

Hausarbeit

Grundwasserneubildung und Grundwassernutzungsprobleme in Baden-Württemberg

im Hauptseminar

Angewandte Fragen zur Physischen Geographie

unter Leitung von
Prof. Dr. E. Bibus

Inhalt

1 Einleitung.....2

2 Hydrologische Grundlagen.....2

2.1 Begriffsdefinition „Grundwasserneubildung“ 2

2.2 Quantitative Parameter der Grundwasserneubildung 4

2.2.1 Abfluss..... 4

2.2.2 Meteorologische Faktoren 4

2.2.3 Boden 5

2.3 Qualitative Parameter der Grundwasserneubildung 6

3 Regionale Differenzierung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg 7

3.1 Klimatische Verhältnisse in Baden-Württemberg..... 7

3.2 Grundwasserlandschaften Baden-Württembergs 8

3.2.1 Oberrheingraben..... 8

3.2.2 Schwarzwald und Odenwald..... 10

3.2.3 Südwestdeutsches Schichtstufenland 11

3.2.3.1 Die Gäulandschaften des Muschelkalks 11

3.2.3.2 Keuper-Bergland 12

3.2.3.3 Albvorland..... 13

3.2.3.4 Schwäbische Alb 14

3.2.4 Alpenvorland..... 15

3.3 Zusammenfassung 17

4 Grundwassernutzung und Grundwassernutzungsprobleme in Baden-Württemberg ... 17

4.1 Regionale Disparitäten in Förderung und Nutzung des Grundwassers 18

4.2 Grundwasserqualität und Grundwassergefährdungspotenziale 19

4.2.1 Nitrat..... 20

4.2.2 Pflanzenbehandlungsmittel..... 21

4.2.3 Gesteinsabbau und Baggerseen..... 22

4.2.4 Grundwasserversauerung 23

4.2.5 Weitere Grundwassergefährdungspotenziale 24

5 Zusammenfassung.....25

6 Bibliographie26

7 Anhang28

1 Einleitung

Das Grundwasser ist auf unserem Planeten die wichtigste Ressource für die Trinkwassergewinnung. Im Gegensatz zu anderen Bodenschätzen ist das Grundwasser eine sich ständig erneuernde Ressource. Ziel dieser Arbeit ist es, für den Raum Baden-Württemberg das Regenerationspotenzial der Ressource Grundwasser zu beschreiben, räumliche Disparitäten der Grundwasserneubildung und der Grundwassernutzung aufzuzeigen und die aus der Nutzung entstehenden Problemen zu verdeutlichen.

Im ersten Teil soll eine generelle Definition des Begriffs „Grundwasserneubildung“ erfolgen und die Parameter der Quantität und der Qualität der Grundwasserneubildung beschrieben werden. Zu einer nachhaltigen Nutzung der Ressource Grundwasser ist es unabdingbar, dass nicht mehr Wasser verwendet wird, als neu gebildet werden kann – deswegen sind Kenntnisse über das Grundwasserneubildungspotenzial eines Raumes notwendig. Um ein differenziertes Bild dieses Potenzials in Baden-Württemberg zu bekommen, werden im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit die Charakteristika der Grundwasserlandschaften beschrieben und erläutert. Auf die aus der Grundwassernutzung, sowie den anthropogenen Einflüssen im Regenerationsraum der Ressource Grundwasser erwachsenden Problemfelder soll im dritten Teil dieser Arbeit näher eingegangen werden.

2 Hydrologische Grundlagen

2.1 Begriffsdefinition „Grundwasserneubildung“

Grundwasserneubildung wird laut DIN 4049-3 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1996) als Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser definiert. Die Grundwasserneubildung erfolgt überwiegend aus Niederschlägen – demnach lässt sie sich anhand der umgeformten Wasserhaushaltsgleichung nach MATTHES & UBELL (2002: 452f.) wie folgt berechnen:

$$G = P - ET - R_D$$

G: Grundwasserneubildung

P: effektiver Niederschlag (entspricht der Gesamtniederschlagsmenge abzügl. Interzeption)

ET: Evapotranspiration

R_D: Direktabfluss, entspricht $A_0 + A_1$

A₀: Oberflächenabfluss

A₁: Interflow (Zwischenabfluss)

Vom Gesamtniederschlag geht in einem ersten Schritt ein Teil durch die Interzeption der Oberfläche von Pflanzen verloren. Nachdem ein Teil der Niederschläge auf der Landoberfläche abgefließen ist (Oberflächenabfluss A_0), verdunstet ein weiterer Teil der Niederschläge durch die Pflanzen und an der Bodenoberfläche (Evapotranspiration ET). Der Restniederschlag versickert, durchströmt die Bodenzone und die restliche ungesättigte Zone, bis er auf die Grundwasseroberfläche trifft und zu Grundwasser wird. Während des Versickerungsvorgangs kann es zum Interflow (Zwischenabfluss A_1) kommen, so dass das Wasser entlang von Schichtgrenzen oder Verwitterungszonen hangabwärts fließt, bis es wieder einen Vorfluter erreicht.

Diese Vorgänge sind in Abb. 1 schematisch dargestellt: Bild A zeigt den einfachsten Fall, der für das Flachland angenommen werden kann: Der gesamte versickerte Niederschlagsanteil kommt der Grundwasserneubildung zu Gute; mangels Hangneigung kommt es nicht zu Interflow. Bild B zeigt die Situation bei höherer Reliefenergie: Hier spielt der Interflow eine maßgebliche Rolle, da ein großer Teil des versickerten Wassers einem nahe gelegenen Vorfluter zugeführt wird und nur ein kleiner Anteil die Grundwasseroberfläche erreicht.

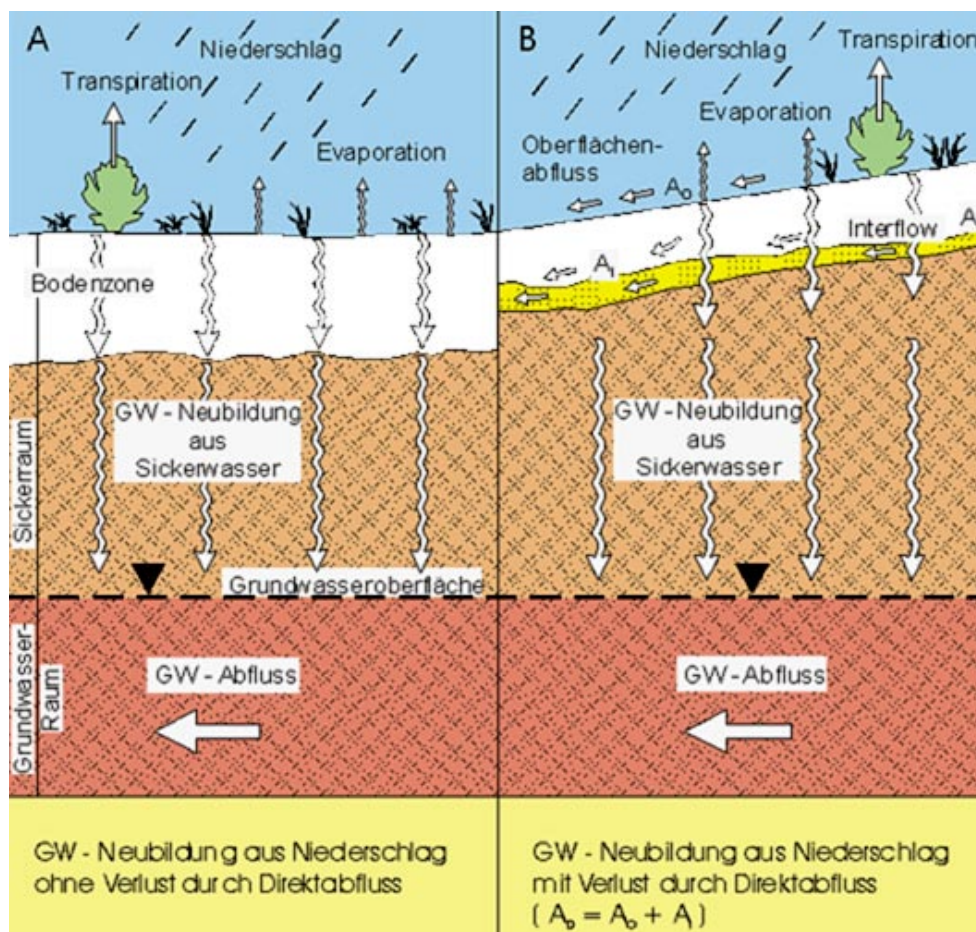


Abb. 1: Schematischer Ablauf der Grundwasserneubildung.

Quelle: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG

2.2 Quantitative Parameter der Grundwasserneubildung

Zur Bestimmung der Menge der Grundwasserneubildung ist es notwendig, die relevanten Einflussfaktoren zu kennen. Grundsätzlich lassen sich drei Parametergruppen unterscheiden: der Abfluss, die bodenabhängigen Parameter und die meteorologischen Parameter. Diese drei Bereiche sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

2.2.1 Abfluss

Die Komponente des direkten Abflusses kann in den oberirdischen Abfluss und den Zwischenabfluss (Interflow) unterteilt werden. Die Menge des direkten Abflusses ist zum einen abhängig vom anstehenden Gestein, zum anderen vom Relief. In Räumen mit stark wasserundurchlässigem Gestein und geringer Klüftung ist das Gewässernetz dichter und somit der Anteil des oberflächlichen Abflusses höher. Das Vorhandensein von periglazialen Deckschichten in Verbindung mit einer entsprechenden Hangneigung fördert den Zwischenabfluss. Aufgrund ihrer KorngröÙeneigenschaften und der häufig hangparallelen Einregelung der Grobkomponenten kann vor allem die Hauptlage über dem tonigen Bereich der Mittellage als natürliche Drainage funktionieren. Das Niederschlagswasser kann deshalb zwar leicht in den Boden einsickern, fließt dann aber oberflächennah als Interflow zum Vorfluter und wird schließlich über das oberflächliche Gewässernetz abtransportiert (BIBUS 1986: 49ff.). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Anteil des direkten Abflusses am Niederschlag der Grundwasserneubildung nicht mehr zur Verfügung steht.

2.2.2 Meteorologische Faktoren

Die meteorologischen Faktoren lassen sich, wie dies auch in der oben vorgestellten Grundwasserneubildungsformel getan wird, in zwei Hauptkomponenten aufgliedern: den Niederschlag und die Verdunstung.

Der Niederschlag ist der wichtigste Parameter für die Grundwasserneubildung, da er die einzige relevante Input-GröÙe darstellt. Ohne Niederschlag wäre die Grundwasserneubildung äußerst gering, weil sie dann nur noch über die Infiltration aus den vorhandenen Oberflächengewässern gespeist würde. Mit steigender Niederschlagsmenge steigt auch die Grundwasserneubildung, sofern nicht andere Parameter hemmend wirken.

Die Komponente der Verdunstung wird durch drei maßgebliche Faktoren bedingt:

- Lufttemperatur: Mit zunehmender Temperatur steigt die Verdunstung.
- Relative Luftfeuchte: Ist die bodennahe Luft bereits feuchtigkeitsgesättigt, findet Verdunstung nur noch in einem stark reduzierten Rahmen statt.

- Windgeschwindigkeit: Mit zunehmender Windgeschwindigkeit findet ein verstärkter Abtransport der evapotranspirierten Feuchtigkeit statt. Es kommt nicht zu einer Feuchtigkeitssättigung der bodennahen Luft (ARMBRUSTER 2002: 39ff.).

