Anstieg der Nitrat- und auch Sulfatkonzentrationen. Die Nitratwerte erreichen aktuell 8 mg/l und die Sulfatwerte 20 mg/l (Abb. 4-27).

Sowohl die Nitrat- wie auch die Sulfatkonzentrationen lassen dabei saisonale Schwankungen erkennen. Die Messwerte zeigen meist ausgangs des hydrologischen Winterhalbjahres, während der Grundwasserneubildungsphase, ihren Höchststand. Saisonal schwanken die Nitratkonzentrationen dabei um etwa 3 mg/l, die Sulfatkonzentrationen bis zu 10 mg/l. Mit den gemessenen pH-Werten, die 5,5 nicht unterschreiten, ist der Karbonatpufferbereich noch aktiv, der Silikat- oder gar der Aluminiumpufferbereich wird nicht erreicht.

An exponierten Oberhang-Quell-Standorten im Zechstein und Buntsandstein des Kartiergebietes können jedoch auch pH-Werte gemessen werden, die den Aluminiumpufferbereich zumindest zeitweise erreichen. So zeigt die Quelle 3532–Kaiserslautern auf 285 m NN pH-Werte deutlich unter pH 5 verbunden mit Aluminiumkonzentrationen über 2 mg/l. Trotz der weitmaschigen Beprobungsdichte lässt sich die Gegenläufigkeit von pH und Al_3^+ erkennen (Abb. 4-28). Niedrige pH-Werte begünstigen das In-Lösung-Gehen von Aluminiumionen.

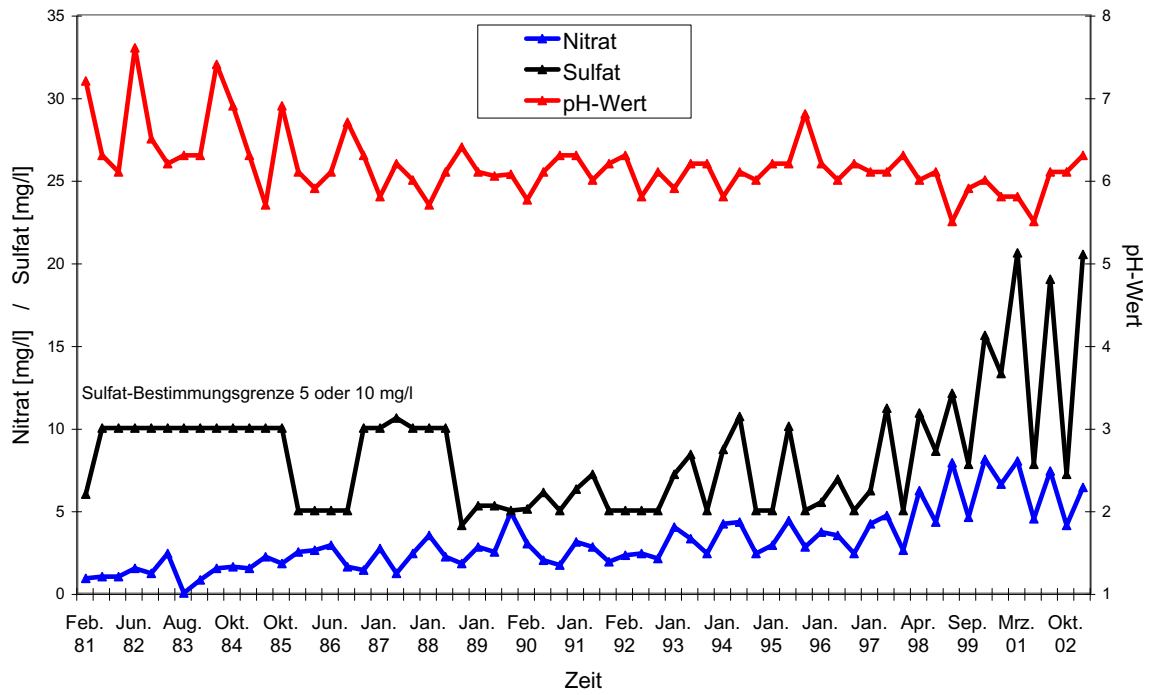


Abb. 4-27: Entwicklung von pH-Wert, Nitrat- und Sulfatkonzentration an der Grundwassermessstelle 3029 I.

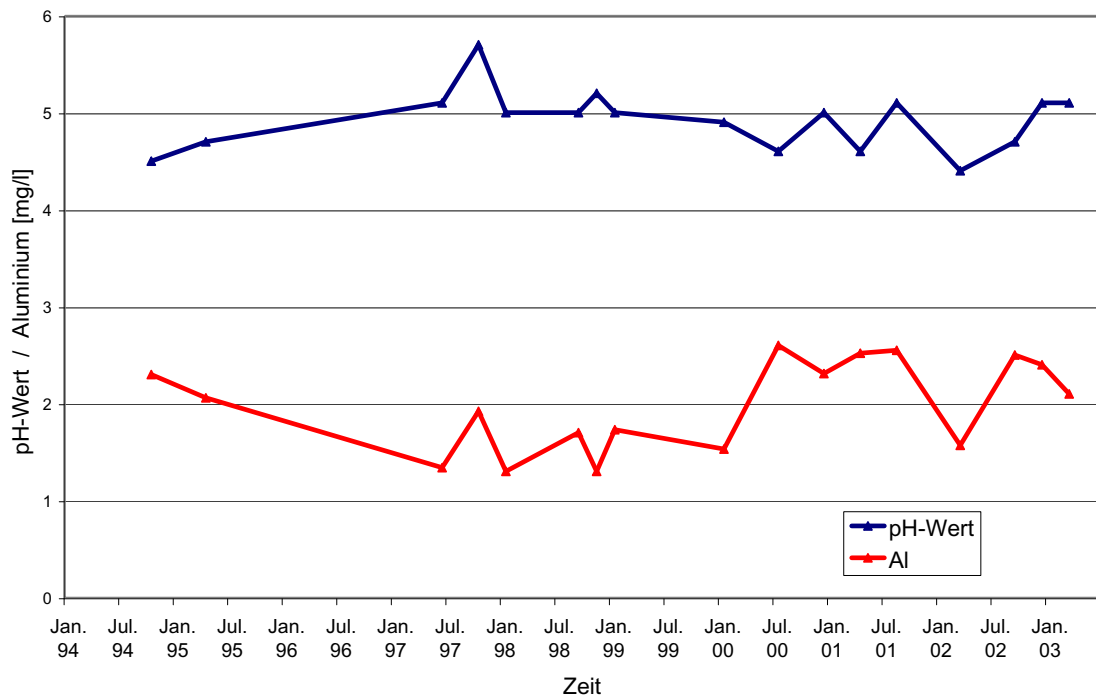


Abb. 4-28: Entwicklung von pH-Wert und Aluminium an der Oberhang-Quelle 3532.

Es ist damit festzuhalten, dass im Kartiergebiet auf Grund der Basenarmut des Zechstein und Buntsandstein sich atmogene Depositionen zumindest an exponierten Standorten nachteilig auf die Grundwasserbeschaffenheit auswirken können. Im Bereich landwirtschaftlich genutzter Böden stellt die mögliche Tiefenverlagerung von Nitratbelastungen des oberflächennahen Grundwassers infolge des klüftigen Untergrundes und fehlender Trennhorizonte ein weiteres und belegtes Gefährdungspotenzial des Grundwassers dar.

4.9.3 Regionalisierung

Bevor die Daten regionalisiert werden können, sind die Analysen der jeweiligen hydrogeologischen Einheit zuzuordnen. Die im Untersuchungsgebiet bedeutsamen Einheiten sind die Stauf- bis Rehberg-Schichten (zSt–sR), die Schlossberg und Karlstal-Schichten (sS–sK) sowie die Obere Felszone bis zum Voltziensandstein (sOF–soV). Diese hydrogeologische Zuordnung wird mittels der Diskriminanzanalyse überprüft. Hierbei ergibt die hydrogeologische Einheit in Kombination mit der möglichen Überdeckung die beste Übereinstimmung (Tab. 4-4).

Tab. 4-4: Die Diskriminanzanalyse aus der Überdeckung und der hydrogeologischen Einheit bestätigt die drei vorgegebenen Gruppen der Grundwassertypen in 82,7% der Fälle. Wegen der sehr unterschiedlichen Größe der Teilgruppen wurde die Diskriminanzanalyse gewichtet durchgeführt. Acht Analysen bleiben ungruppiert.

