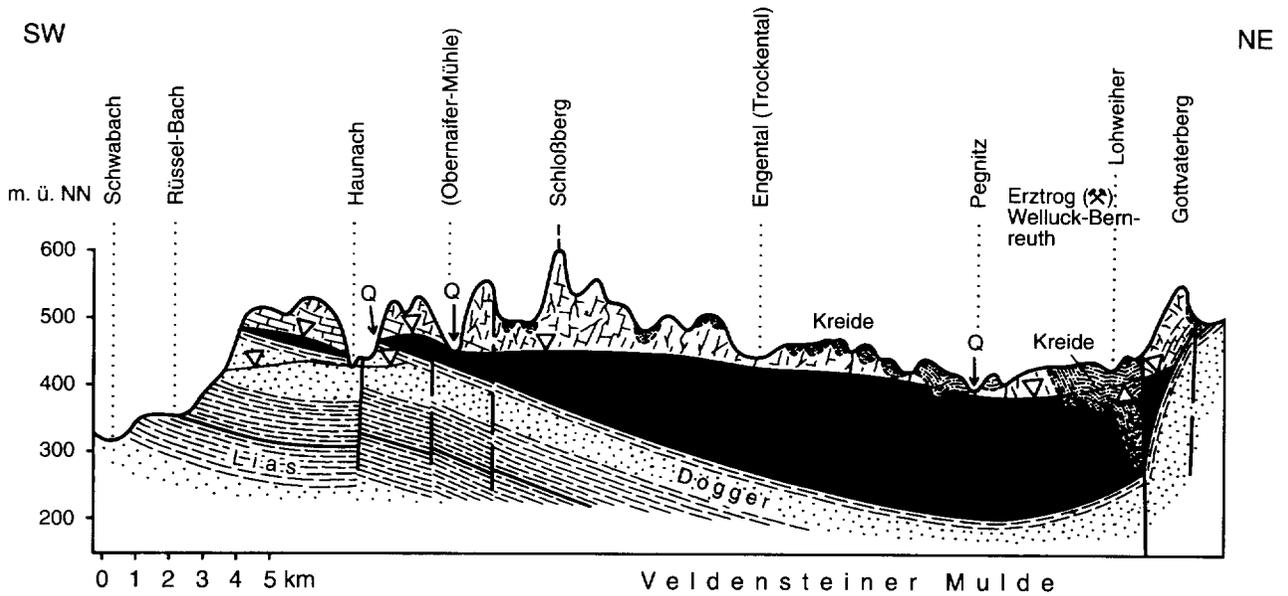


NÖRDLICHE FRANKENALB

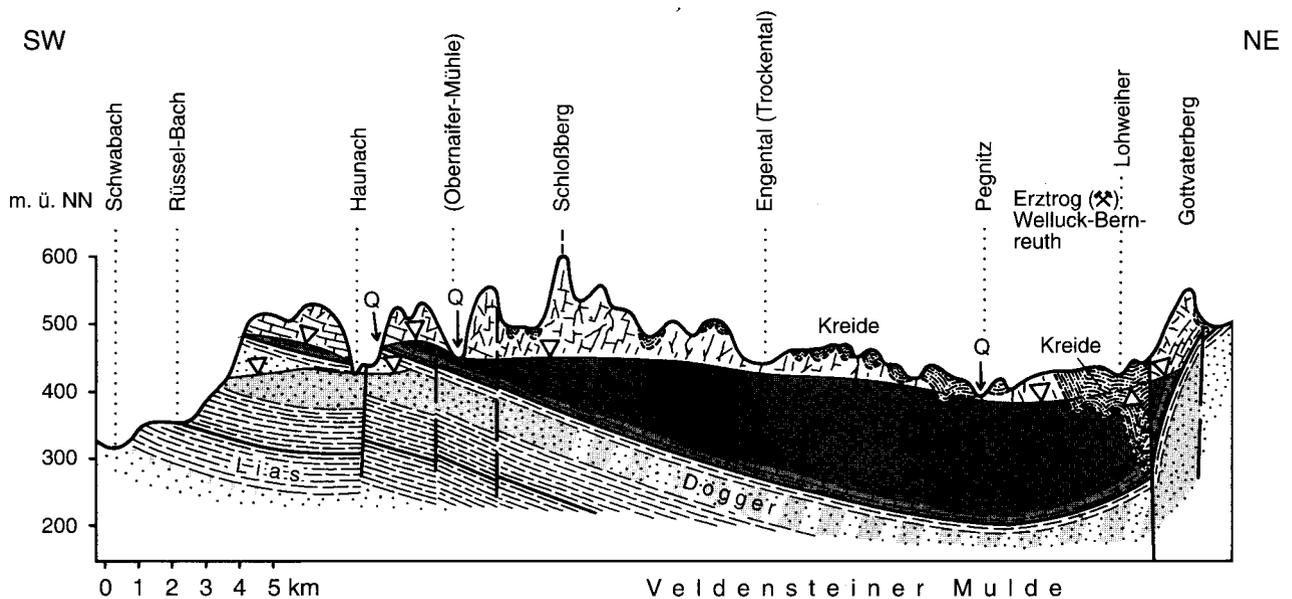
Hydrogeologie



Bayerisches Geologisches Landesamt

NÖRDLICHE FRANKENALB

Hydrogeologie



Bayerisches Geologisches Landesamt

Bayerisches Geologisches Landesamt

München 1995

Nördliche Frankenalb Hydrogeologie	119 S.	30 Abb.	16 Tab.
---------------------------------------	--------	---------	---------

VORWORT

Die vorliegende Veröffentlichung des Bayerischen Geologischen Landesamtes ist eine hydrogeologische Grundlagenuntersuchung, die im Zusammenhang mit der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung entstanden ist. Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes gehört zum Einzugsgebiet des Mains, insbesondere dem Einzugsgebiet der Regnitz. Der östliche Rand des Untersuchungsgebietes entwässert in die Vils, die zum Einzugsgebiet der Donau gehört.