2.2.3 Boden

Die Gruppe der bodenabhängigen Einflussfaktoren besteht aus drei Hauptparametern, die nach ARMBRUSTER (2002: 35ff.) die Grundwasserneubildung vorrangig beeinflussen:

- *Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum*: Mit zunehmender Bodenspeicherkapazität steht den Pflanzen auch in den sommerlichen Trockenperioden noch ausreichend Bodenwasser zur Transpiration zur Verfügung. Dadurch wird auf den Jahresverlauf gesehen mehr Niederschlag wieder verdunstet, welcher der Grundwasserneubildung nicht mehr zur Verfügung steht.
- *Kapillarer Aufstieg*: Bei Böden, die vom Grundwasser beeinflusst sind, hat der Betrag des kapillaren Aufstiegs eine starke Auswirkung auf die Menge der Grundwasserneubildung. Je höher der kapillare Aufstieg ist, desto geringer ist die Grundwasserneubildung. Die Stärke des kapillaren Aufstiegs hängt einerseits von der Bodenart, andererseits vom Klima ab. Kapillarer Aufstieg findet verstärkt bei trockenen, warmen und nur geringfügig in feuchteren, kühleren Verhältnissen statt. Dies bedeutet für Baden-Württemberg, dass der kapillare Aufstieg auf die Grundwasserneubildung in der Oberrheinischen Tiefebene eine größere Auswirkung hat als auf die Grundwasserneubildung im Alpenvorland.
- *Landnutzung*: Auch die Landnutzung hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung. Ein Maß für deren Einfluss ist der Blattflächenindex (der prozentuale Anteil der Bodenbedeckung durch Vegetation): Je höher die Überdeckung des Bodens durch Vegetation ist, desto größer sind Interzeption und Evapotranspiration, und desto geringer ist die Grundwasserneubildung. Auch der Versiegelungsgrad der Oberfläche kann als Maß des Einflusses der Landnutzung herangezogen werden: In besiedelten Gebieten findet meist kaum Grundwasserneubildung statt, da hier ein großer Teil der Flächen versiegelt ist, Niederschlagswasser über die Kanalisation schnell zum Vorfluter abgeführt und somit eine Infiltration in den Boden unterbunden wird. Auch die Durchwurzelungstiefe, die von der Landnutzung abhängig ist, spielt eine Rolle: Unter Ackerflächen ist die Grundwasserneubildung wesentlich geringer als unter Grünland, da dort die Durchwurzelungstiefe größer ist und den Pflanzen somit mehr Grundwasser zur Transpiration zur Verfügung steht.

2.3 Qualitative Parameter der Grundwasserneubildung

Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Niederschlag, Grundwasserüberdeckung (unter Grundwasserüberdeckung versteht man nach DIN 4049 den Boden- und Gesteinskörper über dem obersten Grundwasserstockwerk (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG 1996)) und dem Grundwasser sowie dem meist kleinräumigen Wechsel dieser Geofaktoren ist es meist schwierig, Aussagen über die Qualität der Grundwasserneubildung zu treffen.

Das von HÖLTING (1995) entwickelte Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung ermöglicht eine qualitative Beurteilung derselben. Im Folgenden sollen die vier wichtigsten Parameter dieses Konzepts erläutert werden:

- *Nutzbare Feldkapazität*: Die nutzbare Feldkapazität ist ein Maß für die Speicherfähigkeit an pflanzenverfügbarem Wasser und beschreibt somit das Wasserrückhaltevermögen des Substrats. Sie ist hauptsächlich abhängig von der Körnung, der effektiven Lagerungsdichte und dem Humusgehalt des Bodens. Je höher die nutzbare Feldkapazität ist, desto größer ist die für die Stoffabbauprozesse zur Verfügung stehende Oberfläche, und umso besser ist auch die Schadstofffilterleistung des Bodens.
- *Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung*: Sie ist ein Maß für die Länge des zur Verfügung stehenden Sickerweges. Je länger dieser Sickerweg ist, desto höher ist die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung.
- *Sickerwassermenge*: Je höher die Sickerwassermenge ist, desto geringer ist die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, da hohe Sickerwasserraten eine schnellere Vertikalbewegung des, unter Umständen verunreinigten, Sickerwassers bedeuten. Zusammen mit nutzbarer Feldkapazität und Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung bedingt die Sickerwassermenge die Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung.
- *Gesteinsart*: Aufgrund ihrer unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften ist es nötig, Lockersedimente und Festgesteine getrennt voneinander zu betrachten. Während Festgesteine meist geringe Wasserdurchlässigkeiten besitzen, ist durch Klüftung oder Verkarstung jedoch häufig die Verweildauer des Sickerwassers gering. Gleiches ist bei gröberen Lockersedimenten der Fall. Bei Lockersedimenten mit einem mittleren bis hohen Anteil an den feineren Korngrößenfraktionen kann die Schutzfunktion noch differenzierter anhand der korngrößenabhängigen Kationenaustauschkapazität (KAK) bewertet werden – je höher die KAK ist, desto höher ist auch die Schutzfunktion des Lockersediments.

3 Regionale Differenzierung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg

3.1 Klimatische Verhältnisse in Baden-Württemberg

Das Klima Baden-Württembergs wird vorrangig durch die Lage zwischen dem ozeanischen Klima des Nordatlantiks und dem kontinentalen Klima der osteuropäischen Festlandsmasse bestimmt. Die Niederschläge Baden-Württembergs sind wesentlich durch die von den vorherrschenden Winden herangeführten feuchten Luftmassen geprägt: Aufgrund ihrer Stauwirkung sind die Jahresniederschlagsmengen im Luv von Schwarzwald, Odenwald, den Alpen und, in geringerer Form, der Schwäbischen Alb besonders hoch. Im Lee der Gebirge sind die Niederschlagsmengen wesentlich geringer. Die räumliche Verteilung der Lufttemperaturen in Baden-Württemberg ist stark höhenabhängig. Die höchsten Jahresmittelwerte finden sich in der Oberrheinischen Tiefebene, die tiefsten im Schwarzwald und auf der Schwäbischen Alb (Abb. 2). Karte 1 im Anhang gibt Auskunft über die mittlere jährliche Verdunstung in Baden-Württemberg (BORCHERDT 1992: 40ff.).

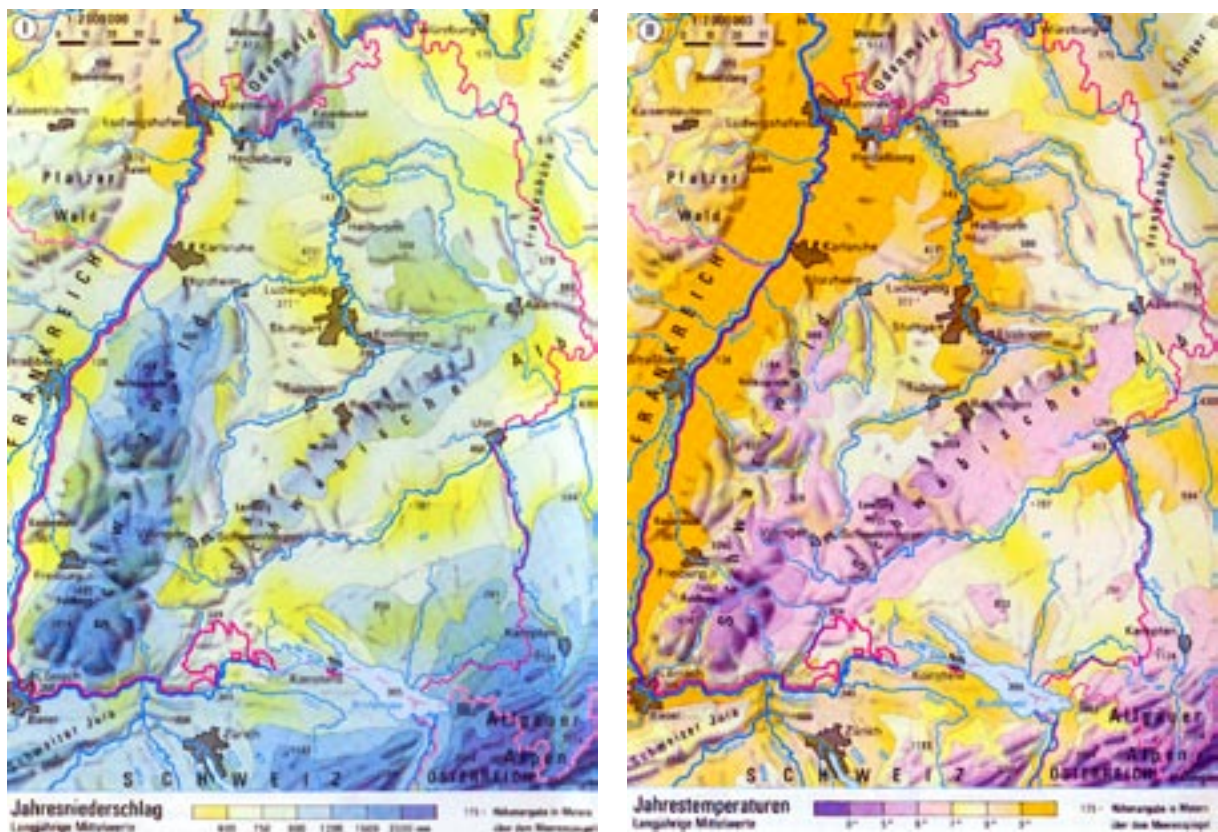


Abb. 2: Mittlere Jahresniederschläge und Jahrestemperaturen in Baden-Württemberg.

Quelle: BORCHERDT 1992: 34f.

3.2 Grundwasserlandschaften Baden-Württembergs

3.2.1 Oberrheingraben

In dem im Tertiär durch tektonische Bruchvorgänge entstandenen Oberrheingraben wurden im Pliozän und Quartär durch den Rhein und seine Nebenflüsse fluviatile und limnische Sedimente (Kiese, Sande, Schluffe, Tone) in unterschiedlicher Mächtigkeit abgelagert. Großräumig betrachtet besteht der Oberrheingraben aus zwei Hauptsenkungszonen (Kaiserstuhl–Offenburg und Heidelberg–Darmstadt), die durch eine Hochzone im Raum Rastatt–Karlsruhe getrennt werden (Abb. 3). Die größte Mächtigkeit quartärer Ablagerungen findet man im

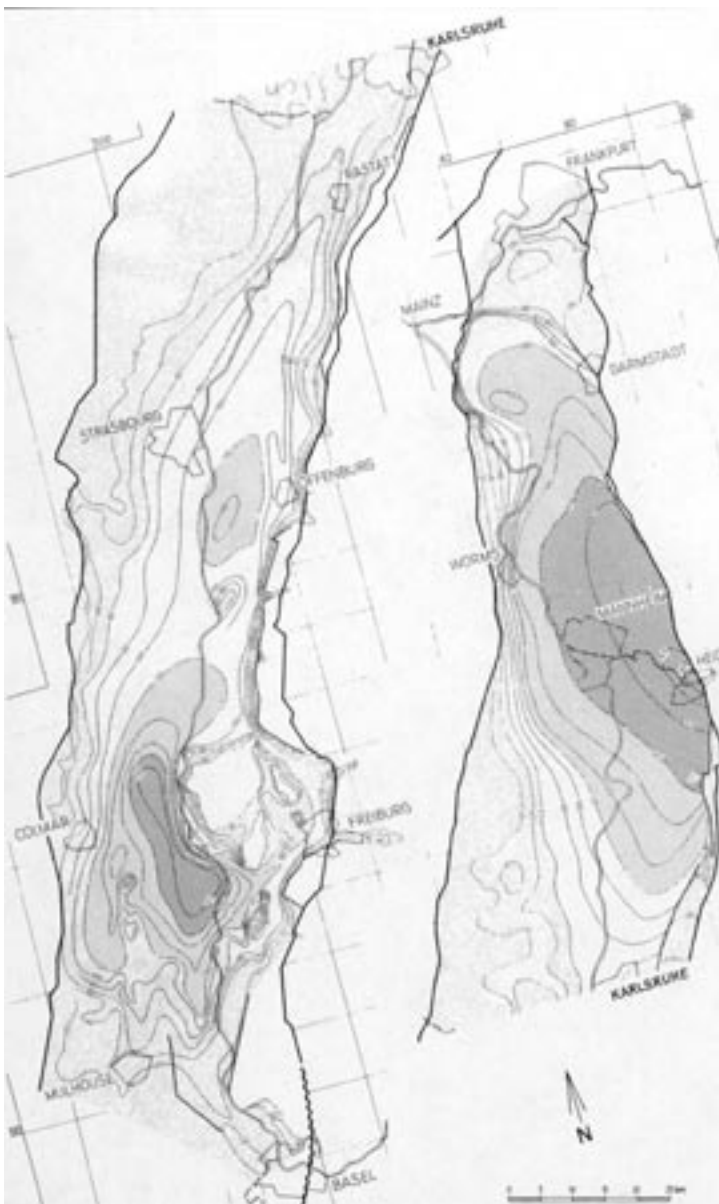


Abb. 3: Mächtigkeit der quartären Sedimente im Oberrheingraben. – Quelle: DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 205.

so genannten Heidelberger Loch mit 382 Metern (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 203ff.).