Überdeckung	hydrogeologische Einheit	Typ	berechnete Gruppenzugehörigkeit						Gesamt N = 1175
			1	2	3	1	2	3	
Muschelkalk	sOF–soV	1	4	11,8%	0		30	88,2%	34
sOF–soV	sS–sK	2	3	1,6%	35	18,9%	147	79,5%	185
sS–sK	zSt–sR	3	3	0,3%	22	2,3%	939	97,4%	964

Im Einzelnen zeigt sich jedoch, dass sowohl der Typ 1 als auch der Typ 2 ganz überwiegend dem Typ 3 zugeordnet werden und der hohe Zuordnungsgrad aus den sehr ungleichen Gruppengrößen resultiert. Damit ist keine eindeutige Zugehörigkeit der Grundwässer zu den verschiedenen hydrogeologischen Einheiten mittels Diskriminanzanalyse festzustellen. Es lassen sich statistisch keine eigenständigen hydrochemischen Charaktere der drei Grundwassertypen nachweisen.

4.9.4 Allgemeine Charakteristik der Grundwasserbeschaffenheit

Für die allgemeine Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit existieren eine Vielzahl grafischer Methoden, von denen drei sich ergänzende Darstellungen (Piper-Diagramm, Box-Plot und Wahrscheinlichkeitsnetz) ausgewählt wurden.

Piper-Diagramm

Zur übersichtlichen Darstellung der Ionenbeziehungen großer Datensätze eignet sich besonders das Piper-Diagramm (DVWK 1990). Hier werden die prozentualen Anteile der Hauptinhaltsstoffe in Milliäquivalenten zusammengefasst (Abb. 4-29).

Die Streuung der Ionenanteile ist, bei einem allgemein relativ geringen Lösungsinhalt, bei allen drei Grundwassertypen recht groß. Vor allem bei den Anionen ist eine sehr große Variabilität ausgebildet, die vorwiegend durch anthropogene Stoffeinträge sowie durch wechselnde Anteile karbonathaltiger Sedimente, insbesondere des Muschelkalk, im Einzugsgebiet verursacht ist. Auf der Kationenseite überwiegen die Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium, wobei die Anteile der Alkalimetalle Natrium und Magnesium häufig relativ hoch sind.

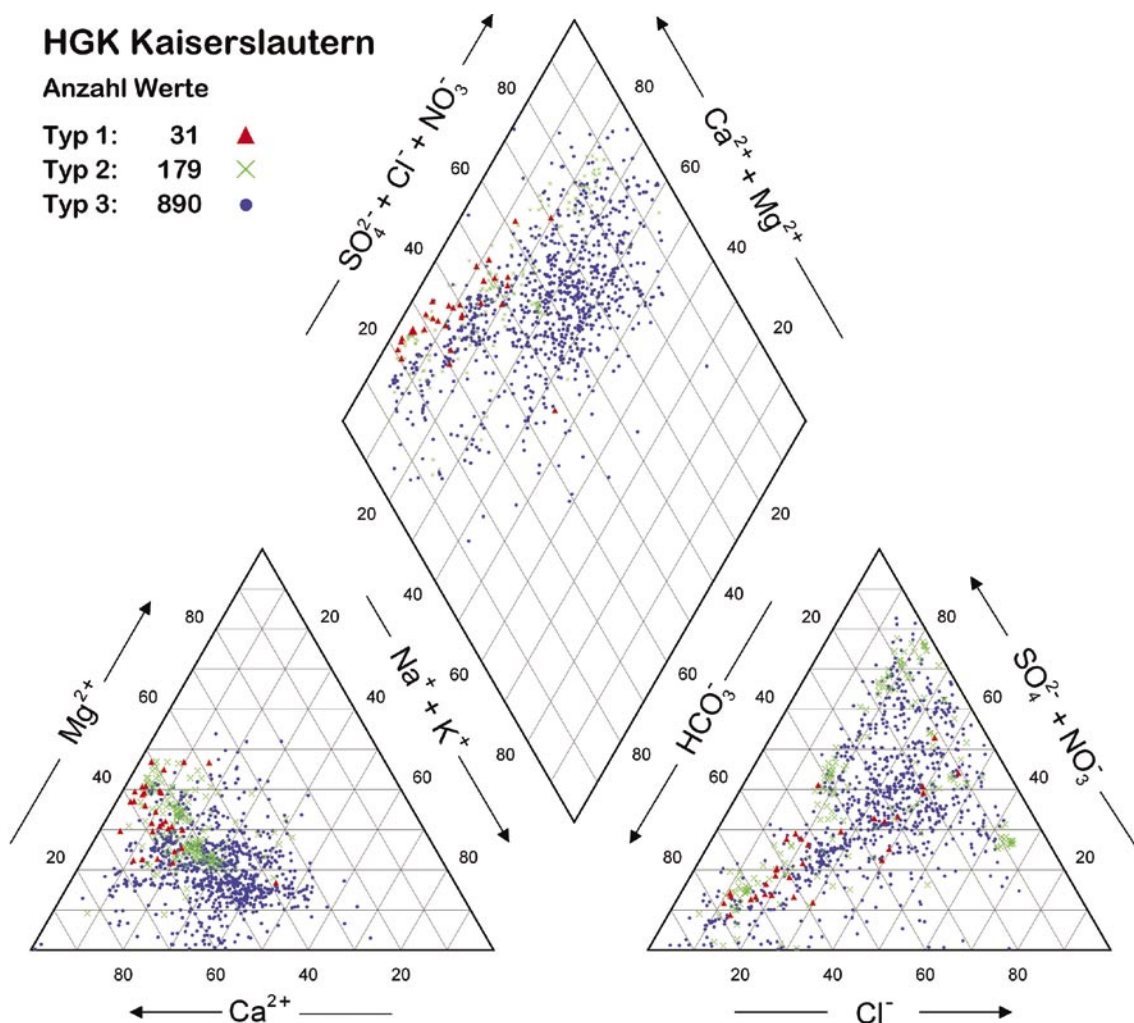


Abb. 4-29: Piper-Diagramm aller vollständigen Grundwasseranalysen, Angaben in mmol(eq)%. Die Zuordnung zu den Grundwassertypen zeigt vollständige bis großflächige Überlagerungen, so dass getrennte Darstellungen nicht aussagekräftig sind.

Box-Plots

Als zusammenfassende Übersichtsdarstellung werden die Hauptinhaltsstoffe der Grundwässer aus dem Zechstein und Buntsandstein als Box-Plots ausgewertet, da in ihnen alle relevanten statistischen Kennzahlen enthalten sind (Abb. 4-30 und 4-31). Hier lassen sich auch die Unterschiede in den Grundwassertypen zusammenfassend erkennen, die weder im Piper-Diagramm (Abb. 4-29) noch in den Wahrscheinlichkeitsnetzen (Abb. 4-32) unterschieden werden können.

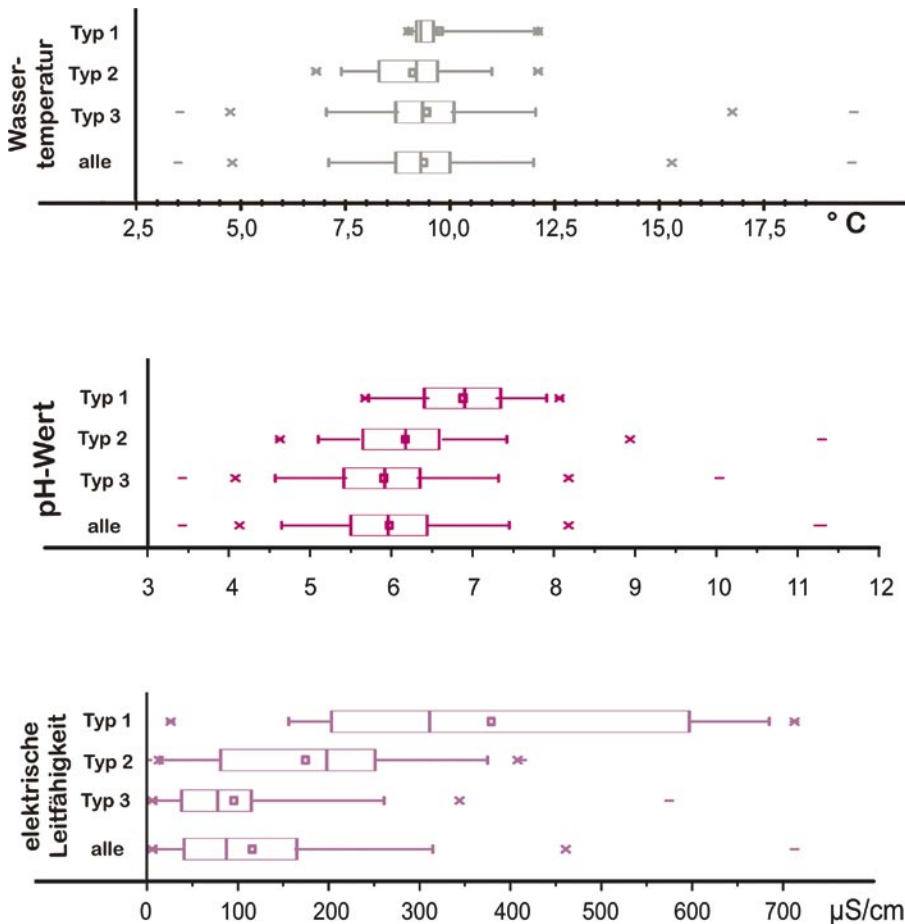


Abb. 4-30: Box-Plots der Geländeparameter der Grundwassertypen, sowohl differenziert als auch zusammengefasst.