Die Hydrogeologie des gesamten Gebietes der Nördlichen Frankenalb war als Einheit zu behandeln. Das Geologische Landesamt wurde vom Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen mit der Bearbeitung beauftragt.

Die Untersuchungen hatten u.a. das Ziel zu prüfen, ob neben den bisher genutzten und erkundeten Grundwasservorräten weitere Grundwasserreserven vorkommen. Dabei hat sich gezeigt, daß insbesondere der Malmkarst, einschließlich der Vilsecker - Kreidemulde größere Grundwassergebiete sind. Die Arbeit gibt darüber hinaus Auskunft über die hydrochemische Beurteilung des Grundwassers und gibt einen Überblick, inwieweit einzelne Grundwasserleiter als gefährdet anzusehen sind. So wird z. B. festgestellt, daß der Malmkarst gering anthropogen belastet ist und die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung nur in den seltensten Fällen überschritten werden.

Bekanntlich sind die Erschließbarkeit und Schützbarkeit von Karstwasservorkommen für die Trinkwasserversorgung schwierig, so daß die ermittelten Grundwasserreserven unter dem Vorbehalt stehen, daß an den vom Geologischen Landesamt vorgeschlagenen Standorten erst noch Erkundungen durchgeführt werden müssen.

Die Ergebnisse der vom Geologischen Landesamt durchgeführten Grundlagenuntersuchung sollen mit der vorliegenden Veröffentlichung und ihrem umfangreichen Kartenmaterial allen interessierten Stellen zugänglich gemacht werden.

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM
FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN
MÜNCHEN, 1995

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Geologisch-geomorphologischer Überblick	9
2.1	Geologische Übersicht	10
2.1.1	Beschreibung der Gesteine	10
2.1.2	Lagerungsverhältnisse	10
2.2	Geomorphologischer Überblick	12
3	Geologisch-hydrogeologische Beschreibung der Grundwasserleiter	15
3.1	Mesozoikum	15
3.1.1	Jura	15
3.1.1.1	Lias	16
3.1.1.2	Dogger	17
3.1.1.3	Malm	18
3.1.2	Kreide	25
3.2	Känozoikum	26
3.2.1	Tertiär	26
3.2.1.1	Basaltintrusionen	26
3.2.1.2	Verwitterungsbildungen	27
3.2.2	Quartär	27
4	Spezielle Untersuchungen im Malm-Grundwasserleiter	29
4.1	Geologische Bearbeitungen	29
4.1.1	Erstellung der geologischen Strukturkarte "Dogger/Malm-Grenze"	29
4.1.2	Tektonische Detailuntersuchungen	29
4.1.2.1	Kluftmessungen	31
4.1.2.2	Auswertung von Talrichtungen	31

4.1.2.3	Auswertung von Luftbildern	32
4.1.2.4	Kluftweiten-Messungen	32
4.2	Hydrogeologische und hydrologische Bearbeitungen	33
4.2.1	Hydrologische Grundkarte	33
4.2.1.1	Klassifizierte Ausweisung von Infiltrations- und Exfiltrations- strecken	34
4.2.1.2	Klassifizierung der Quellschüttungen bzw. Fördermengen der Brunnen	36
4.2.2	Karstwassermarkierungsversuche	37
4.2.2.1	Grundlagen	37
4.2.2.2	Ergebnisse	41
4.2.3	Generalisierte Grundwasserhöhengleichenkarte	45
4.2.4	Darstellung der Grundwassermächtigkeit im Malmkarst- Grundwasserstockwerk	47
4.2.5	Abgrenzung von Tiefem Karst und Seichtem Karst sowie den überdeckten Flächen	47
4.2.5.1	Abgrenzung von Tiefem und Seichtem Karst	47
4.2.5.2	Ausweisung und Klassifizierung kreideüberdeckter Flächen	48
4.2.5.3	Verschneidung Seichter Karst/Tiefer Karst und Art der Kreide- überdeckung	48
4.2.5.4	Klassifizierung der Gesamtüberdeckung	48
4.2.5.5	Ergebnisse	48
5	Hydrogeochemische Beurteilung der Grundwässer	51
5.1	Rhätolias und Lias	51
5.2	Dogger	53
5.3	Malm	55
5.3.1	Klassifizierung der Wässer aus dem Malm	55
5.3.2	Beschreibung der hydrochemischen Karten	57
5.3.2.1	Sulfatgehalte im Karstwasser	57
5.3.2.2	Chloridgehalte im Karstwasser	58
5.3.2.3	Nitratgehalte im Karstwasser	58
5.3.2.4	Phosphatgehalte im Karstwasser	59
5.3.2.5	Kaliumpermanganat-Verbrauch im Karstwasser	59