Da diese quartären Sedimente eine große Menge Porengrundwasser enthalten, sind sie wasserwirtschaftlich sehr bedeutend – die Hälfte des in Baden-Württemberg geförderten Grundwassers stammt aus dem Oberrheingraben (STATISTISCHES LANDESAMT 1999: 112). Gekennzeichnet ist der Oberrheingraben durch eine Dreigliederung des Grundwasserleiters: Aus dem Jungquartär stammen die obere, hauptsächlich kiesige Abteilung und die mittlere, vorwiegend sandige Abteilung. Die Grundwassergewinnung findet zu wesentlichen Teilen in diesen beiden Grundwasserstockwerken statt. Die unterste, hauptsächlich sandig-tonige Abteilung stammt aus dem Altquartär. Diese drei Grundwasserhorizonte stehen durch primäre oder erosiv entstandene Fenster in den Trennschichten hydraulisch in Verbindung. Durch diese

Lücken erfolgt auch die Grundwasserneubildung in den tieferen Grundwasserleiter (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 203ff.).

Der Kaiserstuhl bildet innerhalb des Oberrheingrabens eine eigene Grundwasserlandschaft. Bei den anstehenden Gesteinen handelt es sich um Vulkanite, die zum Teil mit einer bis zu 30 Meter mächtigen Lössschicht bedeckt sind. In den vulkanischen Gesteinen findet, außer in einer geringmächtigen Schutt- und Auflockerungszone, kaum Grundwasserführung statt. Die Lössauflage, die aufgrund ihres großen Bodenporenvolumens über gute Speichereigenschaften und wegen der hohen Kapillarkräfte über schlechte Leitereigenschaften verfügt, kann die Standortverhältnisse verbessern (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 208).

Die natürlichen Grundwasserverhältnisse des Oberrheingrabens wurden in den letzten Jahrhunderten durch anthropogene Eingriffe stark verändert: Die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts begonnene und 1876 abgeschlossene TULLA'sche Rheinkorrektur führte zu einer durchschnittlichen Grundwasserabsenkung von zwei Metern, konnte an einigen Stellen jedoch bis zu sechs Meter betragen. Der Bau des Rheinseitenkanals (Grand Canal d'Alsace) zwischen Basel und Breisach von 1928 bis 1956 hatte eine starke Abnahme der Wasserführung des Restrheins zur Folge, was in großen Teilen der Oberrheinischen Tiefebene zu einer weiteren Tieferlegung der Grundwasseroberfläche um zwei Meter führte (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 208). Diese Absenkungen des Grundwasserspiegel hatten weit reichende Folgen: Zum einen starb großflächig der Auenwald ab, zum anderen wurde eine Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen notwendig, da die Pflanzen das Grundwasser mit ihren Wurzeln nicht mehr erreichen konnten.

In den Auebereichen des Rheins und der Schwarzwaldnebenflüsse finden sich meist gut bis sehr gut speicherfähige Aueböden (Auepararendzinen, Braune Aueböden, Auegleye). Die ca. 5–18m über dem Niveau des Rheins angelegte Niederterrasse weist verbreitet Schwemmlöss auf. Auf ihr dominieren Braunerde- und Parabraunerden, die geringmächtiger und weniger gut speicherfähig sind. In der lössbedeckten Vorbergzone finden sich vor allem Pararendzinen und Parabraunerden mit einem hohen Speichervermögen. Bei der Landnutzung dominiert aufgrund der klimatischen Begünstigung in der Oberrheinischen Tiefebene der Ackerbau, in der lössbedeckten Vorlandzone mit den Sonderkulturen Obst- und Weinanbau. Auf der Niederterrasse und den Flugsandgebieten herrscht Wald vor, in stauwasserbeeinflussten Zonen auch Grünland. Insgesamt ist der Oberrheingraben stark zersiedelt und weist einen hohen Versiegelungsgrad auf (ARMBRUSTER 2002: 9f.).

Die Grundwasserneubildung des Oberrheingrabens wird durch die Niederschlagsverhältnisse dominiert: zum einen ist ein deutlicher Ost-West-Gradient, bedingt durch den Steigungs-

regen am Schwarzwald, erkennbar, zum anderen ist die Grundwasserneubildung im südlichen Oberrheingraben wesentlich geringer, da sich dieser Bereich im Regenschatten der Vogesen befindet. Morphologisch wird die Grundwasserneubildung begünstigt durch die ebenen Verhältnisse, den daraus resultierenden relativ geringen lateralen Abfluss und die sehr gute Durchlässigkeit der quartären Lockersedimente. Der Rhein hat auf die Grundwasserneubildung mit Hinblick auf den Jahresgang eine ausgleichende Wirkung: Durch die Schmelzwässer aus den Alpen hat er im Sommer häufig sehr hohe Wasserstände, wodurch das Grundwasser einige Kilometer weit ins Vorland zurück gestaut wird. Dies ist günstig für den Grundwasserhaushalt, steht so doch relativ viel Grundwasser in einer Jahreszeit zur Verfügung, in der normalerweise ein hoher Verbrauch auf eine geringe Neubildungsrate trifft (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 213, ARMBRUSTER 2002: 113).

3.2.2 Schwarzwald und Odenwald

Sowohl Schwarzwald als auch Odenwald unterteilen sich geologisch in zwei Zonen: An der Westabdachung finden sich kristalline Gesteine, an der Ostabdachung steht der Buntsandstein an. Das Grundgebirge der Westabdachung hat, abhängig von der Klüftigkeit, eine schlechte Wasserwegsamkeit. In Verbindung mit den durch Steigungsregen bedingten hohen Niederschlagsmengen konnte sich in diesem Bereich ein dichtes Gewässernetz ausbilden.

In der Einheit des Unteren Buntsandsteins ist der Bröckelschiefer wegen seiner geringen Durchlässigkeit die unterste Sohlschicht, über der sich mehrere, regional unterschiedlich mächtige Grundwasserstockwerke befinden. Die ergiebigsten Quellen des Buntsandsteins treten über dem Eck'schen Konglomerat des Schwarzwalds zu Tage. Die darüber folgenden Sandsteinschichten weisen neben regional unterschiedlicher Durchlässigkeit aufgrund einzelner Tonstein-Zwischenlagen große Schwankungen der Wasserwegsamkeit auf. Die Grundwasserbewegung und -speicherung innerhalb der Buntsandsteinabfolge findet hauptsächlich in hydraulisch zusammenhängenden Klüften und Schichtfugen statt – der Porenraum ist nur untergeordnet am Wasserdurchsatz beteiligt. Aufgrund der im Verhältnis zum Kristallin höheren Wasserwegsamkeit des Untergrunds ist die Gewässernetzdichte im Buntsandstein wesentlich geringer (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 216ff.).

Die Mächtigkeit und Speicherfähigkeit der Böden in Schwarzwald und Odenwald ist stark reliefabhängig; großräumig betrachtet herrscht jedoch eine mittlere Bodenmächtigkeit vor. Die Speicherfähigkeit ist, abhängig vom Bodentyp, sehr gering (Podsole) bis durchschnittlich (Braunerden). Die Durchlässigkeit ist abhängig von den Bodeneigenschaften und vom Aufbau der vor allem in höheren Lagen ausgebildeten periglazialen Schuttdecken. Bei der Landnut-

zung dominiert der Nadelwald; Siedlungen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Flusstäler (ARMBRUSTER 2002: 11).

Die Grundwasserneubildung in Schwarzwald und Odenwald ist, bedingt durch hohe Niederschläge und trotz eines Anteils des Direktabflusses von 45–75%, sehr hoch. Entsprechend der Höhenabhängigkeit des Niederschlags und der Verdunstung nimmt die Neubildungsrate mit steigender Höhe zu. Eine wirtschaftliche Erschließung des Grundwassers ist vor allem dort möglich, wo sich Verwerfungen mit den tektonisch angelegten Tälern schneiden. Als Beispiel sei die Wasserversorgung Pforzheim-Enztal genannt (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 218, ARMBRUSTER 2002: 11).

3.2.3 Südwestdeutsches Schichtstufenland

3.2.3.1 Die Gäulandschaften des Muschelkalks

In Baden-Württemberg hat der oft nur mit geringmächtigem Lehm bedeckte Muschelkalk seine Verbreitung nördlich der Jagst sowie westlich und südwestlich von Stuttgart. Die Gäulandschaften bilden ausgedehnte, waldarme Ebenen, bestehend aus verkarsteten und gut wasserdurchlässigen Muschelkalkplatten.

Die Grundwasserführung innerhalb der Abfolge des Muschelkalks ist uneinheitlich: Der Untere Muschelkalk ist nur dort wasserführend, wo er geklüftet ist. Dies ist vor allem in den dickbankigen Gesteinen der Schaumkalkzone der Fall. Die Oberen Dolomite des Mittleren Muschelkalks stellen ergiebige Grundwasserleiter dar: Dieses Grundwasser ist jedoch nur dann als Trinkwasserressource verwendbar, wenn der darüber liegende Hauptmuschelkalk fast vollständig erodiert ist, da sonst eine zu starke Aufhärtung des Sickerwassers erfolgt. Die Wasserführung des Oberen Muschelkalks hängt wiederum hauptsächlich von dessen Klüftung und Verkarstung ab. Außerdem wird die Grundwasserneubildung in diesem Bereich stark von der Mächtigkeit der oft wenig wasserdurchlässigen Deckschichten aus Decklehm und Resten des Lettenkeupers beeinflusst. Je stärker die Überlagerung mit Lettenkeuper-Resten und Lössdecken ist, desto dichter ist das Gewässernetz, und desto höher ist der Anteil des Direktabflusses. Die Oberen Gäue, die sich im Windschatten des Schwarzwalds befinden, sind lössfrei. Hier steht direkt der Muschelkalk an, was ein sehr dünnes Gewässernetz und eine vorwiegend unterirdische Entwässerung im Karstsystem zur Folge hat. Im Allgemeinen werden die Lössdecken nach Osten hin mit zunehmendem Abstand vom Oberrheinischen Tiefland dünner (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 218ff., ARMBRUSTER 2002: 11).