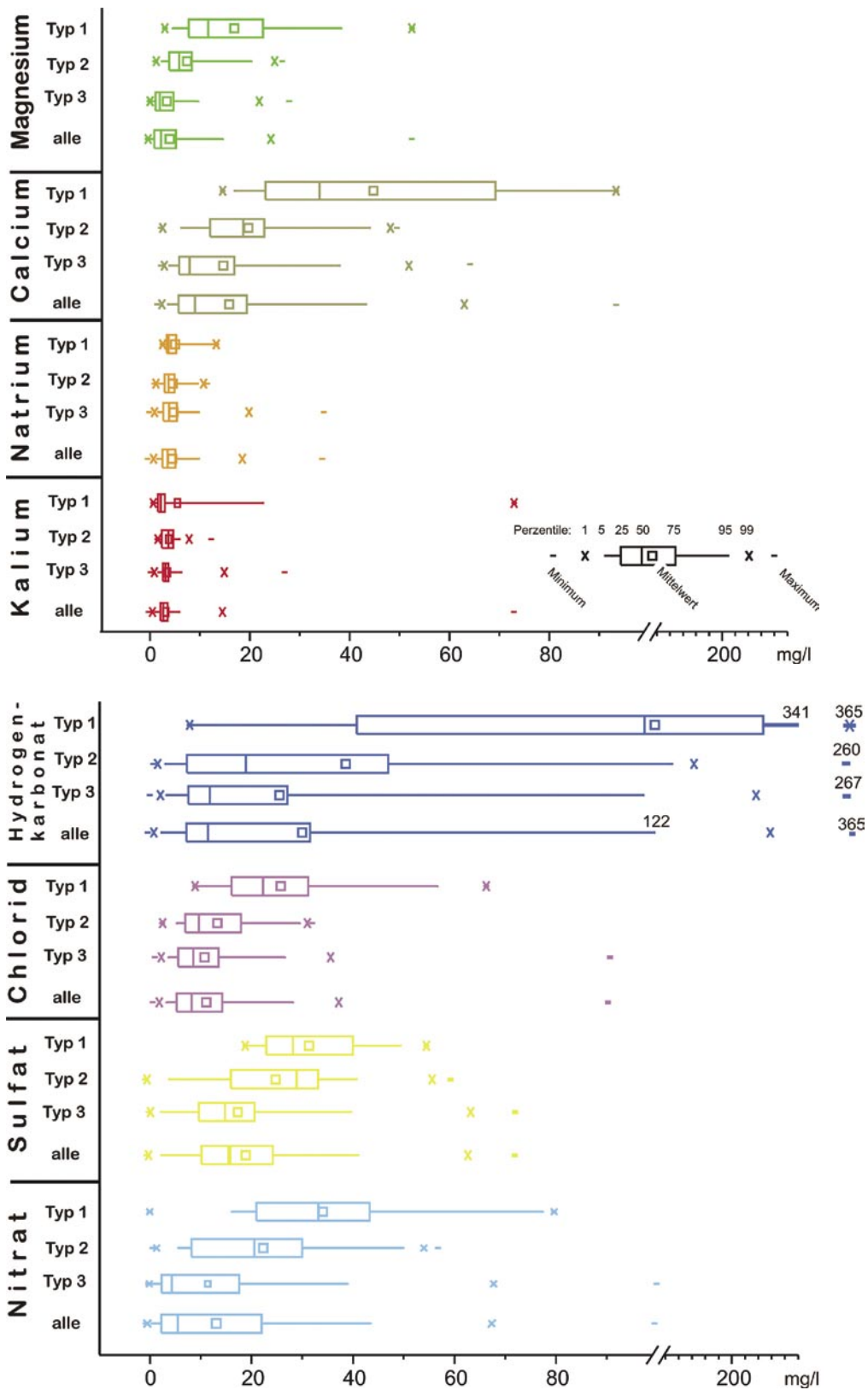


Abb. 4-31: Box-Plots der hydrochemischen Hauptinhaltsstoffe der Grundwassertypen, sowohl differenziert als auch zusammengefasst. Die oberen Extremwerte des Hydrogenkarbonates liegen außerhalb des Darstellungsmaßstabes und werden daher als Zahlen dargestellt.

Wahrscheinlichkeitsnetze

Die Häufigkeitsverteilungen der hydrochemischen Parameter werden im Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt, sowohl um die Abweichung der Populationen von der Normalverteilung als auch um die Extremwerte besser erkennen zu können. Neben der übersichtlichen Beschreibung des geogenen oder natürlichen Hintergrundes (Tab. 4-3) können im Wahrscheinlichkeitsnetz fremde Einflüsse abgegrenzt werden.

Anomale Werte, d. h. Überschüsse von Extremwerten in einer Stichprobe, werden im Wahrscheinlichkeitsnetz an Abweichungen von der Geraden – die Ordinate ist entsprechend des Gaus'schen Fehlerintegrals gestreckt – am unteren bzw. oberen Ende erkennbar. Bei hydrogeologischen Systemen relativ häufig sind Mischpopulationen, die an zwei relativ flachen Achsenabschnitten erkennbar sind, die durch einen steileren verbunden werden (DREHER 1993).

Die beiden flachen Achsenabschnitte stellen unabhängige Stichproben dar, deren Übergangsbereich umso steiler ist, je besser die beiden Systeme (hydraulisch) verbunden sind. Eine weitgehende Überlagerung von geogenem bzw. natürlichem Hintergrund und anthropogenen Zusatzeinträgen führt schließlich zum Entstehen nur noch eines steilen und eines flachen Achsenabschnittes, die die jeweilige Teilpopulation wiedergeben. Die Teilpopulationen können derart gegeneinander abgegrenzt werden, dass Schwellenwerte für die Zuordnung von Stichproben oder Einzelwerten in die jeweilige Population erfolgen können (WELLMER 1989). Mit Hilfe dieser Methode ist dann die Abgrenzung der geogenen, natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gegenüber anthropogenen Einflüssen möglich.

Beschreibung bedeutsamer Wasserinhaltsstoffe

Die nachfolgende Beschreibung der hydrochemischen Parameter stellt ausgewählte Ergebnisse der Auswertungen (siehe Abb. 4-30 bis 4-32 und Karte 13) zusammenfassend dar.

pH-Wert, Versauerungsindikatoren

Die pH-Werte liegen für 90% aller betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässer mit Werten von 4,7 bis 7,4 im sauren bis noch neutralen Bereich, wobei mit einem Medianwert von 6,0 die sauren Wässer überwiegen. Die pH-Werte der Wässer der Stauf- bis Rehberg-Schichten schwanken zwischen 4,6 und 7,3 (Medianwert: 5,9), während die Streuung der pH-Werte im Grundwasser aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten 5,1 bis 7,4 beträgt (Medianwert: 6,2). Höhere pH-Werte von 5,7 bis 7,9 (90% der Werte) weisen die Wässer der Oberen Felszone bis Voltziensandstein auf, bei denen auf Grund der Muschelkalkauflage z. T. höhere Pufferkapazitäten im Gestein vorliegen. Der Medianwert liegt hier bei 6,9.

Die pH-Werte scheinen annähernd normalverteilt, der Überschuss im zentralen Teil liegt im Wirkungsbereich des Karbonatpuffers.