5.3.2.6	Elektrische Leitfähigkeit im Karstwasser	59
5.3.3	Bewertung der aktuellen anthropogenen Beeinflussung des Malm-Grundwasserleiters im Untersuchungsgebiet	60
5.4	Kreide	61
5.5	Quartär	62
6	Gefährdung der Grundwasserleiter	65
6.1	Allgemeine Grundlagen	65
6.2	Gefährdung des Grundwassers im Rhätollas und im Dogger	65
6.3	Bewertung der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers	65
6.3.1	Beurteilungskriterien	67
6.3.1.1	Bewertung der Grundwassermächtigkeit	67
6.3.1.2	Unterscheidung Seichter Karst/Tiefer Karst	67
6.3.1.3	Bewertung der Kreidebedeckung	67
6.3.1.4	Bewertung der Gesamtüberdeckung (einschließlich quartärer und tertiärer Deckschichten)	67
6.3.1.5	Berücksichtigung der aktuellen Nutzung	68
6.3.2	Karte zur potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers	68
6.3.2.1	Beschreibung der Ergebnisse	69
6.3.2.2	Kritische Würdigung	69
7	Bilanzierung der Grundwasservorkommen	71
7.1	Ermittlung des Grundwasserdargebotes	71
7.1.1	Methodik	71
7.1.1.1	Definitionen	71
7.1.1.2	Methoden	71
7.2	Gliederung nach geologisch-hydrogeologischen Gesichtspunkten	73
7.2.1	Albvorland	74
7.2.1.1	Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate	74
7.2.1.2	Aktuelle Nutzung der Grundwasserleiter	74
7.2.1.3	Prognose über mögliche Steigerungen der Trinkwasserförderung	76
7.2.2	Malmkarst einschließlich der Vilsecker Kreidemulde	76
7.2.2.1	Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate	76

7.2.2.2	Aktuelle Grundwasserförderung aus dem Malmkarst und Möglichkeiten weiterer Grundwassererschließungen	78
7.2.2.3	Zusammenfassende Bilanzierung	83
7.2.3	Quartäre Grundwasservorkommen in Talbereichen und am Albrand	84
8	Mineral- und Thermalwässer	87
9	Zusammenfassung	91
10	Literaturverzeichnis	95
Anhang 1:	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	103
Anhang 1a:	Verzeichnis der Abbildungen	103
Anhang 1b:	Verzeichnis der Tabellen	104
Anhang 2:	Begriffserläuterungen	105
Anhang 3:	Stratigraphische Gliederung des Känozoikums und des Mesozoikums	119

1 Einleitung

Der vorliegende Fachbeitrag befaßt sich mit der Hydrogeologie der Nördlichen Frankenalb. Der Schwerpunkt des Untersuchungsgebietes liegt im Regierungsbezirk Mittelfranken, westlich der Regnitz. Teile des Bearbeitungsgebietes liegen in Oberfranken, südlich von Lichtenfels. Im Osten erstreckt sich dieser Raum in die Oberpfalz bis etwa zur Vils. Das GLA wurde vom StMLU beauftragt, diesen hydrogeologischen Fachbeitrag als Grundlagenuntersuchung für die Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung zu erarbeiten. Die Ergebnisse des Fachbeitrags — insbesondere soweit sie das Einzugsgebiet des Obermains betreffen — sind in den Rahmenplan Main, der 1994 veröffentlicht wurde, eingegangen.

Im Gebiet der Nördlichen Frankenalb sollte neben der quantitativen Darstellung des Grundwasserdargebots (insbesondere im Karst-Grundwasserstockwerk) vor allem qualitativen Fragen sowie der Beurteilung der potentiellen Gefährdung größere Bedeutung geschenkt werden. Das Untersuchungsgebiet wird nach geologischen und naturräumlichen Einheiten untergliedert. Ergänzend werden Bereiche der Vilsecker Mulde (Verbreitung des Malmkarstes) sowie Teilgebiete der Mittleren Frankenalb (bis zur Linie Aitdorf-Amberg) mitbearbeitet.

Die Datenerfassung begann im ersten Quartal 1984; auf Grund der Fülle von Einzeldaten stellte man im März 1984 die Erfassung auf Elektronische Datenverarbeitung (EDV) um. Die EDV-Erfassung erwies sich bald als zeitaufwendiger als zunächst vermutet; jedoch erleichtert sie nun den gezielten Zugriff auf qualifizierte Daten sowie deren Darstellung in Abbildungen und Karten.

Die erfaßten Informationen setzen sich zusammen aus:

- hydrogeochemischen und hydraulischen Daten aus Veröffentlichungen des GLA
- hydrogeochemischen, projektbezogenen Untersuchungen des GLA
- hydrogeochemischen und hydraulischen Daten aus unveröffentlichten Untersuchungen des GLA
- hydrogeochemischen und hydraulischen Untersuchungen des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (LfW) bzw. der Wasserwirtschaftsämter (insbesondere der WWÄ Bamberg und Bayreuth)
- hydrogeochemischen Daten aus Diplomarbeiten und Dissertationen der Geologischen Institute der Universitäten Erlangen und Würzburg
- allgemeiner und regionaler hydrogeologischer Literatur.

Von Herbst 1984 bis Frühjahr 1986 wurden im Untersuchungsraum aus Quellen und Brunnen knapp 300 Wasserproben entnommen und am GLA nach der "Großen Trinkwasseranalyse" untersucht. Hierbei wurden nur wenige Lokalitäten wiederholt beprobt, zumal teilweise bereits ältere Analysendaten vorlagen. Im Februar 1987 sind während eines Hochwassers gezielt von etwa 45 größeren Quellen Proben genommen und deren Chlorid- und Nitratkonzentrationen überprüft worden, um Hinweise auf anthropogene Beeinflussungen des Grundwassers durch extreme Situationen wie Hochwasser in der Vorflut zu erhalten.