Die Mächtigkeit der Böden ist stark abhängig vom Vorkommen von Lettenkeuper-Resten und Lössdecken. Je mächtiger die Lössauflage ist, desto speicherfähiger sind die darauf entwi-

ckelten Böden, meist Parabraunerden, bei guter Durchlässigkeit. Im Kraichgau befinden sich die speicherfähigsten Böden Baden-Württembergs. Bei direkt anstehendem Muschelkalk, wie in den Oberen Gäuen, sind die Böden (Rendzinen) nur geringmächtig und wenig speicherfähig. Als Landnutzung dominiert bei klimatischer Begünstigung und vorhandener Lössauflage der Ackerbau; in Nordost-Württemberg und den Oberen Gäuen herrschen Grünland und Mischwald vor. Das Neckarbecken und Großraum Stuttgart sind vor allem durch eine hohe Siedlungsdichte und eine damit verbundene starke Versiegelung geprägt (ARMBRUSTER 2002: 11f.).

Die Grundwasserneubildung weist in den Gäulandschaften aufgrund mäßigen Niederschlags, relativ hoher Verdunstung und geringem Direktabfluss – abhängig von der Landnutzung – in weiten Gebieten mittlere Raten auf. In der Hohenloher Ebene ist wegen der klimatischen Situation die Verdunstung geringer. Dies wird jedoch durch einen größeren Anteil des Direktabflusses überkompensiert: hier findet eine nur sehr geringe Grundwasserneubildung statt (ARMBRUSTER 2002: 114).

3.2.3.2 Keuper-Bergland

Der Keuper ist innerhalb des Südwestdeutschen Schichtstufenlands der geologische Zeitabschnitt mit der größten Verbreitung an der Oberfläche.

Im Unteren Keuper (Lettenkeuper) findet ein rascher Wechsel von klüftigen und kaum durchlässigen Schichten statt, was zu mehreren, jedoch nur kleinen wasserführenden Horizonten führt. Im Allgemeinen ist der Untere Keuper allerdings als Grundwassergeringleiter anzusehen. Im Verbreitungsgebiet des Gipskeupers gibt es aufgrund der Wasserhärte kaum brauchbare Grundwasservorkommen: Bei der Entwicklung von oberflächennahem Gipskarst finden sich meist größere Grundwassermengen, die aber stark sulfathaltig und deshalb kaum nutzbar sind. Im Schilfsandstein finden sich aufgrund rasch wechselnder Zusammensetzung und nur kleinen Regenerationsflächen wenig ergiebige Grundwassermengen mit geringer Härte. Der größte Grundwasserträger der Keuperformation ist aufgrund seiner klüftigen und porösen Struktur der Stubensandstein; hier erreichen die Quellschüttungen bis zu 10 l/s. Mit Ausnahme des Gipskeupers liefern die Quellen des Mittleren Keupers relativ weiches Wasser, das nur geringen Schüttungsschwankungen unterliegt (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 220ff., SCHNIERTSHAUER 1992: 17ff.).

Bedingt durch die Geologie führt der relativ undurchlässige Untergrund zu einem dichten, stark verzweigten Talnetz. Dem kleinräumigen Wechsel der Gesteine entsprechend wechseln auch die Böden (Braunerden, Pseudogleye und Pelosole) ihre Eigenschaften; vorherrschend

sind mittleres Speichervermögen und mittlere bis geringe Durchlässigkeit. Als Landnutzung ist für das Keuper-Bergland der Wald dominant, in kleinen Teilen kommt auch Grünland vor. Die Siedlungsdichte ist hier relativ gering (ARMBRUSTER 2002: 12).

Die Grundwasserneubildung im Keuper-Bergland ist, trotz höherer Niederschläge als in den Muschelkalkgebieten, recht gering. Einerseits hat die intensive Waldnutzung eine stärkere Verdunstung zur Folge, andererseits kann durch das dichte Gewässernetz ein großer Teil des Niederschlagswassers direkt abgeführt werden (ARMBRUSTER 2002: 114).

3.2.3.3 Albvorland

Im Albvorland, welches an ergiebigen Grundwasservorkommen sehr arm ist, stehen die Schichten des Schwarzen und des Braunen Jura an. Der Schwarze Jura besteht zum größten Teil aus einer wechselnden Abfolge von Tonen, Tonmergeln und Mergeln ohne nennenswerte Grundwasserführung. Eine Ausnahme sind die Pylonoten-, Angulaten- und Arieten-Schichten, die zusammen die Formation des Lias α darstellen. Die Sandsteine und Kalksteine des Lias α bilden einen mehr oder weniger zusammenhängenden Kluftgrundwasserleiter, dessen stärkster Quellhorizont sich an der Lias/Keupergrenze findet – dort wirken die undurchlässigen Knollenmergel des Keupers als Sohlenschicht. Diese Quellen wurden vor Beginn der Fernwasserversorgung im Albvorland häufig zur Gewinnung von Trinkwasser verwendet. Da sich ihre Einzugsgebiete jedoch in die landwirtschaftlich stark genutzten Lias α -Verebnungen erstrecken, kann das Quellwasser heute kaum noch zur Wasserversorgung genutzt werden. Auch die Posidonien-Schiefer des Lias ϵ sind stellenweise klüftig und weisen deswegen eine geringe Wasserführung auf. Allerdings hat dieses Kluftgrundwasser einen hohen Gehalt an Schwefelwasserstoff, Sulfaten und Sulfiden, so dass sie ausschließlich als Heilwässer genutzt werden – wie zum Beispiel in Bad Sebastiansweiler bei Hechingen (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 222ff.).

Die Abfolge des Braunen Jura besteht aus tonig-mergeligen Schichten, die nur in wenigen Sandstein- und Oolith-Bänken etwas Kluftgrundwasser führen (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 226).

Im Albvorland dominieren generell schwere, schlecht wasserdurchlässige Böden mit mittlerem Speichervermögen (Pelosole, Braunerden, Rendzinen), was in Verbindung mit den geologischen Eigenschaften ein dichtes Gewässernetz bedingt. Dieses hat wiederum einen sehr hohen Anteil an Direktabfluss zur Folge und führt somit zu einer sehr geringen Grundwasser-

neubildung (ARMBRUSTER 2002: 12, 114).

3.2.3.4 Schwäbische Alb

Der Obere Jura der Schwäbisch-Fränkischen Alb ist das größte Karstgebiet des außeralpinen Mitteleuropas und ist als Grundwasserleiter in Baden-Württemberg von großer Bedeutung. Während ein schmaler Streifen entlang des Albtraufs über den Neckar zum Rhein hin entwässert, verläuft die Entwässerung des übrigen Gebiets der Schwäbischen Alb zur Donau hin (Abb. 4).

Die Schichten des Oxfordiums bilden den untersten Teil des Karstwasserleiters, der die gesamten darüber befindlichen Schichten des Oberen Juras umfasst. Die Sohlenschicht des Karstwasserleiters des Oberen Juras ist der gering durchlässige Oxfordmergel, die wohlgebankten Kalke des oberen Oxfordiums sind meist klüftig und verkarstet und verfügen über eine große Wasserwegsamkeit. Die über dem Ober-Oxford folgenden Mergel des Unterkimmeridges sind vor allem in den Bereichen des Seichten Karsts verkarstet und klüftig. Sind sie jedoch nur wenig geklüftet, können sie wasserstauend wirken und kleinere Quellhorizonte verursachen. So wird z.B. die Quelle des Uracher Wasserfalls aus diesem Quellhorizont gespeist. In der Zone des Tiefen Karsts sind die Schichten des Unterkimmeridges nicht oder kaum verkarstet, da sie unterhalb der Karstwasseroberfläche liegen. Der eigentliche Karstwasserleiter umfasst dann nur die darauf liegenden Schichten ab dem Mittelkimmeridge bis zum Thiton. Den wichtigsten Teil des Karstwasserleiters der Schwäbischen Alb stellen jedoch die verkarsteten und klüftigen, massigen bis dickbankigen Felsenkalke und Dolomite des Mittel- und Oberkimmeridge dar (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 228ff.).

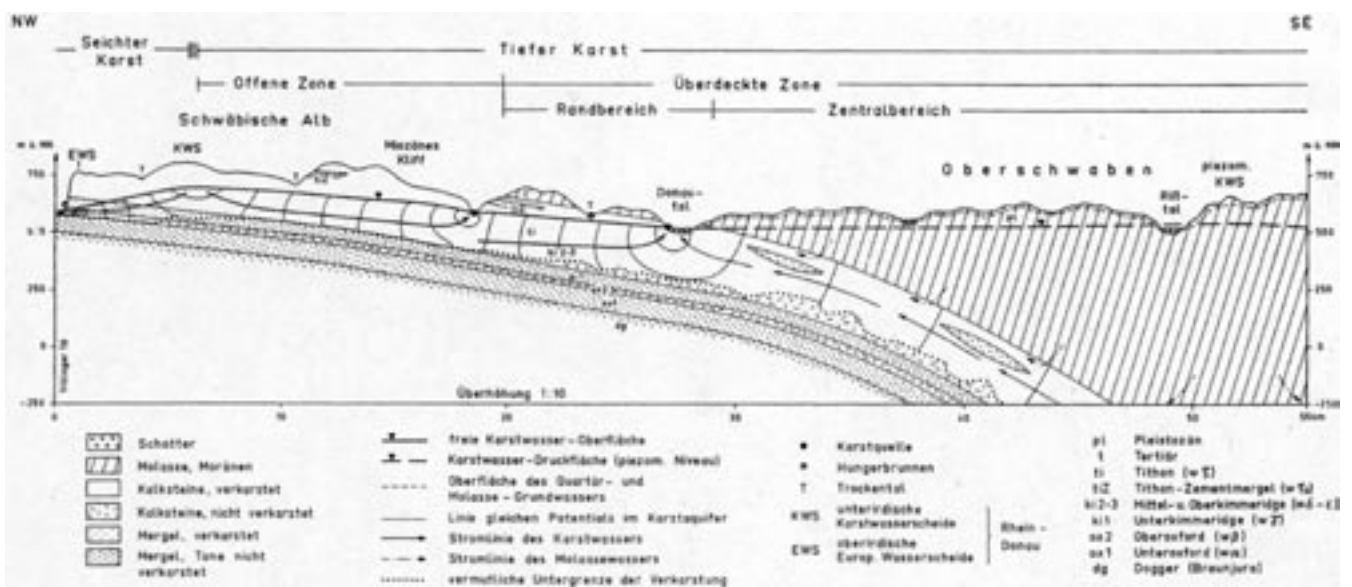


Abb. 4: Schematischer karsthydrologischer Schnitt durch die Schwäbische Alb.

Quelle: DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 224.

Der Karstwasserleiter des Oberen Jura kann, trotz einiger Inhomogenitäten, als einheitlich und zusammenhängend gesehen werden, zumal eine zusammenhängende Karstwasseroberfläche existiert. Die Quellen des Seichten Karsts unterliegen stark den Oberflächeneinflüssen und haben sehr schwankende Schüttungen. Die Schüttung der Quellen des Tiefen Karsts ist meist wesentlich ausgeglichener, Oberflächeneinflüsse spielen aufgrund der stärkeren Pufferung keine so ausgeprägte Rolle wie im Seichten Karst.

Die Wasserversorgung der Alb erfolgte in der Vergangenheit häufig aus gefassten Karstquellen des Malm-Karstwasserleiters. Hygienische Probleme bereitete dabei jedoch vor allem das kurzfristige Karstgrundwasser, da dies ohne nennenswerte Filterung schnell wieder an die Oberfläche gelangt. Heute werden zur öffentlichen Wasserversorgung hauptsächlich Bohrbrunnen verwendet, die aus größerer Tiefe langfristiges tiefphreatisches Karstwasser fördern, das hygienisch weniger gefährdet ist (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 233).