Die Versauerung der Grundwässer durch luftbürtige, ubiquitäre Stoffeinträge kann zunächst am pH-Wert erkannt werden. Zusätzlich können die Anteile der Hauptinhaltsstoffe (VOIGT 1990) Hinweise auf eine Versauerungstendenz bieten. Als Folge der hohen Säureeinträge über die Atmosphäre auf basenarmen Sandsteinböden wird die Kapazität des Hydrogenkarbonatpuffers über-

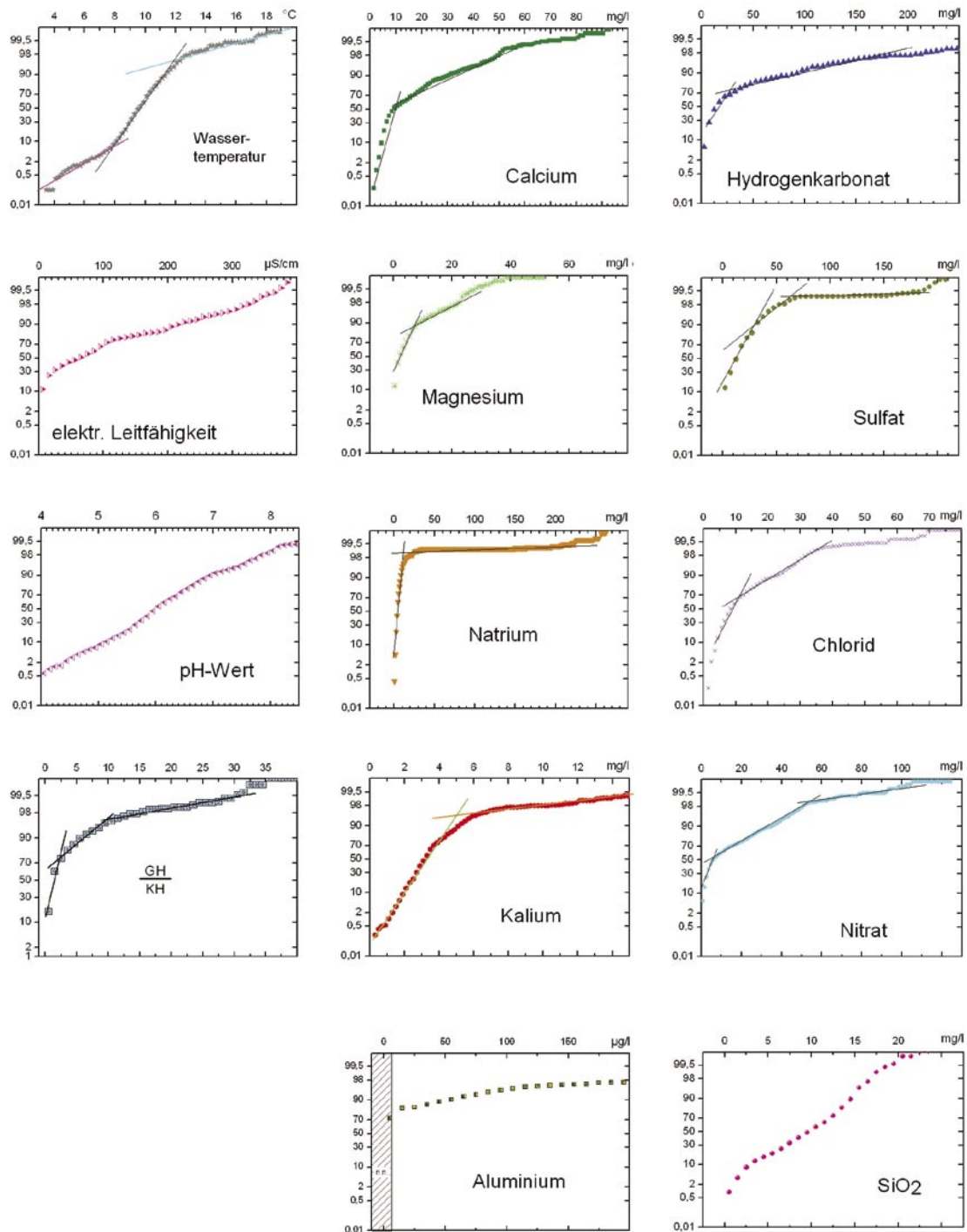


Abb. 4-32: Wahrscheinlichkeitsnetze (Ordinate in Prozent) der physikochemischen Parameter (links) und der wichtigsten Wasserinhaltsstoffe. Während der pH-Wert annähernd normalverteilt ist, sind die Abweichungen davon bei den übrigen Parametern deutlich erkennbar. Die Teilpopulationen können als geogener bzw. natürlicher Hintergrund sowie als ubiquitärer anthropogener Zusatzeintrag interpretiert werden.

schritten, der pH-Wert fällt deutlich und der Gehalt an Hydrogenkarbonat nimmt ab. Hierdurch kann es bei einem entsprechenden Angebot im Gestein zu einer Mobilisierung von Aluminium kommen (Kap. 4.9.2).

Abhängig vom pH-Wert und von verschiedenen Ionen-Verhältnissen kann das Grundwasser in Versauerungsklassen untergliedert werden (Tab. 4-5). Nicht einstuftbar sind Analysen mit anthropogenen Belastungen oder mit erkennbarem Ionenaustausch, so dass von den 428 möglichen nur 297 Analysen zugeordnet werden können. Während in der nicht eingestuften Gruppe die Chlorid- und Nitratkonzentrationen (Medianwert: 15,4 mg/l bzw. 30,2 mg/l) recht hoch sind, liegen bei den übrigen Gruppen die Medianwerte der Nitrat- und Chloridkonzentrationen zwischen 2,2 und 4,7 mg/l bzw. um 7,7 mg/l.

Tab. 4-5: Differenzierung der Grundwässer nach der Versauerungsintensität in Anlehnung an VOIGT (1990). Alle Ionen in mmol(eq)/l. Die nicht eindeutig zuordenbaren Einstufungen werden in Form von Übergängen ausgewiesen.

Einstufung	pH-Bereich	Ionenverhältnisse	Anzahl Werte	
nicht versauert	> 6	$\frac{[\text{Erdalkalien}] \times 2}{[\text{Hydrogenkarbonat}]}$	0	~
			3	
versauerungs- gefährdet	5 - 6	$\frac{[\text{Erdalkalien}] \times 2}{[\text{Sulfat}] \times 2 + [\text{Hydrogenkarbonat}]}$	252	
			6	
gering versauert	4 - 5	$\frac{[\text{Erdalkalien}] \times 2}{[\text{Sulfat}] \times 2}$	3	
			16	
versauert	< 4	$\frac{[\text{Erdalkalien}] \times 2 + [\text{H}^+] + [\text{Al}^{3+}]}{[\text{Sulfat}] \times 2}$	10	
Summe			297	

Als „nicht versauert“ bis versauerungsgefährdet können nur sehr wenige Proben gelten, die überwiegende Anzahl (82%) wird als „versauerungsgefährdet“ eingeordnet (Median des pH-Wertes: 6,0). Die übrigen Ergebnisse fallen in die versauerten Klassen (Median des pH-Wertes: 5,2).

Ein abnehmender Quotient von Karbonathärte zu Gesamthärte kann ebenfalls ein Indikator für eine fortschreitende Versauerung sein. Dieser Parameter ist in seiner zeitlichen Entwicklung aussagekräftig, die regionalen Unterschiede (Karte 13) sind jedoch zu groß, um versauerte oder versauerungsgefährdete Gebiete abgrenzen zu können.

Im Wahrscheinlichkeitsnetz ist ein geringer Anteil sehr niedriger Quotienten aus Gesamt- und Karbonathärte enthalten, der auf die fortschreitende Versauerung zurückgeführt werden kann.

Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit kann als summarischer Parameter für die Gesamtmineralisation des Grundwassers herangezogen werden. Sie liegt für 90 % aller betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässer zwischen 10 und 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und zeigt damit eine hohe Streuung des Lösungsinhaltes an. Der Medianwert beträgt 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Bei Zuordnung der Wässer zu den jeweiligen

hydrogeologischen Einheiten zeigt sich, dass die Wässer der Stauf- bis Rehberg-Schichten mit Werten von 10 bis 261 $\mu\text{S}/\text{cm}$ eine geringere Spannweite der elektrischen Leitfähigkeit aufweisen, dass diese bei den Wässern der Schlossberg- und Karlstal-Schichten mit Werten von 14 bis 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zunimmt und die größte Streuung bei den Wässern der Oberen Felszone bis Voltziensandstein mit Werten von 156 bis 685 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (jeweils 90 % der Werte) erreicht wird. Entsprechend nehmen die Medianwerte von 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ über 198 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf 311 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu.

Im Wahrscheinlichkeitsnetz ist die elektrische Leitfähigkeit mehrgipflig verteilt. Aus den Analysergebnissen ist eine Zuordnung der Teilpopulationen nicht möglich, zum Teil finden sich regionale Ursachen (siehe Karte 13): so sind im Verbreitungsgebiet der Oberen Felszone bis Voltziensandstein, im Südwesten des Projektgebietes, Reste der Muschelkalk-Überdeckung offenbar für höhere elektrische Leitfähigkeiten verantwortlich. Tendenziell höher wird der Lösungsinhalt auch bei längeren Aufenthaltszeiten.

Wassertemperatur

Die Wassertemperaturen aller gemessenen Zechstein- und Buntsandsteinwässer bewegen sich im Schwankungsbereich zwischen 3,5 und 19,6 °C, wobei 90 % aller Werte zwischen 7,1 und 12,0 °C mit einem Medianwert von 9,3 °C liegen. Betrachtet man nur die Wässer der Stauf- bis Rehberg-Schichten, so liegen auch hier die Temperaturen für 90 % der Wässer zwischen 7,0 und 12,1 °C, während 90 % der Wässer aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten eine Temperatur zwischen 7,4 und 11,0 °C aufweisen. Eine etwas geringere Temperaturspanne von 9,0 bis 12,1 °C haben die Wässer (90 % aller Werte) der Schichtenfolge Obere Felszone bis Voltziensandstein. Die Medianwerte liegen allgemein zwischen 9,2 und 9,3 °C.