Von 1986 bis 1987 erfolgten (zusammen mit den Daten für das Maingebiet) Datenüberprüfungen in der EDV-Abspeicherung und Plausibilitäts-Tests mit gezielten Abfragen zur Projektbearbeitung. Die hydrochemische Datei wurde durch Piper-Diagramme von den wichtigsten Grundwasserleitern ergänzt. 1989 erfolgte die Darstellung der wichtigsten hydrochemischen Parameter punktuell auf Computerkarten. - Auf Anregung des StMLU wurden diese punktuellen Computerkarten in flächendeckende umgezeichnet, in die spezielle hydrogeologisch-geologische Detailkenntnisse (z. B. die Ergebnisse des Sonderuntersuchungsprogrammes "Spurenelemente im Grundwasser") eingearbeitet worden sind.

Einschränkend muß festgestellt werden, daß die Datenbasis nicht vollständig homogen ist. Unterschiede treten in der Qualität (verschiedene Analytiker und Analyse-Verfahren) sowie durch verschiedene Zeitebenen auf. Diese Gegebenheiten mußten durch die spezielle Aufgabenstellung (Kombination aus Literaturarbeit und eigener Datenerhebung) in Kauf genommen werden; Stichtags-

beprobungen von mehreren hundert Grundwasseraustritten waren aus organisatorischen Gründen (Mengenbewältigung am hydrogeochemischen Labor des GLA) nicht durchführbar. Darüber hinaus würden zwangsläufig aus der Überbewertung einzelner Daten Fehler erwachsen. Um das vorhandene Datenmaterial in geeigneter Weise zu nutzen, sind für die flächendeckenden hydrochemischen Übersichtskarten entsprechend große und dennoch aussagekräftige Konzentrationsintervalle gewählt worden.

Zur Ermittlung der bevorzugten Fließrichtungen sind in Teilgebieten der Nördlichen Frankenalb umfangreiche Kluftrichtungen durchgeführt worden. Ergänzend hierzu erfolgten Auswertungen von Luft- und Satellitenbildern sowie die Ermittlung von Richtungsmaxima der Talläufe, insbesondere der Trockentäler. – Bei Kluftrichtungen, die unmittelbar über der Karstwasseroberfläche durchgeführt wurden, d.h. in Steinbrüchen deren Abbausohle bis nahe der Karstwasseroberfläche hinabreicht, wurde die für den Wasserdurchsatz wirksame Kluftweite größenordnungsmäßig mitbestimmt.

Karstwassermarkierungsversuche liefern Ergebnisse über die allgemeinen Strömungsverhältnisse (z. B. Fließrichtungen, Auffächerung des Karstwasserabstroms, Abstandsgeschwindigkeiten, Verdünnungsgrad, Lage und zeitliche Varianz unterirdischer Wasserscheiden), aber auch qualitative und quantitative Nachweise über bestehende und potentielle Beeinträchtigungen des Karstwassers durch anthropogene Einflüsse (z. B. Einleitungen von häuslichen Abwässern und Straßenabwässern, Beeinflussungen durch Mülldeponien und Altlasten). – Zwischen 1986 und 1994 hat das GLA, z. T. direkt projektbezogen, z. T. in Zusammenarbeit mit dem LfW umfangreiche Tracer-Versuche in Teilgebieten der Nördlichen Frankenalb, insbesondere in den tektonisch entstandenen Muldenstrukturen, durchgeführt.

Neben der hydrochemisch-hydrogeologischen Bearbeitung wurden Grunddaten zur Ermittlung der Grundwasserneubildung erfaßt. Das hierfür benötigte Datenmaterial (Abflußwerte regelmäßig beobachteter Abflußmeßstellen) erhielt das GLA vom LfW in Form von ausgedruckten Listen. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung sind diese Daten nach den Methoden WUNDT (1958) und KILLE (1970) ausgewertet worden. Dabei mußten die Abflußwerte verschiedener Zeitreihen miteinander verglichen werden. Für diese speziellen Auswertungen hat das GLA ein Computerprogramm entwickelt.

Zur Bilanzierung des Karstwassers sind auf Vorschlag des GLA und auf Veranlassung des LfW zu den von der Wasserwirtschaft betriebenen Abflußmeßstellen folgende Sondermeßstellen durch die jeweils zuständigen Wasserwirtschaftsämter eingerichtet worden:

Pegel-Nr.	Gewässer	Ort	hydrogeologische Grenze	Wasserwirtschaftsamt	in Betrieb seit
24225408	Fichtenöhe	Pegnitz	Dogger/Malm	Bayreuth	30.11. 84
24225601	Flembach	Michelfeld	Malm/Kreide	Amberg	11.07. 84
24227301	Etzelbach	Weigendorf	Dogger/Malm	Amberg	11.07. 84
24129506	Friesenbach	Kasendorf	Dogger Alpha/Beta	Bayreuth	24.09. 84
24155007	Lauterbach	Stublang	Dogger Alpha/Beta	Bamberg	01.11. 84

Darüber hinaus führten das GLA und die örtlichen Wasserwirtschaftsämter zwischen 1986 und 1992 in Teilgebieten der Nördlichen Frankenalb Trockenwetter-Abflußmessungen bevorzugt an größeren Quellen, Bächen und kleineren Flüssen durch. Zur Ermittlung von Infiltrations- und Exfiltrations-Strecken wurden Detailuntersuchungen im Bereich der Hollfelder Mulde vorgenommen.