Durch die hohe Wasserwegsamkeit des anstehenden Gesteins gibt es auf der Schwäbischen Alb nur eine äußerst geringe Gewässernetzdichte. Das unterirdisch abfließende Grundwasser tritt zu einem größeren Teil in schüttungsreichen Quelltöpfen am Südrand der Schwäbischen Alb wieder zu Tage. Die Schüttungsrate des Blautopfs bei Blaubeuren beträgt im Mittel 2160 l/s, kann aber durch Niederschlags- und Schmelzwassereinflüsse auf 32000 l/s ansteigen. Bei den am weitesten verbreiteten Böden handelt es sich um Rendzinen und Terrae Fuscae von geringer Mächtigkeit, die eine geringe Speicherfähigkeit und eine hohe Durchlässigkeit besitzen. Die Werte der Grundwasserneubildung sind auf der Schwäbischen Alb aufgrund unterschiedlicher Anteile des Direktabflusses relativ inhomogen, großräumig betrachtet dominiert jedoch eine hohe Grundwasserneubildungsrate (ARMBRUSTER 2002: 114).

3.2.4 Alpenvorland

Neben dem Oberrheingraben ist das Alpenvorland der grundwasserreichste Raum in Baden-Württemberg. Dieser geologische Senkungstrog wurde während der Entstehung der Alpen mit tertiärer Molasse aufgefüllt und während des Pleistozäns glazial überformt. Aufgrund dieser Entstehungsgeschichte lässt sich dieser Raum oberflächlich in zwei Großräume unterteilen: in die Altmoränenlandschaft und die Jungmoränenlandschaft. Während in der Jungmoränenlandschaft mit ihrer unruhigen Topographie die Gewässernetzdichte recht hoch ist, weist die Altmoränenlandschaft ein weniger dichtes Gewässernetz auf.

Die fluvioglazialen Ablagerungen des Pleistozäns im Alpenvorland bergen die bedeutendsten Grundwasservorkommen zwischen Donau und den Alpen (Abb. 5). Diese grundwasserleitenden Kieskörper sind im schwerdurchlässigen Untergrund rinnenförmig ausgeprägt. Sie

bestehen hauptsächlich aus groben, wechselnd sandigen Kiese mit meist sehr hoher Durchlässigkeit bei einer hohen Grundwasserfließgeschwindigkeit. Aufgrund des guten Filtervermögens des Porengrundwasserleiters stellt dies von einem wasserhygienischen Standpunkt jedoch kein Problem dar. Die Brunnen dieser Region weisen Schüttungen bis zu 300 l/s auf (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 235ff.).

Der wichtigste Grundwasserleiter unterhalb der Molasse ist der Malm-Karstwasserleiter, aus dem örtlich Thermalwässer gefördert werden, wie zum Beispiel in Bad Saulgau.

Die Böden des Alpenvorlands sind, dem geologischen Ausgangsmaterial entsprechend, sehr heterogen. Die auf Geschiebemergeln und Beckensedimenten entwickelten Braunerden und Parabraunerden sind mächtig und weisen hohe bis sehr hohe Speicherfähigkeiten auf; die örtlich vorkommenden Moore und Parabraunerden aus Löss sind ebenfalls sehr speicherfähig. Die Böden des Altmoränenlands sind etwas speicherfähiger, durch die starke Verwitterung auch dichter und schwerer durchlässig als die Böden der Jungmoränenlandschaft. Bei der Landnutzung dominieren im Altmoränenland der Ackerbau, im Jungmoränenland höhere Anteile an Wald und Grünland. Im Bodenseeraum finden sich einerseits aufgrund klimatischer Begünstigung Sonderkulturen, zum anderen nimmt aber auch die Siedlungsdichte zu (ARMBRUSTER 2002: 12).

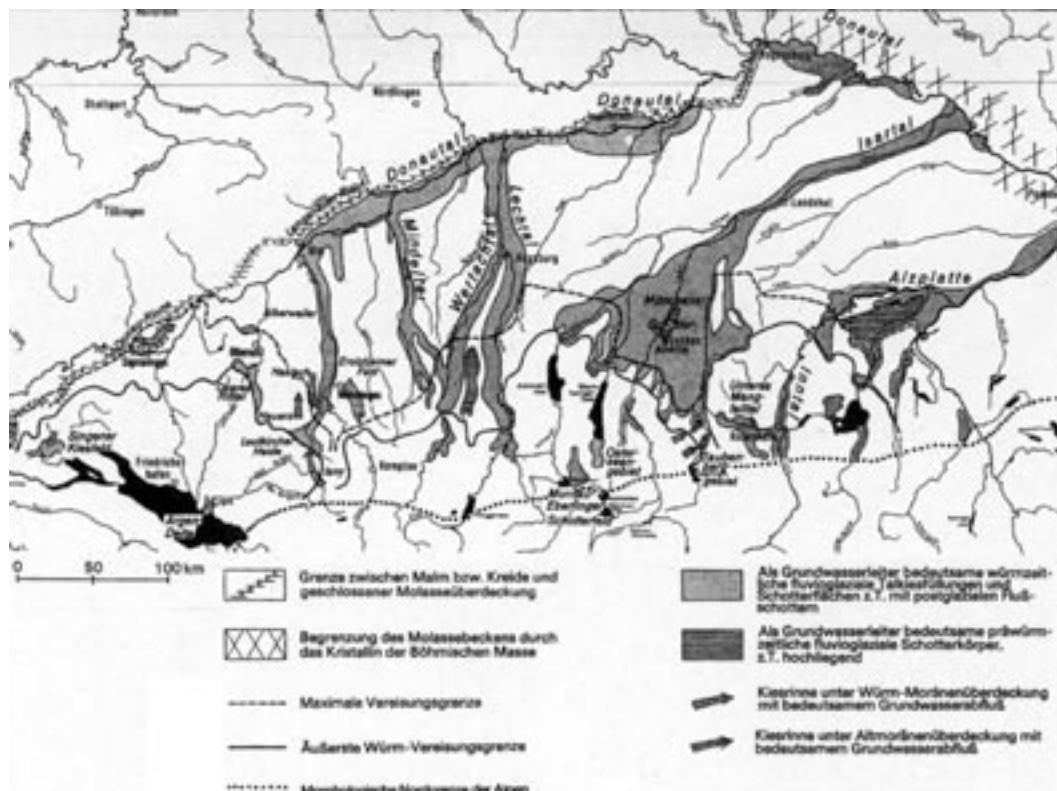


Abb. 5: Die wichtigsten Grundwasservorkommen in den quartären Kiesen des Alpenvorlandes. – Quelle: DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979: 238.

Die Grundwasserneubildung im Alpenvorland ist intraregional wegen der starken Variation der Abflusskomponente und eines starken Niederschlagsgradienten Richtung Südost sehr unterschiedlich. Im Altmoränengebiet finden sich, mit Ausnahme von Alluvien und alten Schottern, geringe Grundwasserneubildungsraten, während sie im Jungmoränengebiet wesentlich höher sind und ganz im Südosten des Alpenvorlands Maximalwerte erreichen (ARMBRUSTER 2002: 114).

3.3 Zusammenfassung

Die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg ist aufgrund der heterogenen naturräumlichen Ausstattung sehr unterschiedlich. Die Werte der Grundwasserneubildung schwanken für den größten Teil Baden-Württembergs in einem Bereich von 50 und 400 mm/a; diese Werte werden nur in extremen Fällen unter- oder überschritten. Der Mittelwert der Grundwasserneubildung beträgt 237mm/a, wobei der bedeutendste alluviale Aquifer Baden-Württembergs, der Oberrheingraben, eine Grundwasserneubildung von 228 mm/a aufweist (Karte 2 im Anhang).

Das räumliche Verteilungsmuster ist stark geprägt von den Haupteinflussfaktoren Niederschlag, Verdunstung und Abfluss. Über den Jahresgang betrachtet finden 75% der Grundwasserneubildung im hydrologischen Winterhalbjahr statt. Im Sommerhalbjahr ist die Grundwasserneubildung wesentlich geringer und kann regional – vor allem bei Flächen mit flurnahem Grundwasser – durch hohe Verdunstungsraten auch negativ sein. Man spricht dann von Grundwasserzehrung (ARMBRUSTER 2002: 118).

Die Auswirkungen dieser räumlichen Ungleichverteilung der Ressource Grundwasser in Baden-Württemberg, vor allem auch unter dem Aspekt des menschlichen Eingriffs in den Grundwasserhaushalt, soll im folgenden Kapitel beleuchtet werden.

4 Grundwassernutzung und Grundwassernutzungsprobleme in Baden-Württemberg

Grund- bzw. Quellwasser ist in Baden-Württemberg die wichtigste Ressource für eine sichere Trinkwasserversorgung. Es hatte 1995 an der öffentlichen Wasserversorgung einen Anteil von 75%, wovon etwa die Hälfte aus den eiszeitlichen Kiesen und Sanden der Rheinebene gewonnen wurde. Die restlichen 25% der öffentlichen Wasserversorgung, das Oberflächenwasser, entstammen zu 80% aus dem Bodensee, gefördert von der Bodensee-Wasserversorgung Sipplingen. Die Bedeutung der Versorgung Baden-Württembergs mit Grundwasser hat seit Beginn der Förderung von Bodenseewasser kontinuierlich nachgelassen: Im Zeitraum von 1970 bis 1995 ging der Anteil von Grundwasser an der öffentlichen Wasserversorgung von 87% auf 75% zurück (STATISTISCHES LANDESAMT 1999: 112, LEHN 1996).

Die jährlich intern erneuerbaren Wasserressourcen in Baden-Württemberg betragen ca. 1100–1400 m³ pro Einwohner und Jahr; durch Zuflüsse aus der Schweiz stehen weitere 3300 m³ pro Einwohner und Jahr zur Verfügung. Von den insgesamt also ca. 4400–4700 m³ pro Einwohner und Jahr werden jährlich weniger als ein Fünftel durch öffentliche Wasserversorgung, Industrie und Energiewirtschaft gefördert (LEHN 1996). Demzufolge könnte man, auf das gesamte Bundesland bezogen, von einer nachhaltigen Nutzung sprechen. Ob diese Aussage zutrifft, soll in den folgenden Kapiteln überprüft werden.

4.1 Regionale Disparitäten in Förderung und Nutzung des Grundwassers

Die Inhomogenitäten der naturräumlichen Ausstattung Baden-Württembergs bedingen auch eine inhomogene Verteilung der Grundwasservorkommen. Während die Porengrundwasserleiter aus eiszeitlichen Kiesen und Sanden im Rhein-, Iller- und Donautal „Wasserüberschussregionen“ darstellen, gibt es in Baden-Württemberg auch eine Reihe von „Wassermangelgebieten“: der Mittlere Neckarraum und Nordost-Württemberg, aber auch die Hochflächen der Schwäbische Alb und Teile des Schwarzwalds. Die Schwäbische Alb ist trotz hoher Niederschläge oberflächlich ein Wassermangelgebiet, da dort das Wasser rasch in den Tiefen des Karstuntergrunds versickert. Ähnliches gilt für den Westteil des Schwarzwalds: Die dort anstehenden Kristallingesteine können die hohen Niederschläge nur schlecht speichern; es kommt zu einem starken Direktabfluss.

Da die räumliche Verteilung der Grundwasserreservoirs bei weitem nicht der räumlichen Verteilung des Bedarfs entspricht, wurde bereits im Jahre 1912 die Fernwasserversorgung Baden-Württemberg etabliert, um dieser Ungleichverteilung entgegenzuwirken und die Ballungsräume mit Trinkwasser zu versorgen (GEILER 1996, LANDESWASSERVERSORGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 2003: 53).

Die Tatsache, dass sich heute viele Regionen Baden-Württembergs nicht selbst mit ausreichenden Mengen an Trinkwasser versorgen können – die größten Ballungsräume Baden-Württembergs haben nur eine sehr geringe Eigenversorgungsquote (Tab. 1) – ist aber nicht

Tabelle 1: Wassergewinnung der öffentlichen Wasserversorgung in Baden-Württemberg 1995. – Quelle: STATISTISCHES LANDESAMT 1999: 112.