Die Verteilung zeigt im Wahrscheinlichkeitsnetz zwei Knickpunkte und kann als Mischpopulation mit Übergangsbereich eingestuft werden. Der Schwankungsbereich der Temperatur von 7 bis 12 °C wird sowohl bei Quellen als auch bei Brunnen festgestellt: er entspricht der Streuung des langjährigen Mittels der Umgebungstemperatur, die sich mit der mittleren Temperatur des Untergrundes im oberflächennahen Bereich deckt (WAGNER et al. 2000).

Niedrigere Temperaturwerte sind dagegen fast ausschließlich bei Quellen zu beobachten, während nur wenige Brunnenwässer geringe Werte aufweisen. Die Beprobungen dieser Brunnen stammen aus der Zeit zwischen Dezember und Februar und die Messungen können auf Grund vorliegender Zeitreihen als Fehlmessungen in der winterlichen Jahreszeit betrachtet werden.

Temperaturwerte über 12 °C werden zum überwiegenden Teil bei Brunnen ermittelt, ohne dass eine Stockwerks- oder Tiefenzuordnung erkennbar ist. Die beiden hier mehrfach vertretenen Quellen (Ertlbrunnen und Otterspring) zeigen einen ausgeprägten Jahresgang bei der Wassertemperatur, demzufolge die Sommerproben erhöhte Werte aufweisen.

Erdalkalien

Die beiden hauptsächlich vorkommenden Erdalkalien sind Calcium und Magnesium, in Spuren werden Barium (0,07 bis 0,49 mg/l) und Strontium (0,039 bis 0,247 mg/l) nachgewiesen.

90 % der Calciumkonzentrationswerte aller betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässer liegen zwischen 4,1 und 43,8 mg/l, deren Medianwert bei 9,5 mg/l. Die Magnesiumgehalte sind mit

Konzentrationen von 0,5 bis 15,2 mg/l (90% der Werte) und einem Medianwert von 2,7 mg/l insgesamt geringer. Betrachtet man die Wässer nach ihrer hydrogeologischen Zuordnung, so zeigt sich, dass die Spannweite der Calciumkonzentrationen der Wässer aus den Stauf- bis Rehberg-Schichten und die der Wässer aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten relativ geringe Unterschiede aufweisen. So betragen die Calciumkonzentrationen bei 90% aller Wässer aus den Stauf- bis Rehbergschichten 4,0 bis 38,11 mg/l, bei den Wässern aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten 6,0 bis 43,8 mg/l. Die Magnesiumgehalte liegen zwischen 0,5 und 9,9 mg/l bzw. 2,1 und 20,1 mg/l. Die entsprechenden Medianwerte sind bei den Wässern aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten gegenüber den Wässern aus den Stauf- bis Rehbergschichten etwas höher (Calcium: 18,4 mg/l (sS–sK) bzw. 8,1 mg/l (zSt–sR), Magnesium: 5,6 mg/l (sS–sK) bzw. 2,1 mg/l (zSt–sR)). Die Calcium- und Magnesiumgehalte der Wässer aus den hangend folgenden Einheiten (sOF–soV) variieren in einem relativ breiten Bereich von 17,4 bis 93,4 mg/l bzw. 5,1 bis 38,9 mg/l (90% aller Wässer). Die Medianwerte sind mit 34,4 mg/l bzw. 12,1 mg/l im Vergleich zu den anderen Grundwassertypen höher.

Im Wahrscheinlichkeitsnetz stellen die beide Erdalkalien gemischte Stichproben dar. Die Knickpunkte können als Obergrenze der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit im Zechstein und Buntsandstein eingeschätzt werden. Diese liegen beim Calcium bei etwa 11 mg/l, beim Magnesium bei ca. 8 mg/l.

Die in den betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässern festgestellten höheren Konzentrationen finden sich zum einen in Einzugsgebieten mit Muschelkalk, wie dies im Bereich der Schichtenfolge Obere Felszone bis Voltziensandstein häufig gegeben ist, zum anderen auch in Gebieten mit Lößüberdeckung sowie in Arealen, die überwiegend landwirtschaftlich genutzt werden.

Alkalien

Für die Gesamtheit aller betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässer lässt sich eine relativ geringe Streuung der Kalium- und Natriumkonzentrationen feststellen. 90% der Werte liegen zwischen 1,6 und 6,4 mg/l bzw. 1,9 und 10,3 mg/l (Medianwert: 3,2 mg/l bzw. 4 mg/l). Entsprechend gering ist auch die Spannbreite der Alkalikonzentrationen in den Wässern der Stauf- bis Rehberg-Schichten. 90% der Kaliumwerte liegen zwischen 1,8 und 6,4 mg/l (Medianwert: 3,2 mg/l), die Natriumwerte reichen von 1,8 bis 10,3 mg/l (Medianwert: 4,0). Ähnliche Gehalte (Kalium: 1,5 bis 5,7 mg/l, Median: 3,4 mg/l; Natrium: 2,1 bis 9,9 mg/l, Median: 4,0 mg/l) weisen auch die Wässer aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten auf. Die Grundwässer aus den Einheiten im Hangenden zeigen mit Werten von 1,5 bis 23,1 mg/l (90% aller Werte) eine etwas größere Streuung der Kaliumgehalte. 50% der Werte liegen allerdings in einem Konzentrationsbereich von 2 bis 3,4 mg/l, so dass der Medianwert von 2,6 mg/l relativ gering ist. Die Natriumkonzentrationen dieser Wässer bewegen sich zwischen 3,0 und 13,6 mg/l (Medianwert: 4,2).

Die Mischpopulationen der beiden Alkalien können bei 5 mg/l getrennt werden, die damit die Obergrenze der natürlichen Gehalte entsprechen dürften. Die höheren Konzentrationen kommen offenbar bevorzugt in den Gebieten vor, in denen landwirtschaftliche Flächen dominieren, wie z. B. im Gebiet der Oberen Felszone bis Voltziensandstein im Südwesten des Untersuchungsgebietes. In Arealen mit ganz überwiegender Waldnutzung sind die niedrigen Gehalte flächenhaft verbreitet.

Hydrogenkarbonat

Hydrogenkarbonat stellt das dominierende natürliche Anion dar (Abb. 4-29), das bei einem Medianwert von 12,2 mg/l Werte bis zu 365 mg/l erreichen kann; 90 % aller Werte liegen allerdings zwischen 3,1 und 122 mg/l. Betrachtet man die Hydrogenkarbonatkonzentrationen nach ihrer hydrogeologischen Zuordnung, so ergeben sich für 90 % der Wässer aus den Stauf- bis Rehberg-Schichten Gehalte zwischen 3,7 und 97,6 mg/l (Medianwert: 12,3 mg/l). Für die Grundwässer der Schlossberg- und Karlstal-Schichten betragen die Konzentrationen 3,0 bis 154,8 mg/l (90 % der Werte). Der Medianwert liegt bei 18,9 mg/l. Die Hydrogenkarbonatgehalte der Wässer aus der Schichtenfolge Obere Felszone bis Voltziensandstein streuen für 90 % der Messwerte in einem relativ breiten Bereich von 9,2 mg/l bis 341 mg/l mit einem Medianwert von 98,1 mg/l.

Die Häufigkeitsverteilung von Hydrogenkarbonat scheint im mittleren bis hohen Konzentrationsbereich annähernd normalverteilt. Geringe Gehalte unter ca. 30 mg/l liegen häufig vor und scheinen mit einem Verbrauch des Karbonatpuffers zusammenzuhängen, wie die hohe Korrelation mit niedrigen pH-Werten zeigt. Dies kann auf eine beginnende bis fortgeschrittene Versauerung hinweisen.

Die sehr große Streuung der Hydrogenkarbonatkonzentrationen bei den Wässern der Schichtenfolge Obere Felszone bis Voltziensandstein wird durch die wechselnden Anteile karbonathaltiger Sedimente, insbesondere des Muschelkalk, im Einzugsgebiet hervorgerufen, die infolge der Karbonatlösung zu insgesamt höheren Stoffgehalten führen.