Von 1991 bis 1993 wurden der Karten- und Abbildungsteil des Teilbereichs "Nördliche Frankenalb" erstellt. Hierzu zählen:

- Übersicht zur regionalen Gliederung
- Geologische Übersichtskarte mit Abgrenzung des Bearbeitungsgebietes

- Bezeichnung tektonischer Großstrukturen
- Schichtlagerungskarte der Dogger/Malm-Grenze
- Richtungsverteilung der Klüfte im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb
- Vergleich von Kluft- und Talrichtungen
- Zusammenstellung von Ergebnissen von Grundwassermarkierungsversuchen (Farbstoffausbreitung)
- Grundwasseroberfläche im Malm-Grundwasserstockwerk
- Grundwassermächtigkeit des Malm-Grundwasserstockwerks
- Abgrenzung Seichter Karst / Tiefer Karst, Klassifizierung der Kreideüberdeckung sowie der Gesamtüberdeckung
- Hydrogeologische Schemaprofile durch die Nördliche Frankenalb
- Geologisch-hydrogeologische Profilschnitte durch die Nördliche Frankenalb
- Übersicht von Quellen, Brunnen, Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken im Malm-Grundwasserstockwerk
- Darstellung der wichtigsten Grundwassertypen in Piper-Diagrammen ihre Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967)
- Hydrochemische Karten (Sulfat-, Chlorid-, Nitrat- und Phosphatgehalte sowie Kaliumpermanganat-Verbrauch und elektrische Leitfähigkeit im Karstwasser)
- Schemaprofile zur Überdeckung des Karstgrundwasserleiters (Bodenprofile)
- Übersicht der Grundwasserneubildungsraten im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb
- Karte der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers (unter Berücksichtigung aktueller Nutzungsfaktoren)
- Übersicht ergiebiger Grundwasservorkommen im Malmkarst (unter Berücksichtigung ihrer potentiellen Gefährdung)
- Karte der Verteilung von Dolinen

Verantwortlicher Projektleiter war Herr Dr. R. Apel. Die Textbeiträge wurden 1994 von den Herren Dr. G. Büttner und Dr. R. Apel erstellt. Die Redaktion übernahmen die Herren A. Schneider und A. Märtl. – Die Koordinierung der Teilaufgaben sowie die Wertung einzelner wichtiger Teilergebnisse erfolgte stets in guter Zusammenarbeit mit dem LfU und dem LfW.

2 Geologisch-geomorphologischer Überblick

Naturräume, Gebiete mit gleichartigen ökologischen Ausstattungen, orientieren sich überwiegend an geologischen und morphologischen Gegebenheiten sowie an Klimaprovinzen. Zum Untersuchungsgebiet zählen die Nördliche und der Nordteil der Mittleren Frankenalb, das Alb-Vorland (bzw. die Nördliche und Anteile der Südwestlichen Albrandregion) und die westlichen Randgebiete des Obermain-Hügellandes (bzw. des Bruchschollenlandes) [nach MEYNEN et al. (1961), SPÄTH (1978) sowie GLA (1991)].

Abb. 1 stellt die wichtigsten naturräumlichen Einheiten im Untersuchungsgebiet dar; Tab. 1 charakterisiert sie nach geologischen, morphologischen, klimatologischen und vegetationskundlichen Gesichtspunkten.

Tabelle 1: Naturräumlicher Überblick

	Naturräumliche Haupteinheit (geogr. Bezeichnung)	Albvorland und westliche Gebiete des Obermain-Hügellandes	Nördliche (und Mittlere) Frankenalb
Geologie	Beschaffenheit der ausstreichenden Gesteine	Schluff-, Ton- und Sandsteine des Juras	Kalk- und Dolomitsteine, sowie Mergel des Malm; sandige bis tonige Sedimente der Kreide
	Beschaffenheit der Deckschichten	<u>Überwiegend:</u> Tonig-schluffige Decken mit schwankenden Schuttanteilen; untergeordnet: Geringmächtige parautochthone Decken aus Sand- und Tonsteinen, Löß bzw. Lößlehm, Terrassen	<u>Hochfläche:</u> Gering mächtige parautochthone Decken aus Kalk-, Dolomit- und Sandstein, Löß und Lößlehm <u>Randbereiche und Täler:</u> Schutt mit sandigen bis tonigen Zwischenmitteln (aus dem Anstehenden)
Morphologie	Höhe über NN; Min.-Max. mittlere Höhe	~240 - 500 m Ø 300 - 400 m	~300 - 650 m Ø 450 m
	typische Landschaftsformen	Schichtstufen, hügelige Gebiete	Hochflächen (flachwellige bis flächige Gebiete), Kuppen, V- und kastenförmige Täler
Klima	Mittlere Jahrestemperatur	> 7 - < 9 °C	> 6 - < 8 °C
	Mittlerer Jahresniederschlag	600 - < 850 mm	> 750 - 1 050 mm
Vegetation	vorwiegende Nutzung	Wald (30-35 %) Ackerland (Getreide, Hackfrucht)	Wald (40 %) Ackerland (Hackfrucht, Getreide)
	wichtige Sonderkulturen	vereinzelt: Gemüse (in Tälern) Raum Hersbruck: Hopfen	westlicher Albrand: Obst; Tallagen lokal: Gemüse; Raum Hersbruck: Hopfen

2.1 Geologische Übersicht (Abb. 2 – Geologische Übersichtskarte)

2.1.1 Beschreibung der Gesteine

Die im Untersuchungsgebiet austreichende mesozoische Schichtenfolge erstreckt sich vom Lias bis zur Oberkreide. Das Jura-Schichtpaket erreicht in der Nördlichen Frankenalb sowie in ihrem Umland Mächtigkeiten bis etwa 500 m. Seine untere Hälfte, die den Lias oder Schwarzen Jura sowie den Dogger oder Braunen Jura umfaßt, wird überwiegend aus tonigen Abfolgen (mit geringmächtigen sandigen, mergeligen und kalkigen Einschaltungen) aufgebaut. Lediglich im Dogger Beta dokumentiert der markante "Eisensandstein" eine mächtige Sandsteinschichtfolge mit stark wechselnden Limonitgehalten. Der Malm oder Weiße Jura im Hangenden ist überwiegend kalkig bzw. dolomitisches ausgebildet. Den Abschluß der mesozoischen Schichtenfolge bilden Sande, Sandsteine, Tone und Mergel der Oberkreide, die als Residualdecken das in der Unterkreide entstandene Malmkarstrelief bereichsweise auskleiden und dabei Mächtigkeitsschwankungen von 0 bis über 300 m aufweisen können.