Höchste Wassergewinnung in 1000 m ³		Geringste Wassergewinnung in 1000 m ³	
1. Bodenseekreis	144 878	44. Stadtkreis Stuttgart	1 501
2. Landkreis Heidenheim	49 728	43. Stadtkreis Pforzheim	1 796
3. Alb-Donau-Kreis	48 979	42. Stadtkreis Freiburg	2 445
4. Rhein-Neckar-Kreis	37 608	41. Landkreis Böblingen	3 527
5. Landkreis Karlsruhe	24 232	40. Stadtkreis Heilbronn	3 728

nur durch geogene Ursachen, wie einer zu hohen Wasserhärte oder einer Mineralisierung des Grundwassers begründet, sondern auch auf anthropogene Ursachen zurückzuführen: Durch jahrzehntelange Kontamination der Grundwasserressourcen ist deren Nutzung in vielen Bereichen nur noch sehr begrenzt möglich oder mit einem hohen Aufbereitungsaufwand verbunden. Diese Problematik wird zusätzlich durch das „verlockende“ Angebot der Fernwasserversorgung verschärft: Sie dient heutzutage immer weniger zur Ergänzung der lokal vorhandenen Wasserressourcen, sondern ersetzt diese. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Nutzung des Fernwassers im Verhältnis zur Neuerschließung lokaler Ressourcen einen geringeren Aufwand darstellt. Darüber hinaus würden die einzurichtenden Wasserschutzgebiete eine Restriktion für die Industrie und das Gewerbe vor Ort bedeuten. Das erklärt auch den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Rückgang des Grundwasseranteils an der Trinkwasserversorgung von 87% (1970) auf 75% (1995) (LEHN 1996, GEILER 1996).

Die räumliche Trennung der größten Grundwasserreservoirs und der größten Grundwasseranverbraucher Baden-Württembergs hat aus den oben genannten Gründen schon zu Unstimmigkeiten zwischen den Förderregionen und den „parasitären“ Ballungsräumen geführt – es gab in der jüngeren Vergangenheit mehrfach inter- und intraregionale Auseinandersetzungen um die Nutzung der Wasserressourcen (GEILER 1996).

4.2 Grundwasserqualität und Grundwassergefährdungspotenziale

Wie bereits im Kapitel 3 beschrieben, schwankt die Qualität des Grundwassers in Baden-Württemberg aufgrund geogener Einflüsse in Abhängigkeit von den Eigenschaften des jeweiligen Aquifers. So ist das Wasser aus dem Gipskeuper und dem Mittleren Keuper aufgrund der hohen Härte häufig nicht als Trinkwasser nutzbar. Aber auch anthropogene Aktivitäten haben negative Auswirkungen auf die Qualität des Grundwassers. So mussten in Baden-Württemberg im Zeitraum von 1980 bis 1992 fast 400 Brunnen aufgrund qualitativer Beeinträchtigungen geschlossen werden (LEHN 1996). Die Beeinträchtigungen können unterteilt werden zum einen in punktuelle Verunreinigungen, verursacht z. B. durch unsachgemäße Lagerung, Altlasten und Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen, zum anderen in flächenhafte Beeinträchtigungen durch die in der Landwirtschaft eingesetzten Dünge- und Pflanzenschutzmittel, durch undichte Kanalisationen, aber auch durch atmogene Stoffeinträge vor allem in Wäldern. Da 48% der Landesfläche mit landwirtschaftlichen Kulturen bedeckt sind und die Grundwasserneubildung überwiegend unter landwirtschaftlich oder forstwirtschaftlich genutzten Flächen stattfindet, von denen wegen der niedrigeren Interzeption das Ackerland eine höhere Grundwasserneubildungsrate besitzt, ist die Landwirtschaft in besonderem Maße für die Grundwasserqualität

mitverantwortlich. Im Folgenden soll auf einzelne ausgewählte Grundwassergefährdungspotenziale eingegangen werden.

4.2.1 Nitrat

Im Jahr 2001 wurde in Baden-Württemberg bei Untersuchungen zur Nitratbelastung des Grundwassers der Warnwert des Grundwasserüberwachungsprogramms (40 mg/l) in 17,3% der Fälle, der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (50 mg/l) in 10% der Fälle überschritten. Nitratbelastungsschwerpunkte in Baden-Württemberg sind vor allem der Rhein-Neckar-Kreis, der Neckarraum zwischen Stuttgart und Heilbronn und der Main-Tauber-Kreis, das Markgräfler Land und die Region Oberschwaben (Karte 3 im Anhang) (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 2002: 3 iff.).

Nitratbelastungen des Grundwassers lassen sich im Normalfall auf eine der beiden folgenden Ursachen zurückführen: zum einen auf die Nitratauswaschung aus landwirtschaftlichen Flächen, zum anderen auf den Stickstoffeintrag aus der Luft. Während der direkte Eintrag durch Auswaschung aus Agrarflächen einen rückläufigen Trend aufweist, stieg der flächendeckende, atmogene Eintrag von Nitrat- und Ammoniumstickstoff in den letzten Jahren kontinuierlich an. Die Quellen des atmogenen Eintrags sind vorrangig Emissionen von Ammoniak aus Jauche und Mist, aus Kläranlagen und Mülldeponien sowie die bei sämtlichen Verbrennungsvorgängen entstehenden Stickoxide. Sie werden im Boden durch Mikroorganismen zu Ammonium und Nitrat umgewandelt.

Als eine Art Puffer gegen den atmogenen Stickstoffeintrag dienen die Wälder; sie können den Stickstoff in ihre organische Substanz einbauen. Während jedoch ein normaler europäischer Wirtschaftswald bei optimalen Bedingungen 5–12 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr in organische Substanz einbauen kann, liegen die momentanen Depositionswerte in Baden-Württemberg zwischen 8,5 und 50 kg/ha und Jahr. Werte unter 15 kg/ha und Jahr finden sich nur noch an der Ostabdachung des Schwarzwaldes. Daraus lässt sich folgern, dass die Forste in Baden-Württemberg mit Stickstoff schon nahezu gesättigt oder bereits ganz gesättigt sein dürften und auch in Zukunft ein weiterer Anstieg des Nitratgehalts im unter Waldflächen gebildeten Grundwasser zu erwarten ist. Dies ist insbesondere dann als kritisch zu betrachten, wenn man bedenkt, dass in der Vergangenheit häufig das unter Wäldern gebildete Grundwasser dazu verwendet wurde, das durch die Landwirtschaft mit Nitrat belastete Grundwasser zu „verdünnen“ (LEHN 1996).

4.2.2 Pflanzenbehandlungsmittel

Obwohl von den im Grundwasser nachgewiesenen Pflanzenbehandlungsmitteln nach Expertenmeinung keine akute gesundheitliche Gefährdung ausgeht, wird aus Gründen der gesundheitlichen Vorsorge ihr Vorkommen im von der Wasserversorgung genutzten Grundwasser abgelehnt. Besonderes Interesse gilt aufgrund ihrer Langlebigkeit im Untergrund den Herbiziden der Stoffgruppe der Triazine, darunter das hauptsächlich im Maisanbau verwandte Atrazin und sein Abbauprodukt Desethylatrazin. In Baden-Württemberg wurden 1994 die Warnwerte der Landesanstalt für Umweltschutz für Atrazin in 2,2%, für Desethylatrazin in 7,2% der untersuchten Fälle überschritten (LEHN 1996).

Bereits im Jahr 1991 erfolgte ein Verbot des Breitbandherbizids Atrazin. Bei Untersuchungen des Grundwassers der Schwäbischen Alb im Landkreis Reutlingen in den Jahren 1998 und 1999 konnten Atrazin und seine Abbauprodukte an mehreren Stellen immer noch in größeren

Mengen im Grundwasser nachgewiesen werden. Dies ist insofern erstaunlich, da man aufgrund der schnellen Stoffumsätze im klüftigen und verkarsiteten Malm eine schnelle Auswaschung dieser Stoffe nach dem Verbot der Ausbringung erwarten würde. Bei genauerer Betrachtung der Untersuchung wird aber deutlich, dass sich die untersuchten Trinkwasserfassungen in zwei Gruppen unterteilen lassen: die Trinkwasserfassungen, die vorwiegend aus dem Seichten Karst gespeist werden, bilden die erste Gruppe – hier lagen keine messbaren Pes-



Abb. 6: Räumliche Verteilung der Pflanzenschutzmittelgehalte im Untersuchungsgebiet von BAUER.

Quelle: BAUER 2002: 170.

tizidbelastungen mehr vor. Südlich der Karstgrundwasserscheide Rhein/Donau findet sich die zweite Gruppe von Trinkwasserfassungen; diese werden aus dem Tiefen Karst gespeist. Das in diesen Fassungen untersuchte Grundwasser ist immer noch in nennenswertem Umfang belastet, allerdings lässt sich hier ein Gradient weg von der Karstgrundwasserscheide erkennen: Bei den nahe an der Karstgrundwasserscheide befindlichen Fassungen ließ sich im Zeitraum von 1991 bis 1999 ein rückläufiger Trend beobachten. Im Gegensatz dazu lassen sich in den am weitesten von der Karstgrundwasserscheide entfernten Trinkwasserfassungen Atrazin und seine Abbauprodukte seit 1987 mit nahezu unveränderten Werten nachweisen. Diese Untersuchungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass die mittlere Verweilzeit des Grundwassers im Tiefen Karst abhängig von der Entfernung von der Karstgrundwasserscheide zehn oder mehr Jahre betragen und jedwede Verschmutzung des Grundwassers des Tiefen Karsts noch lange nachwirken kann (Abb. 6)(BAUER et al. 2002).

Im Jahr 2001, also zehn Jahre nach seinem Verbot, lag die Grenzwertüberschreitungsquote für Atrazin nach Messungen der Landesanstalt für Umweltschutz landesweit immer noch bei 1,5%, bei Desethylatrazin bei 3,6% (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 2002: 42ff.). Von „modernen“ Pflanzenschutzmitteln wie Phospinotrizin geht nach Expertenmeinung aufgrund ihrer geringen Mobilität im Untergrund und der Tatsache, dass sie meist rasch von Bodenmikroben abgebaut werden, keine Grundwassergefährdung aus (LEHN 1996).

Eine nicht zu vernachlässigende Herbizidquelle sind, neben der landwirtschaftlichen Verwendung, die Gleisfreihaltungsmaßnahmen der Deutschen Bahn AG: In Baden-Württemberg überschritten im Jahr 1994 32% der untersuchten Wasserproben in der Nähe von Bahnanlagen den in der Trinkwasserverordnung festgelegten Grenzwert für Pflanzenbehandlungsmittel (LEHN 1996). Bedenklich ist vor allem, dass die Ausbringung von Herbiziden wie Diuron, Bromacil und Hexazinon zur Freihaltung des Gleisbetts von Vegetation durch die Deutsche Bahn AG ohne Rücksicht auf nahe liegende Wasser-, Landschafts- und Naturschutzgebiete erfolgt.