Sulfat

Die Sulfatkonzentrationen variieren für 90 % aller betrachteten Zechstein- und Buntsandsteinwässer zwischen 3,0 und 41,8 mg/l, der Medianwert beträgt 16,4 mg/l. Differenziert nach ihrer hydrogeologischen Zuordnung ergeben sich für 90 % der Wässer aus den Stauf- bis Rehberg-Schichten Sulfatkonzentrationen zwischen 2,5 und 40 mg/l, für 90 % der Wässer aus den Schlossberg- und Karlstal-Schichten Gehalte zwischen 4,9 und 41,6 mg/l (90 % aller Wässer). Die Medianwerte liegen bei 15,2 bzw. 30,0 mg/l. In den Wässern der hangend folgenden Einheiten variieren 90 % der Werte zwischen 19,1 und 49,2 mg/l (Medianwert: 28,0 mg/l).

Die Herkunft des Sulfats ist vielfältig. Bis etwa 3,5 mg/l Sulfat scheinen in Wässern des Zechstein und Buntsandstein geogen bedingt zu sein. Zusätzliche Quellen können sowohl ubiquitäre Einträge über die Luft und den Niederschlag bis etwa 35 mg/l sowie oberhalb davon Düngeeinträge aus der Landwirtschaft darstellen.

Analog der Vorgehensweise bei Nitrat machen bei Schwefelverbindungen knapp 30 % die Nass- und 70 % die Trockendeposition aus (GAUGER et al. 2000).

In den Jahren 2000 bis 2002 wurden an der Messstation Deuselbach (UBA 2004) über den Niederschlag im Mittel 3,6 kg/(ha x a) Schwefel deponiert. Gemeinsam mit den Ablagerungen aus der trockenen Luft verursachen diese Einträge eine Grundlast im Grundwasser. Unter der oben getroffenen Annahme liegt die Gesamtdeposition für Schwefel bei 12 kg/(ha x a).

Phosphat

Die Phosphatgehalte der untersuchten Grundwässer sind im Allgemeinen sehr gering. Von den vorliegenden 379 Werten zeigen 64 % nicht nachweisbare Gehalte. Das Maximum der Phosphatkonzentrationen liegt bei 2,2 mg/l, wobei das Phosphat größtenteils aus der Landwirtschaft eingetragen wird.

Chlorid

90 % der Chloridgehalte der Zechstein- und Buntsandsteinwässer liegen zwischen 4,0 und 29,9 mg/l mit einem Medianwert von 9,1 mg/l. Differenziert nach den hydrogeologischen Einheiten weisen 90 % der Wässer aus den Stauf- bis Rehberg-Schichten Konzentrationen von 4,0 bis 27,0 mg/l (Medianwert: 8,9), Wässer der Schlossberg- und Karlstal-Schichten Konzentrationen von 5,3 bis 29,5 mg/l (Medianwert: 9,6) auf. Die Gehalte der Wässer aus der Schichtenfolge Obere Felszone bis Voltziensandstein zeigen eine im Vergleich zu den anderen Grundwassertypen relativ breite Spanne von 10,2 bis 57,4 mg/l (90 % aller Werte). Der Medianwert liegt bei 23 mg/l.

Fast 95 % der ubiquitären nassen Depositionen von Chlorid sind meeresbürtig. Diese Chloriddepositionen können als Säurebildner wegen des im Vergleich zu Stickstoff und Schwefel geringen Anteils insgesamt jedoch vernachlässigt werden (GAUGER et al. 2000). Chlorid im Grundwasser stammt daher ganz überwiegend aus anthropogenen Stoffeinträgen, da Aufstiege mineralreicher Tiefengrundwässer im Projektgebiet nicht zu erwarten und die Gehalte im Gestein äußerst gering sind. Zwei anthropogene Quellen können unterschieden werden: Chlorid stammt ganz überwiegend aus Mineraldüngern (z. B. Kalium- und Natriumchlorid) und untergeordnet aus Streusalz.

Nitrat

Die Nitratkonzentrationen liegen bei 90 % der Zechstein- und Buntsandsteinwässer zwischen 0,9 und 44,3 mg/l mit einem Medianwert von 6,3 mg/l. Differenziert nach den Grundwassertypen ergibt sich für 90 % der Wässer der Stauf- bis Rehberg-Schichten ein Schwankungsbereich von 0,8 bis 39,4 mg/l (Medianwert: 4,7 mg/l), für die Wässer der Schlossberg- und Karlstal-Schichten eine Streuung von 5,6 bis 50 mg/l (Medianwert: 20,6 mg/l). Die Nitratkonzentrationen der Grundwässer aus den hangend folgenden Einheiten variieren zwischen 16,9 und 78,2 mg/l (90 % aller Werte) mit einem Medianwert von 33,8 mg/l.

Der Wasserinhaltsstoff Nitrat stammt entweder aus ubiquitären Einträgen über die Luft und den Niederschlag oder von Düngereinträgen aus der Landwirtschaft.

Die trockenen Depositionen aus der Luft können nur durch aufwändige Modellrechnungen ermittelt werden. Hier wird die summarische Aufteilung verwendet, dass die Gesamtdeposition der Stickstoffverbindungen jeweils etwa 50 % nass bzw. trocken beträgt (GAUGER et al. 2000). Dies ermöglicht hinreichend genaue Aussagen, da die Nassdepositionen recht gut bekannt sind.

An der Messstation Deuselbach des Umweltbundesamtes (UBA 2004) wurden in den Jahren 2000 bis 2002 über den Niederschlag im Mittel 6,6 kg/(ha × a) Stickstoff deponiert. Gemeinsam mit den Ablagerungen aus der trockenen Luft verursachen diese Einträge eine Grundlast im Grundwasser. Unter der oben getroffenen Annahme liegt die Gesamtdeposition für Stickstoff bei 13,5 kg/(ha × a).

Die ubiquitären Nitrat(hintergrund)einträge liegen damit in den Einzugsgebieten der Quellen zwischen knapp 25 und 30 mg/l. Diese gelangen jedoch nur in Größenordnungen von deutlich unter 10 mg/l in das Grundwasser (Tab. 4-3), da durch die Vegetation und das Bodenleben Stickstoff verbraucht werden. Dieser natürliche Stickstoffeintrag entspricht im Wahrscheinlichkeitsnetz dem ersten Achsenabschnitt. Hier sind auch Analysenergebnisse enthalten, die durch Denitrifikation im reduzierenden Milieu sekundär niedrige Nitratkonzentrationen aufweisen. Der zweite Achsenabschnitt kennzeichnet anthropogen beeinflusstes Grundwasser, so dass Nitratkonzentrationen oberhalb von ca. 7 mg/l von Düngereinträgen der Landwirtschaft abgeleitet werden können.

Bei Betrachtung der regionalen Verteilung der Nitratwerte (Karte 13) zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen Landnutzung und dem Nitratgehalt. So sind in Arealen mit ausgedehnten Ackerflächen häufig erhöhte Nitratkonzentrationen festzustellen, während in Waldgebieten nur geringe Nitratgehalte auftreten. Auch die reduzierenden Verhältnisse im Torf können zu niedrigen Nitratkonzentrationen in den oberflächennahen Grundwässern der Mooregebiete führen.

Altersdatierung mittels Isotopen und FCKW

Im Oktober 1994 wurden 46 Grundwasserproben durch die Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben der Staatlichen geologischen Dienste auf die schweren Isotope des Kohlenstoffes (^{14}C) und des Wasserstoffes (^3H , Tritium) untersucht.

Aus der Zusammenschau der Tritium- und ^{14}C -Konzentrationen können die Anhaltspunkte für das hydraulische System bestätigt werden (Abb. 4-33). Von der Mischverfilterung in einem Trinkwasserbrunnen abgesehen, durch die älteres Grundwasser scheinbar tritiumhaltig ist, kommt Tritium nur im oberflächennahen Grundwasser vor. Höhere Grundwasseralter mit deutlichen Tritiumgehalten in Quellwässern (Quellen Erlenmühle, Geiselberg und Schopp) bestätigen ein Zweikomponenten-Mischsystem: aus den kleinen oberirdischen Einzugsgebieten stammt das junge, tritiumführende Grundwasser, das durch den hydraulischen Anschluss der Quellen an das tiefere, großräumig zusammenhängende Grundwasserstockwerk mit älterem Grundwasser vermischt wird. Berechnet man über die Kohlenstoff-14-Gehalte die Mischungsverhältnisse aus alter und junger Komponente, so besteht das austretende Mischwasser zu 15 bis 25% aus altem Grundwasser, ausgehend vom ältesten gemessenen Modellalter im TB Weiher Eck (34,4 pmc entspr. 8.555 Modelljahre). Die Verifikation über Tritium fällt wegen dessen deutlich gesunkenem atmosphärischem Eintrag nur ungenau aus, bestätigt bei einem angenommenen Tritiumgehalt der jungen Wasserkomponente von 12 bis 18 T.U. jedoch die vorgenannten Mischungsverhältnisse.