Tertiäre Basaltvorkommen östlich und südlich Oberleinleiter weisen nur eine geringe Erstreckung auf und sind somit von untergeordneter Bedeutung.

Durch Verwitterungsvorgänge unter tropischen Klimabedingungen des Tertiärs entstanden aus Kreide- und Malmschichten Rotlehme unterschiedlicher Mächtigkeit. Sie verzahnen häufig mit quartären Braunlehmen, Lößlehmen und sandigen Ablagerungen. Diese Verwitterungsbildungen werden als "Ablehme" bezeichnet.

Daneben verhüllen quartäre Sedimente (Löß und Lößlehm, Verwitterungsdecken und -schutt, Terrassen und Terrassenreste) die mesozoischen Schichten. Sie erreichen allerdings nur selten Mächtigkeiten von mehr als 5 m. Lediglich im Wiesental bei Ebermannstadt erreichen quartäre Sande und Kiese über 10 m Mächtigkeit.

2.1.2 Lagerungsverhältnisse

(Abb. 3 – Bezeichnung tektonischer Großstrukturen, Abb. 4 – Schichtlagerungskarte der Dogger/Malm-Grenze)

Bedeutsamstes tektonisches Element bildet die herzynisch (d. h. NW-SE-) streichende Frankenalbfurche, die durch Querwellen (z. B. den Ailsbachsattel oder das Eschenfelder Gewölbe und die Hahnbacher Kuppel) in mehrere Einzelabschnitte gegliedert wird. Ihre größten Eintiefungen erreicht sie im Bereich der Veldensteiner Mulde (Malm/Dogger-Grenze: 190 m ü. NN) und in der Hollfelder Mulde (Malm/Dogger-Grenze: 230 m ü. NN). – Die Frankenalbfurche weist in Teilbereichen eine starke Asymmetrie auf, wobei einer relativ flachen Westflanke eine steile, teils zerbrochene Ostflanke gegenüber steht. Die flach einfallende Westflanke wird außerdem durch antiherzynisch streichende Quermulden und Quersättel gegliedert.

Die Frankenalbfurche tritt im Norden mit dem Staffelsteiner Graben auf das Untersuchungsgebiet über und setzt sich in der Hollfelder Mulde fort. Ihre Achse ist zwischen dem nordwestlichen Albrand und dem Umfeld von Kleinziegenfeld – Stadelhofen nach SE geneigt und steigt südlich ihres Zentrums (Raum Stechendorf) nach SW, in Richtung Muggendorf an. Der zentrale Muldentheil ist grabenartig eingebrochen. Die südwestliche Begrenzung bildet die Staffelsteiner Störungszone, die Nordostbegrenzung die Hollfelder Störungszone. Beide Störungszone weisen Abschiebungscharakter auf (MEYER 1972 b). Auffällig ist die T-förmige Verbreiterung der Hollfelder Mulde im Norden, die sogenannte Ziegenfelder Bucht. Zwischen Wonsees und Plankenfels zeichnet sich die Hollfelder Mulde durch eine starke Asymmetrie aus; während die westliche Muldenflanke nur relativ leicht und gleichmäßig nach E geneigt ist, steigt die östliche steil an. Zwischen Plankenfels und dem Ailsbachtal wird die Mulde weitgehend durch die südliche Fortsetzung der Hollfelder Störungszone begrenzt; die Schichten steigen in diesem Abschnitt steil nach E an.

Der NE-SW-gerichtete, etwa parallel zum mittleren Ailsbachtal verlaufende Ailsbachsattel trennt die Hollfelder Mulde von der südlich sich anschließenden Veldensteiner Mulde. Im Sattelkern steht die Dogger/Malm-Grenze bei ca. 300 m ü. NN an. — Großräumig betrachtet stellt der Ailsbachsattel eine querstreichende Aufbeulung innerhalb einer größeren Muldenstruktur dar; diese Tatsache wird durch das generelle Einfallen der Schichten im näheren Umkreis der Sattelstruktur verdeutlicht.

An den Ailsbachsattel schließt in SE-Richtung die Veldensteiner Mulde an. Diese weitgehend symmetrische und kaum zerbrochene Muldenstruktur ist NW-SE-gerichtet. Die Dogger/Malm-Grenze ist im Muldentiefsten (im Umfeld von Weidensees) auf ca. 190 m ü. NN abgesenkt und steht an den Flanken z. T. auf >500 m ü. NN an. Die maximale Amplitude beträgt hier >300 m.

An der SE-Flanke der Veldensteiner Mulde schließen sich das Eschenfelder Gewölbe und die Hahnbacher Kuppel (v. FREYBERG 1969) an, deren Achsen quer zur Muldenachse angeordnet sind. Im Kern des Eschenfelder Gewölbes ist die Dogger/Malm-Grenze auf über 500 m ü. NN herausgehoben; der Dogger steht dort über Tage an. Die Aufwölbung an der SE-Flanke der Veldensteiner Mulde vollzieht sich in Form eines teils zerbrochenen Schichtverbandes, teils in Form einer flexurartigen Verbiegung (Flexur von Welluck und Krottensee), so daß auf nur 2 km Länge die Schichten um knapp 200 m ansteigen.