4.2.3 Gesteinsabbau und Baggerseen

Durch den Gesteinsabbau in Steinbrüchen oder Kiesgruben werden der Boden und eventuell auch weitere, ebenfalls filtrierende Deckschichten abgetragen. Dadurch fehlt an diesen Stellen die in Kapitel 2.3 beschriebene Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung gegenüber dem Eintrag staubförmiger oder im Niederschlag gelöster Schadstoffe. Das im Abbaugelände abfließende Niederschlagswasser wird durch Abschwemmung von feinkörnigem Substrat verunreinigt und zum Teil auch mikrobiologisch belastet. Dieser verunreinigte Oberflächenabfluss

kann, bei den entsprechenden geologischen Voraussetzungen, durch Klüfte oder Karsthohlräume rasch und unfiltriert in das Grundwasser gelangen. Durch die Lockerung des anstehenden Gesteins und dessen Abtransport ist es auch möglich, dass direkte Einträge von Gesteinsmehl und tonig-schluffig-sandigen Kluffüllungen das Grundwasser verschmutzen. Zusätzlich besteht in den Steinbrüchen auch eine Gefährdung des Grundwassers durch den Abbaubetrieb selbst: durch Schmieröl- und Treibstoffverluste der Abbaugeräte, durch Betriebsanlagen, durch unsachgemäße Kraftstofflagerung und starken Kraftfahrzeugverkehr. Aber auch bei der nach Beendigung des Abbaubetriebs heute häufigen Wiederauffüllung und Rekultivierung der Steinbrüche und Kiesgruben droht eine Verschmutzung des Grundwassers: Bei der Wiederauffüllung von Steinbrüchen kann das Füllmaterial anthropogen belastet sein. Aber auch anthropogen unbelastetes Material stellt eine Gefahrenquelle dar – stark sulfatgesteins- oder pyrithaltiger Baugrubenaushub führt zu Aufhärtungen und Schwermetallbelastungen des Grundwassers. Die bei der Auflassung von Kiesgruben häufig entstehenden Baggerseen können ebenso eine Bedrohung für das Grundwasser darstellen: Hier findet einerseits durch Niederschläge ein direkter Eintrag von Schadstoffen ins Grundwasser statt, andererseits können atmogene Staubeinträge über die große Wasserfläche eines Baggersees mehr oder weniger ungefiltert ins Grundwasser gelangen (SCHLOZ 1991).

4.2.4 Grundwasserversauerung

Das Phänomen der Grundwasserversauerung steht in engem Zusammenhang mit der Bodenversauerung. Da die Böden die Schnittstelle zwischen atmogenem Säureeintrag und dem Grundwasser darstellen, hat der Grad ihrer Durchlässigkeit und Basenversorgung einen direkten Einfluss auf die Weitergabe von Säure an das Grundwasser. Bei kalkhaltigen Böden kann das saure Niederschlagswasser durch bodeninterne Pufferprozesse neutralisiert werden. Bei kalkfreien Böden findet eine Neutralisation jedoch nur in einem wesentlich geringeren Umfang durch die Silikat- und Austauscherpuffer statt. In diesem Fall unterscheidet sich das tiefere Bodenwasser in seinem Chemismus nur geringfügig vom Niederschlagswasser, und es kann zu einem Säureeintrag in das Grundwasser kommen. Zusätzlich kommt es durch den niedrigen pH-Wert des Bodenwassers zur Mobilisierung der im Boden gebundenen geogenen und anthropogenen Spurenmetalle, die dem Grundwasser zugeführt werden und dieses beeinträchtigen (LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 1998a: 11 ff.).

Auch die Ausbildung von periglazialen Deckschichten spielt bei der Grundwasserversauerung eine große Rolle: Zum einen dienen sie als hydraulischer Zwischenspeicher, zum anderen können sie die chemische Pufferung verstärken. Lössauflagen erhöhen die Basenversorgung der

Bodenzone, sofern sie noch nicht völlig entkalkt und verlehmt sind. Ein erhöhter Tongehalt des Bodens verstärkt die Kationenaustauschkapazität und vermindert die Durchlässigkeit.

Da die Bodeneigenschaften wiederum stark mit den Eigenschaften des anstehenden Gesteins verknüpft sind, ist die Versauerungsanfälligkeit einer Region auch stark von der Geologie abhängig. Anhand der Charakteristika des anstehenden Gesteins lassen sich in Baden-Württemberg nach der LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1998a: 48ff.) vier Gruppen der Versauerungsempfindlichkeit unterscheiden:

- *Karbonate und karbonatreiche Grundwasserleiter:* Hier kann eine Versauerung ausgeschlossen werden. Dies betrifft unter anderem die jungquartären eiszeitlichen Schotter des Alpenvorlands, die tertiäre Molasse am Albsüdrand und im Alpenvorland, die quartären eiszeitlichen Schotter der Oberrheinebene, die Aquifere des Jura (mit Ausnahme einiger Sandsteinlagen des Lias und Dogger), den Muschelkalk und den Keuper mit Ausnahme von Rät-, Schilf- und Stubensandstein.
- *Gering karbonathaltige Gesteine und leicht verwitterbare Silikatgesteine:* Hier kann lokal eine Versauerung auftreten; eine akute Gefährdung durch die Versauerungsprozesse ist jedoch nicht zu erwarten. Dies trifft unter anderem für kalkgeröllarme quartäre Kiese und Sande, tertiäre Basalte und Tuffe (Kaiserstuhl, Hegau, Kraichgau, Odenwald), die Sandsteine des Lias und Dogger und die Sandsteine des Keuper zu.
- *Karbonatarme Gesteine mit schlecht verwitterbaren Silikaten:* Die Gefahr einer Grundwasserversauerung ist hier grundsätzlich vorhanden, bisher aber noch nicht eingetreten. Bei anhaltend hoher Säuredeposition ist eine Verschlechterung der Situation in Zukunft wahrscheinlich. Zu dieser Gruppe gehören der Obere und Untere Buntsandstein bei karbonatischer Bindung und das Rotliegende.
- *Weitgehend karbonatfreie und basenarme Silikatgesteine:* Hier ist das Grundwasser stark gefährdet; zum Teil ist bereits eine Versauerung eingetreten. Zu dieser Gruppe gehören die kalkfreien bzw. entkalkten quartären Kiese und Sande, der Rätsandstein, der Buntsandstein und das Kristallin von Schwarzwald und Odenwald.

4.2.5 Weitere Grundwassergefährdungspotenziale

Die bisher genannten Grundwassergefährdungspotenziale stellen selbstverständlich nur eine Auswahl dar. Neben den bereits genannten gibt es noch weitere Gefahrenquellen, auf die hier abschließend nur kurz eingegangen wird:

- *Mülldeponien*: Diese können das Grundwasser dann bedrohen, wenn die Abdichtung am Sohlbereich der Deponie schadhaft ist und belastetes Sickerwasser ins Grundwasser gelangen kann.
- *Kanalisation*: Undichte Kanalisation kann aus zweierlei Gründen eine Bedrohung für das Grundwasser sein: Zum einen kann Abwasser in den Untergrund versickern und das Grundwasser nachhaltig verschmutzen, zum anderen kann auf dem umgekehrten Weg Grundwasser in die Kanalisation eindringen; sie fungiert dann als ungewünschte Drainage.
- *Versiegelung*: Täglich werden in Baden-Württemberg 12 ha freie Fläche befestigt. Der Grad dieser Oberflächenversiegelung hat einen direkten Einfluss auf die Grundwasserneubildung, da sie nur dann möglich ist, wenn die Niederschläge im Boden versickern können. Bei versiegelten Oberflächen ist das nicht möglich, das Niederschlagswasser wird durch die Kanalisation direkt in Oberflächengewässer gespeist. Neben der Beeinträchtigung der Quantität der Grundwasserneubildung hat die Versiegelung auch noch negative Auswirkungen auf die Qualität des Grundwassers. Durch oberflächlichen Abfluss auf Verkehrsflächen – diese stellen einen großen Teil der in Siedlungsräumen versiegelten Oberflächen dar – werden die dort im Feinmaterial (Straßenstaub, Reifenabrieb) befindlichen Schadstoffe abgespült und können so (vor allem bei mangelhafter Kanalisation) über den Boden in das Grundwasser gelangen.

5 Zusammenfassung

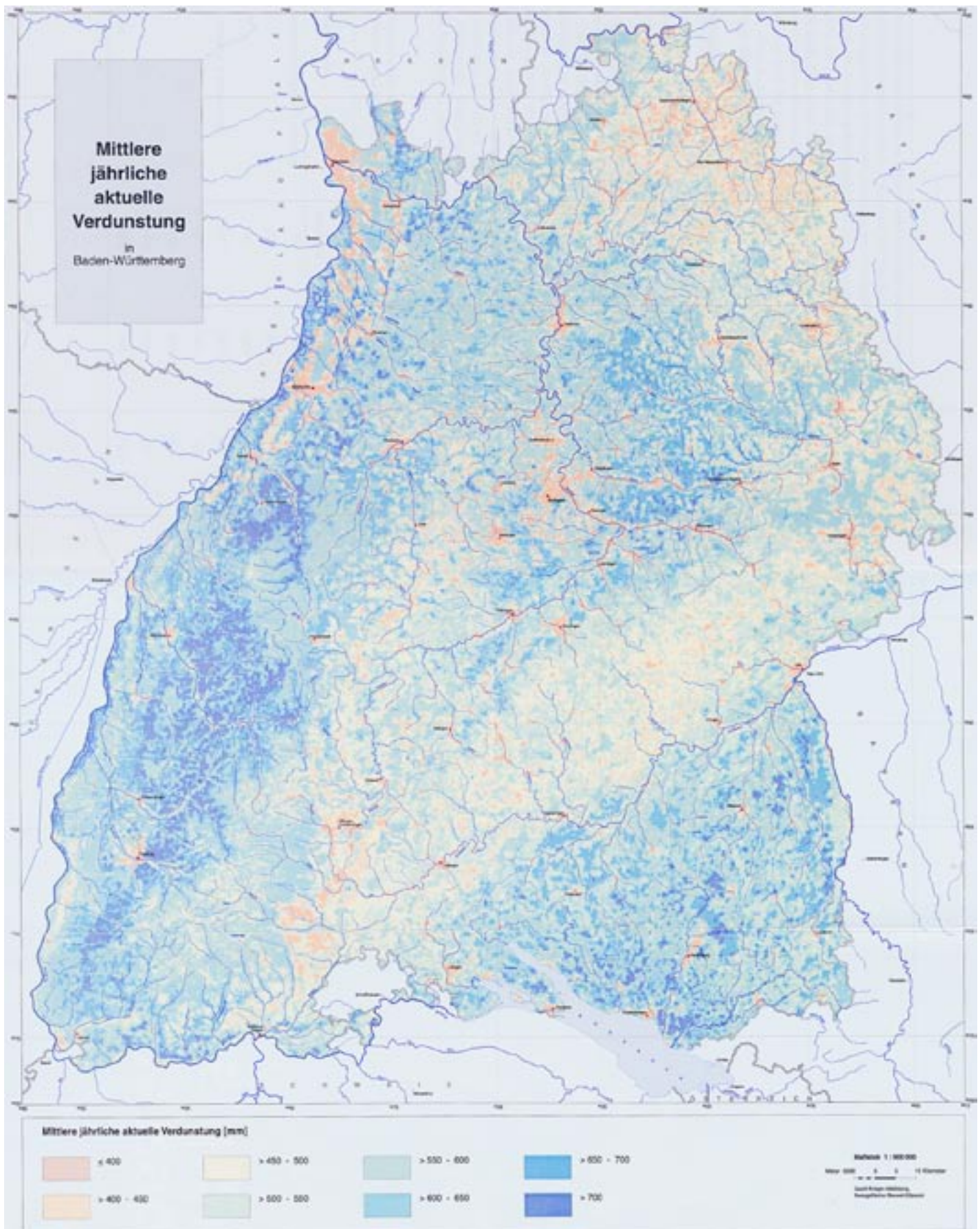
Wie im Abschnitt „Regionale Differenzierung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg“ dieser Arbeit dargestellt wurde, ist das Grundwasserneubildungspotenzial sehr ungleichmäßig verteilt. Großen Grundwasserüberschussregionen stehen ebenso große Grundwassermangelgebiete gegenüber. Da die Verteilung des Angebots an nutzbarem Wasser in Baden-Württemberg geradezu konträr zur Verteilung der Nachfrage ist, sind aufwändige technische Maßnahmen notwendig, um eine Versorgung der Bevölkerung und eine Befriedigung der industriellen und gewerblichen Nachfrage zu sichern. Betrachtet man nun die zahlreichen, im Kapitel „Grundwassernutzung und Grundwassernutzungsprobleme in Baden-Württemberg“ beschriebenen Gefahrenquellen und die hohe Sensibilität des Grundwassers auf viele menschliche Aktivitäten, so muss deutlich werden, dass ein schonender Umgang mit der Ressource Grundwasser notwendig ist. Diese ist zwar grundsätzlich mengenmäßig erneuerbar, wichtig ist aber vor allem eine Sicherung der Qualität, damit auch zukünftige Generationen noch vom Wasserreichtum Baden-Württembergs profitieren können.