Tritiumfreies Grundwasser kommt im Bereich des Moosalbtales bereits in vergleichsweise geringer Teufe von 40 bis 50 m unter Gelände vor und weist ein Kohlenstoff-14-Modellalter von 350 bis über 8550 Modelljahre auf. Die Altersunterschiede sind vermutlich durch das beschriebene Zweikomponenten-Mischsystem bedingt (OSTER 1994). Da die junge Komponente der älteren hierbei großflächig zugemischt wird, entsprechen die hydrogeologischen Verhältnisse einem Exponentialmodell.

Zwei Grundwasseraufschlüsse südlich von Rodenbach erfassen Grundwasser aus den Stauffschichten. Die hohen Modellalter (1090 bzw. 2675 Modelljahre) bei gleichzeitigem Auftreten von Tritium sprechen für eine rasche vertikale Verfrachtung junger, oberflächennaher Grundwässer entlang tieferreichender Störungen, die zu einer Vermischung mit alten Wässern führen.

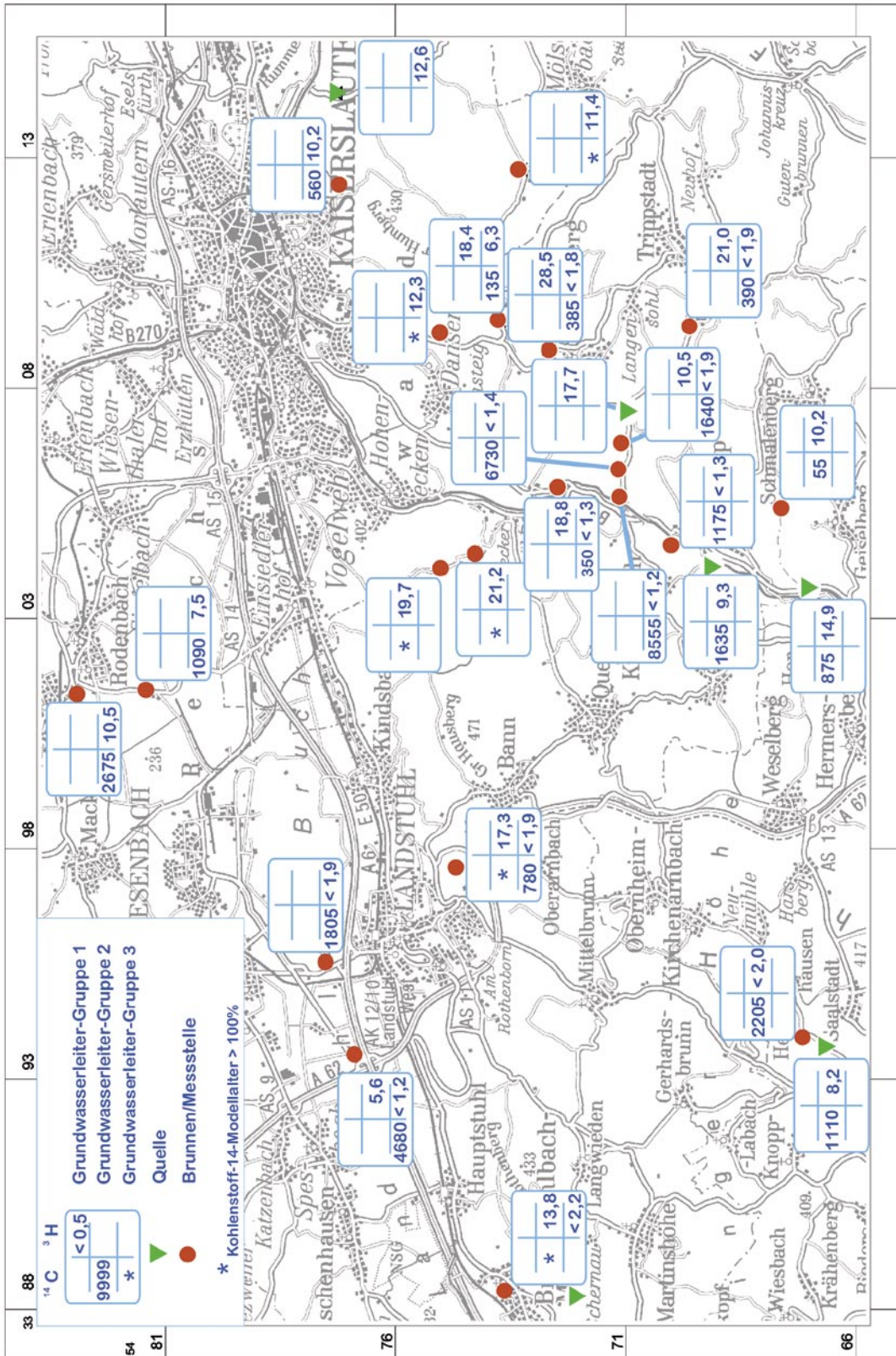


Abb. 4-33: Regionale Verteilung der Kohlenstoff-14-Modellalter und der Tritiumkonzentrationen (Angabe in T.U.).

Im September 2003 fand eine Beprobung von neun Grundwasseraufschlüssen der GWLG 2 und GWLG 3 auf FCKW (fluorierte Chlorkohlenwasserstoffe) statt, die ebenfalls für Altersdatierungen im Grundwasser geeignet sind (OSTER 1994). Aus drei Grundwasseraufschlüssen mit Kohlenstoff-14-Datierungen ergeben sich im Vergleich mit den FCKW-Gehalten größenordnungsmäßig ähnliche Grundwasseralter, es besteht aber noch weiterer Untersuchungsbedarf. In der GWLG 2, die im Bereich des Moosalbtales das oberflächennahe Grundwasservorkommen bildet, konnten nach dem Exponentialmodell Grundwasseralter zwischen 13 und 19 Jahren ermittelt werden, für das tiefere Grundwasser (GWLG 3) liegen die Ergebnisse zwischen 37 und über 500 Jahren, wobei letzteres die methodische Obergrenze darstellt.

Schriften

AG Boden (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl. (Nachdr.), 392 S., 33 Abb., 91 Tab., (BGR & Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland) Hannover.

Arbeitskreis für Bodensystematik der DBG (Hrsg.) (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. – Mitt. deutsch. bodenkundl. Ges., **86**, 180 S., Oldenburg.

Bayer. Manuskriptkarte (Anfang 20. Jh.) 1: 25.000: Blatt 6612 Trippstadt (Geologische Landesuntersuchung Bayern) München. – [unveröff.].

BECK, D. (1984): Lithologische und hydrogeologische Untersuchungen im Buntsandsteingebiet südlich Kaiserslautern. Diplomarbeit Univ. Karlsruhe, 522 S., 127 Abb., 30 Tab., 9 Ktn., Karlsruhe. – [unveröff.].

DECKER, G. (2000): Geologische Kartierung der Umgebung von Obernheim-Kirchenarnbach (Rheinland-Pfalz). Diplomkartierung Univ. Karlsruhe, 92 S., 66 Abb., 10 Tab., 3 Anl., Karlsruhe. – [unveröff.].

DEMUTH, N. & MEUSER, A. & MENZEL, L. (2001): Die Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers für die Berechnung der Verdunstung in Rheinland-Pfalz. Schriftwechsel zwischen Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz und Institut für Klimafolgenforschung Potsdam, 2 S. – [unveröff.].

DITTRICH, D. (1996): Unterer Buntsandstein und die Randfazies des Zechsteins in der nördlichen Pfälzer Mulde (Exkursionen C1 am 11. und C2 am 12. April 1996). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F., **78**, S. 71–94, 4 Abb., 2 Tab., Stuttgart.

– (in Vorb.): Tektonik. – In: ROHN, J. & CLAUSS, R. & DITTRICH, D.: Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1: 25.000, Blatt 6613 Elmstein. Erl., (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) Mainz.

DREHER, T. (1993): Die chemische Beschaffenheit der tieferen Grundwasservorkommen im nördlichen Oberrheingraben. Diss. Univ. Karlsruhe, 138 S., 59 Abb., 14 Tab., 1 Anhang, Karlsruhe.

DSK (Deutsche Stratigraphische Kommission) (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland (STD 2002), Beiheft, 16 S., (GeoForschungsZentrum) Potsdam.

DVWK (1990): Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten. – DVWK-Schriften, **89**, 216 S., 81 Abb., 14 Tab., (P. Parey) Hamburg, Berlin.

DWD (1996–2003): Methode REGNIE – Regionalisierung räumlicher Niederschlagsverteilungen, http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/regnie_methode.htm.

EDER, W. (1979): Quantifizierung von bodenkundlichen Standortsfaktoren als Grundlage für eine leistungsbezogene Standortkartierung insbesondere auf Buntsandsteinstandorten der Pfalz. Diss. Univ. Göttingen, 274 S., zahlr. Abb. und Tab., Göttingen. – [unveröff.].

EHRBRECHT, F. (1998): Geologische Kartierung südlich Landstuhl (Pfälzer Wald). Diplomkartierung Univ. Karlsruhe, 51 S., 34 Abb., 8 Tab., 4 Anl., Karlsruhe. – [unveröff.].