Die Gewölbeachse verläuft vom N-Rand der Frankenalb bogenförmig etwa N—S und biegt bei Eschenfelden in die NW-SE-Richtung um. Nach SE schließt sich an das Eschenfelder Gewölbe die Hahnbacher Kuppel an. In ihrem Zentrum, im Umfeld von Hahnbach (außerhalb des Untersuchungsgebiets) N Sulzbach-Rosenberg, tritt der Sandsteinkeuper zu Tage.

Nördlich dieser Aufwölbungen zieht sich eine schwache Depression hin, die zur NW-SE-verlaufenden Vilsecker Mulde führt und wie ein Seitenast der Frankenalbfurche erscheint. Die Vilsecker (Kreide-) Mulde zeichnet sich durch eine starke Asymmetrie aus, wobei ihre nördliche, teils intensiv zerbrochene Flanke steiler als die südliche ansteigt. In ihrem Muldentiefsten, NE Vilseck ist die Dogger/Malm-Grenze auf ca. 230 m ü. NN abgesenkt, an den Flanken steht dieser Bezugshorizont auf >500 m ü. NN an; die maximale Amplitude beträgt somit knapp 300 m.

Südwestlich von Eschenfelden sowie im Bereich von Sulzbach-Amberg werden das Eschenfelder Gewölbe bzw. die Hahnbacher Kuppel von einem Depressionsstreifen begleitet (Sulzbacher Delle, Engelsdorfer Delle), der in die Bodenwöhrer Bucht hineinführt (Bodenwöhrer Seitenast). Die Hauptfurche ändert bei Amberg ihre SE-Streichrichtung und verläuft mit SSE-Streichen über die Kallmünzer Mulde weiter nach Regensburg (v. FREYBERG 1969). Die Dogger/Malm-Grenze befindet sich im Tiefsten der Sulzbacher Delle, NW Amberg, im Niveau von 240 m ü. NN. Die Sulzbacher und die Engelsdorfer Delle stellen eine asymmetrische Mulde dar, deren Ostflügel sich steiler heraushebt als der Westflügel.

Im Osten wird das Untersuchungsgebiet von NW-SE streichenden Hebungs- und Wölbungszonen des ostbayerischen Grundgebirges und seines mesozoischen Vorlandes (z. B. Marktzeulner Sattel, Creussener Gewölbe, Kaltenbrunner Kuppel, Hahnbacher Kuppel) begrenzt (TILLMANN 1958; GUDDEN & TREIBS 1961; SCHWARZMEIER 1981). An den Südwesträndern dieser Wölbungszonen treten im Gebiet von Auerbach bis Amberg südwestvergente, mehrfach gestaffelte Aufschiebungen, teilweise auch Überschiebungen (Auerbacher Störungszone, Freihunger Störung, Sulzbach-Amberger Störungszone) auf, die aus randlichen Flexuren hervorgegangen sind (TILLMANN, TREIBS & ZIEHR 1963; GUDDEN & TREIBS 1964; TILLMANN & TREIBS 1967).

Zur Auerbacher Störungszone gehören hierbei die Leonie-Doppelüberschiebung (zwei Parallelüberschiebungen) und die ähnlich gebaute Maffei-Doppelüberschiebung. Die Amberg-Sulzbacher Störungszone ist ein Teil der saxonischen Bruchstörungslinie, die in Fortsetzung der Pfahlrichtung vom NE-Rand der Bodenwöhrer Bucht über Schwarzenfeld-Amberg-Sulzbach nach Großenfalz verläuft. Sie besteht aus zwei, stellenweise auch drei Aufschiebungsbahnen, die im Bereich des Rosenberger Quersprungs ca. 800 - 900 m und am Häringloher Quersprung 150 m quer zum Streichen versetzt sind. Westlich von Großenfalz geht die Amberg-Sulzbacher Störungszone in eine Flexur über (GUDDEN

& TREIBS 1961). An ihren Südwestseiten werden diese Aufschiebungszone von Halbgräben oder Halbmulden begleitet (Leonie-Delle, Maffei-Delle, Vilsecker Mulde, Sulzbacher Delle).

Außer diesen Aufschiebungszone am Albostrand kommen im Untersuchungsgebiet Störungszone mit überwiegend herzynischer (Holfelder Störungszone, Staffelsteiner Störungszone, Pegnitzer Nord- und Südsprung), am Albrand teilweise auch variszischer Richtung vor, die meist Abschiebungscharakter besitzen.

Profilschnitte (Abb. 12) geben einen Überblick über die geologisch-hydrogeologischen Lagerungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Die Grundlagen hierfür wurden aus den Geologischen Karten von Bayern 1:25 000, der Geologischen Karte 1:200 000 Blatt Bayreuth, aus der Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (1981), den zugehörigen Mächtigkeits- und Schichtlagerungskarten, aus unveröffentlichten Manuskriptkarten, aus Bohrerergebnissen und Unterlagen des GLA und des LfW ermittelt.