6 Bibliographie

- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, 17: 141 S.; Freiburg i. Br.
- BAUER, M., SELG, M & L. EICHINGER (2002): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasserleiter des Oberjuras in Baden-Württemberg. – In: STORCH, H.D. [Hrsg.]: Hydrogeologische Untersuchungen in Baden-Württemberg. – 330 S.; Freiburg i. Br.
- BIBUS, E. (1986): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenprofil, Standort und junge Reliefentwicklung im Schönbuch bei Tübingen. – In: EINSELE, G. [Hrsg.](1986): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch. – Weinheim.
- BORCHERDT, C. (Hrsg.)(1993): Geographische Landeskunde von Baden-Württemberg. – 3. Aufl., 408 S.; Stuttgart.
- DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (1979): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Textband. – 365 S.; Boppard am Rhein.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. [Hrsg.] (1996): Wasserwesen. Begriffe, Normen. – 400 S.; Berlin.
- GEILER, N. (1996): Notwendigkeit von Wassersparmaßnahmen in Baden-Württemberg – ökologische und ökonomische Aspekte. – In: LEHN, H. [Hrsg.]: Wasser – die elementare Ressource: Materialienband. – 243 S.; Stuttgart.
- HÖLTING, B. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. – 65 S.; Stuttgart.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1998a): Grundwasserversauerung in Baden-Württemberg. – 210 S.; Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1998b): Grundwasserüberwachungsprogramm. Ergebnisse der Beprobung 1997. – 75 S.; Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2002): Grundwasserüberwachungsprogramm. Ergebnisse der Beprobung 2001. – 142 S.; Karlsruhe.
- LANDESWASSERVERSORGUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (2003): Erlebniswelt Grundwasser. Eine Reise zum Ursprung unseres Trinkwassers. – http://www.lw-online.de/downloaddateien/broschueren/Erlebniswelt_Grundwasser.pdf (28.01.2005).
- LEHN, H. (1996): Zum nachhaltigen Umgang mit der erneuerbaren Ressource Wasser in Baden-Württemberg – eine Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse. – In: Lehn, H [Hrsg.]: Wasser – die elementare Ressource: Materialienband. – 243 S.; Stuttgart.
- MATTHES, G. & K. UBELL (2003): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 1 – Allgemeine Hydrologie. Grundwasserhaushalt. – 2. Aufl., 574 S.; Berlin, Stuttgart.

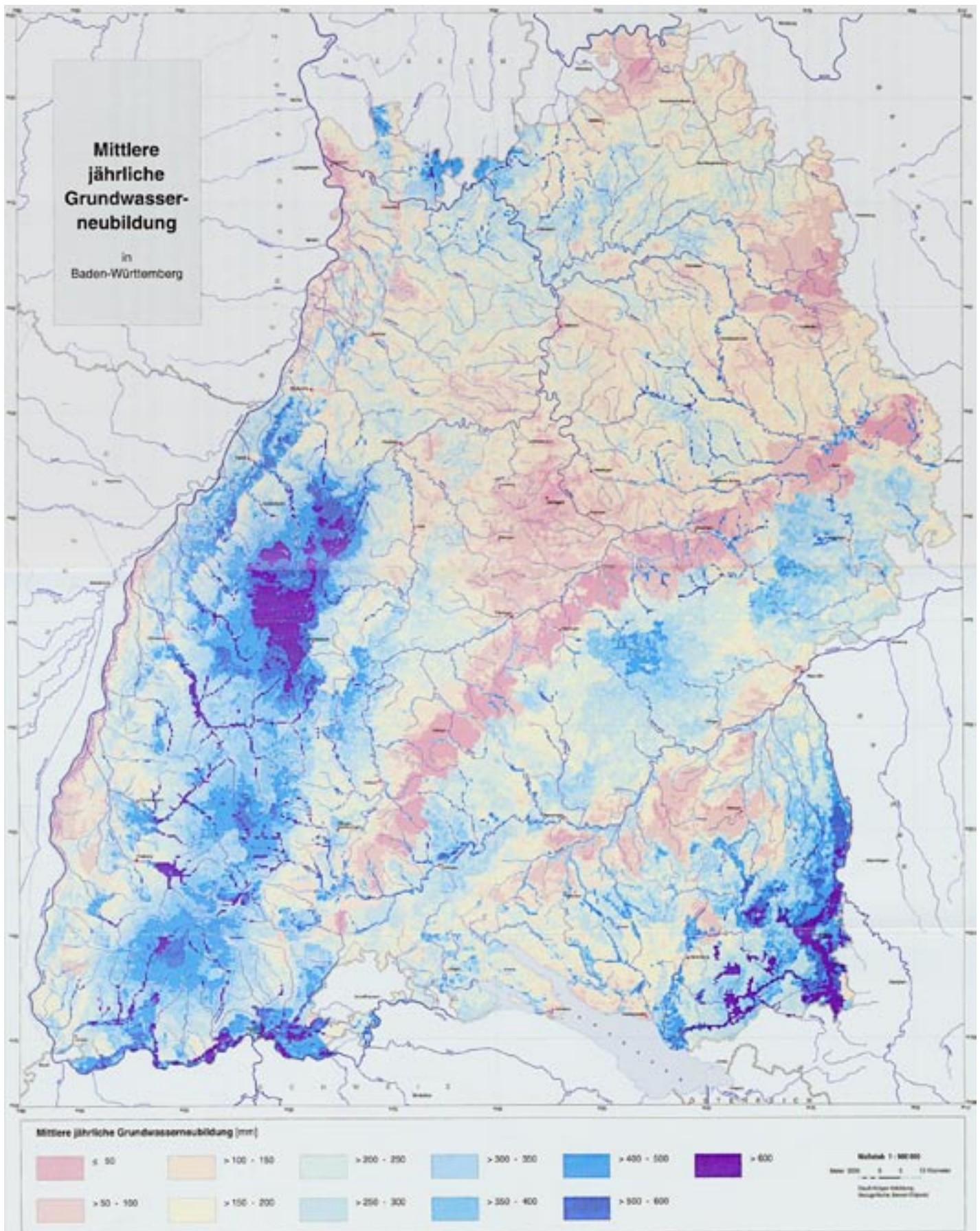
- NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG (o.J.): Grundwasserneubildung aus Niederschlag. –
http://www.nlfb.de/grundwasser/anwendungsgebiete/gw_neubild_bild.htm
(29.01.2005).
- SCHLOZ, W. (1991): Festgesteinsabbau und Grundwasserschutz. – In: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg [Hrsg.]: Informationen **2/91**: 31 S.; Freiburg i. Br.
- SCHNIERTSHAUER, P. (1992): Zur jungquartären Formungsdynamik an der Keuperstufe zwischen Entringen und Tübingen sowie im angrenzenden Schönbuch. – 108 S.; Dipl. Arb. Univ. Tübingen; (unveröff.).
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1999): Baden-Württemberg 2000. Der neue Atlas für das ganze Land. – 282 S.; Stuttgart.

7 Anhang



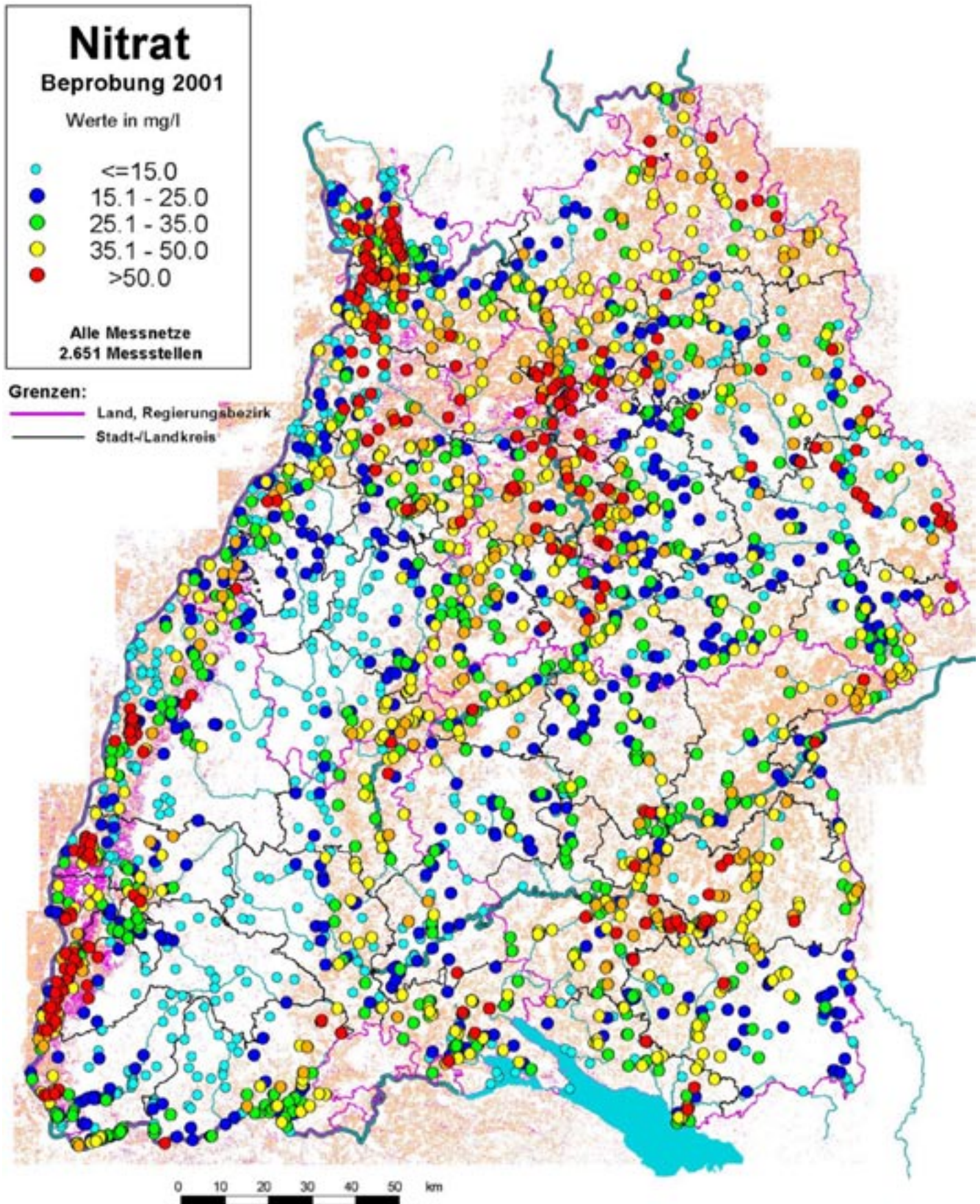
Karte 1: Mittlere jährliche aktuelle Verdunstung in Baden-Württemberg.

Quelle: ARMBRUSTER 2002: 66.



Karte 2: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg.

Quelle: ARMBRUSTER 2002: 113.



Karte 3: Nitratgehalte 2001.

Quelle: LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG 2002: 32.