FRIED, G. (1987): Zusammensetzung, Eigenschaften, Gliederung und Benennung der periglazialen Deckschichten. Auszug aus dem Bericht des Arbeitskreises für Bodensystematik der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft über die Ergebnisse der Arbeitssitzung am 23. bis 25. März 1987, 4 S., 1 Abb., (Bayerisches Geologisches Landesamt) München. – [unveröff.].

GAUGER, T. & ANSHELM, F. & KÖBLE, R. (2000): Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme. 136 S. UBA-FB 297 85 079, Stuttgart.

GLA (Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz) (1994): Konzeptbodenkarte 1 : 50.000 des Raumes Kaiserslautern. Bearbeiter: STEINRÜCKEN, U. & RÜTER, Z., (Manuskript), Mainz. – [unveröff.].

HEITELE, H. (1993): Das Buntsandsteinprofil bei Landstuhl und seine Gliederung in Grundwasserstockwerke. – Mainzer geowiss. Mitt., **22**, S. 39–56, 2 Abb., Mainz.

KILLE, K (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. deutsch. geol. Ges., SH Hydrogeologie, S. 89–95, 6 Abb., Hannover.

LIESCH, T. (2000): Geologische Kartierung der Umgebung von Hermersberg (Rheinland-Pfalz) mit besonderer Betrachtung der Röhrenbildungen und röhrenförmigen Höhlen. Diplomarbeit Univ. Karlsruhe, 36 S., 15 Abb., 4 Tab., 3 Ktn., Karlsruhe. – [unveröff.].

LENDVACZKY, TH. (2003): Geologische Kartierung bei Gerhardsbrunn/Rheinland-Pfalz (NW-Quadrant der TK 25 Blatt 6611 Hermersberg). Diplomkartierung Univ. Bonn, 60 S., 29 Abb., 9 Tab., 4 Anl., Bonn. – [unveröff.].

LfW (Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz) (Hrsg.) (1989): Grundwasserbeschaffenheit – Grundwasserlandschaften, Grundmeßnetz. 91 S., 1 Kt., Mainz.

– (Hrsg.) (2000): Digitales Gewässerkundliches Flächenverzeichnis, Version 8.026, Arbeitsgrundlage, Mainz. – [unveröff.].

– (Hrsg.) (2001): Grundwasserbericht 2000. 123 S., Mainz.

– (Hrsg.) (2002): Materialien zur Regionalisierung des mittleren Niedrigwasserabflusses in Rheinland-Pfalz, Mainz. – [unveröff.].

LGB (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) (Hrsg.) (in Vorb.): Geologie von Rheinland-Pfalz. (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung) Stuttgart.

LOGAN, J. (1964): Estimating transmissibility from routine production tests of water wells. – Ground Water, **2**, 1, S. 35–37, 2 Tab., Columbus, Ohio.

LORENZ, V. & HANEKE J. (1981): Zur Geologie des Donnersberges. – In: Gemeinde Dannenfels (Hrsg.): Dannenfels – Chronik eines Dorfes. S. 136–155, 5 Abb., 1 geol. Kt., Dannenfels.

LOTHHAMMER, H. (1985): Böden. – In: KONRAD, H. J.: Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1 : 25.000, Blatt 6512 Kaiserslautern, Erl., S. 29–47, 1 Tab., (Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz) Mainz.

- (1996): Die Böden des mesozoischen Schichtstufenlandes der Rheinpfalz. – Mainzer geowiss. Mitt., **25**, S. 183–204, 1 Abb., Mainz.
- (2003): Böden. – In: ROHN, J. & KASSEBEER, W.: Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25.000, Blatt 6712 Merzalben, Erl., S. 71–80, (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) Mainz.
- MATTHESS, G. (1990): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2: Die Beschaffenheit des Grundwassers. 139 Abb., 116 Tab., (Gebr. Bornträger) Berlin, Stuttgart.
- MATTHESS, G. & THEWS, J.-D. (1963): Der Abflusszuwachs als Hilfsmittel bei der Beurteilung der Wassererschließungsmöglichkeiten. – Notizbl. hess. Landesamt Bodenforschung, **91**, S. 231–236, Wiesbaden.
- MENZEL, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. – Züricher geograph. Schriften, **67**, 128 S., 60 Fig., 24 Tab., Zürich.
- Ministerium für Umwelt und Forsten (Hsrg.) (2002): Wasserversorgungsplan, Teilgebiet 5. 86 S., 15 Abb., 6 Tab., 5 Ktn., 8 Anl., Mainz.
- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflüsse (TWL). – Wasserwirtschaft, Sonderheft, **41**, S. 12–14, Stuttgart.
- (1958): Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem Au-Linien-Verfahren. 44 S., 20 Abb., 15 Tab., (Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen) Düsseldorf.
- OSTER, H. (1994): Bericht zu den FCKW-Analysen im Raum Trippstadt/Kaiserslautern. Schr. des Institutes für Umweltphysik der Universität Heidelberg v. 14. 11. 1994, 5 S., Heidelberg.
- PEMÖLLER, A. (1969): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 160 Landau i. d. Pfalz. Geograph. Landesaufnahme 1:200.000. Naturräumliche Gliederung Deutschlands. 47 S., 1 Kte., Bundesforschungsanstalt Landeskd. u. Raumordnung, Bad Godesberg.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes, **194**, S. 93, (DWD-Selbstverlag) Offenbach.
- Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EU-WRRL). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 327 vom 22. 12. 2000, S.1, Brüssel.
- SCHAUER, M. (2001): Geologische Kartierung der Umgebung von Hermersberg/Rheinland-Pfalz. Diplomkartierung Univ. Karlsruhe, 46 S., 26 Abb., 3 Tab., 2 Ktn., Karlsruhe. – [unveröff.].
- SCHIFFEL, J. (1988): Ermittlung ingenieurgeologischer Parameter im Buntsandstein beim Bau des Hörnchenbergtunnels südlich Landstuhl. Diplomarbeit Univ. Mainz, 106 S., 36 Abb., 18 Tab., 18 Anl., Mainz. – [unveröff.].

SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. – Zürcher Geographische Schriften, **69**, S. 161, Zürich.

SPUHLER, L. (1957): Einführung in die Geologie der Pfalz. – Veröff. pfälz. Ges. Förd. Wiss., **34**, 432 S., 67 Abb., 4 Ktn., Stuttgart.

StBA (Statistisches Bundesamt) (1997): Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland (CD-ROM), Wiesbaden.

STÖHR, W. TH. (1966): Übersichtskarte der Bodentypen-Gesellschaften von Rheinland-Pfalz, 1: 250.000, (Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz) Mainz.

– mit Beiträgen von HAUN, D. & RUPPRECHT, A. (1969/70): Bodenübersichtskarte der Pfalz, Text für Vorl. Nr. 58. – In: ALTER, W.: Pfalzatlas, Textband, 15. Heft, S. 553–588, 2 Abb., 35 Tab., 36 Prof., Karte 1: 300.000 = Vorl. Nr. 58 (W. TH. STÖHR), (Eigenverlag Pfälz. Ges. Förd. Wiss.) Speyer.

STUMM, W. & MORGAN, J. (1996): Aquatic chemistry : chemical equilibria and rates in natural waters. 3. ed. 1022 S., (Wiley) New York.

UBA (2004): Daten aus dem Messnetz 2000 bis 2003. Umweltbundesamt Fachgebiet II 6.6, Langen.

VOIGT, H.-W. (1990): Hydrogeochemie. 310 S., 107 Abb., 115 Tab., (Springer) Berlin.

WAGNER, B. & TÖPFNER, C. & LISCHIED, G. & SCHOLZ, M. & KLINGER, R. & KLAAS, P. (2003): Hydrogeochemische Hintergrundwerte der Grundwässer Bayerns. – GLA Fachberichte, **21**, 250 S., 107 Abb., 15 Tab., München.

WALLESCH, W. (1964): Erläuterungsbericht zur Standortkartierung im Landstuhler Bruch des staatlichen Forstamtes Landstuhl-Nord (Teilkartierung). 190 S., 20 Abb., 19 Tab., Arch. Forstamt Kaiserslautern-West, Kaiserslautern. – [unveröff.].

WELLMER, F.-W. (1989): Rechnen für Lagerstättenkundler und Rohstoffwirtschaftler Teil 2: Lagerstättenstatistik, Explorationsstatistik einschließlich geostatistischer Methoden. – CTH, **26**, 462 S., 103 Abb., 11 Tab., (Pilger) Claustal-Zellerfeld.

WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde. 320 S., 185 Abb., (Springer) Berlin.

– (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. – In: GRAHMANN: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. Forsch. dtsh. Landeskunde, **104**, S. 47–54, 2 Abb., Remagen.