2.2 Geomorphologischer Überblick

Geomorphologische Hauptelemente sind im Untersuchungsgebiet Altflächen, (Schicht-)Stufen, Kuppen und Senken sowie scharf eingesenkte Sohlen- und Kerbtäler. Die Bildung der Landschaftsformen setzte im Oberen Malm ein, da seither große Teile Frankens trocken liegen. Ausgeprägte kretazische Verkarstungsformen sind in der Frankenalb älteste Zeugen dieser Landschaftsbildung. Die Ausformung der rezenten Landschaft beginnt im Tertiär. Unter einem tropisch-wechselfeuchten bis tropoiden Klima entstehen Rumpfflächen und -stufen. Diese Formen orientieren sich weitgehend an der Resistenz der Gesteine. Aus den Rumpfstufen gehen schrittweise die Schichtstufen hervor. Die primäre Anlage vieler rezenter Täler und Talstücke, insbesondere der Trockentäler auf der Malmtafel, erfolgte bereits im Tertiär. Zu Beginn des Jungtertiärs klingen die tektonischen Aktivitäten aus. Im Pleistozän wird dieses Relief deutlich überprägt, Talformen werden übertieft, Verwitterungsschutt z. T. ausgeräumt, die heutige Morphologie schält sich sukzessive heraus, in den Kaltzeiten bilden sich wiederum Schuttdecken; Löß und Flugsand werden angeweht.

In Abhängigkeit von Genese und Gesteinsbeschaffenheit (Verwitterungsresistenz) lassen sich folgende geomorphologischen Einheiten unterscheiden:

Schichtstufen

Die flächenhafte Abtragung im Tertiär formte aus dem generell nach Osten fallenden Schichtgebäude Schichtstufen heraus. Die Stufenbildung setzte dort an, wo auf weiche Gesteinsserien härtere folgen, so an den Grenzen Opalinuston/Eisensandstein und Dogger/Malm.

Flachwellige bis flächige Gebiete

Diese Gruppe umschließt die Hochflächen. Es handelt sich vielfach um Gebiete, die im Tertiär Tiefgebiete bzw. tektonische Mulden darstellten und dann gleichmäßig flächig abgetragen (eingerumpft) wurden. – Die Oberfläche der Jura-Landstufe wird von hartem Malmkalk bzw. -dolomit gebildet. Die flachwellige Hochfläche wird durch Karstformen modifiziert; zumeist tektonisch vorgezeichnete kastenartige und V-förmige Täler schneiden sich zuweilen relativ tief ein.

Hügelige Gebiete

Im Albvorland und am Westrand des Obermain-Hügellandes wechseln im Ausstrich von Lias und Dogger unterschiedlich harte Gesteine (Tonsteine und Sandsteine) miteinander ab. Hierdurch wird ein hügeliges Landschaftsbild erzeugt.

Kuppen

Härtlinge, wie Dolomitvorkommen innerhalb weicherer Kalksteinverbreitung sowie verkieselte Riffstotzen innerhalb nicht verkieselter Riffkalke, erzeugen Kuppen (s.g. Kuppenalb). Dagegen heben sich die Basaltvorkommen, die bei Oberleinleiter im Juraschichtverband stecken, morphologisch nicht hervor.

Gewässernetz und -morphologie

Die überwiegenden Teile des Bearbeitungsgebietes gehören zum Einzugsgebiet des Mains. Dieser entwässert über den Rhein zur Nordsee. Lediglich in der Vilssecker Mulde und im Raum Sulzbach-Amberg ist der oberirdische Abfluß zur Vils, einem Nebenfluß der Naab, gerichtet. Die Naab mündet ihrerseits westlich Regensburg in die Donau. Zwischen den Einzugsgebieten von Main und Donau, d. h. zwischen den Flußgebieten der Regnitz und der Vils ist eine Hauptwasserscheide ausgebildet, die sogenannte "Europäische Wasserscheide".

Eine Wasserscheide zweiter Unterteilung trennt im Norden des Untersuchungsgebietes Flüsse und Bäche, die direkt zum Main gerichtet sind, von denen, die zur Regnitz bzw. Pegnitz entwässern. Das Regnitzgebiet wird seinerseits durch Wasserscheiden dritter Unterteilung in kleinere Untereinheiten gegliedert. Hierzu zählen u. a. die Flußgebiete von Pegnitz und Wiesent (vergl. Gewässerkarte von Bayern, i.M. 1:500 000 bzw. Abb. 28).

Vom Gefälle und der jeweiligen Wasserführung der Bäche und Flüsse sowie von der Lithologie des Untergrundes hängt es ab, ob ein Gewässer akkumulierend oder erodierend wirkt (Tab. 2). Im allgemeinen bewirkt ein Gefälle von weniger als 5‰ ein akkumulatives, eines von über 5‰ ein erosives Verhalten des Fließgewässers. Bäche, deren Untergrund stets harte Gesteine bilden und deren Vorflut tief genug liegt, besitzen ständig Gefälle über 5‰ und wirken auf ihrer gesamten Strecke erosiv. Hierzu zählen beispielsweise Leinleiter, Püttlach und Sittenbach. Die Quellbereiche größerer im Malm entspringender Bäche liegen häufig in Trockentälern. Daher erreicht das Gefälle ihrer Oberläufe meist um 10‰.

Tabelle 2: Gefälleverhalten von Bächen und Flüssen in der Nördlichen Frankenalb und ihrem Umland
 (Die Gefälle wurden in Abhängigkeit von der Länge des betrachteten Bachs bzw. Flusses
 über ein mehrere 100 m bis mehrere km langes Talstück gemittelt.)

Gewässer	Oberlauf	Geologie	Mittellauf	Geologie	Unterlauf	Geologie
Gefälle in Promille [‰]						
Flußgebiet der Wiesent						
Wiesent	9	Malm	2	Dogger	2	Quartär auf Lias und Keuper
Abbach/Alsbach	11	Lias	6	Dogger u. Malm	9	Malm
Aufseß	8	Malm	5	Malm	1	Malm
Leinleiter	8	Malm	10	Dogger	7	Dogger
Püttlach	12	Lias und Dogger	5	Dogger	9	Malm
Schwalbach/Kainach	12	Malm	--	--	3	Malm
Trubach	10	Malm	7	Dogger	4	Quartär auf Dogger
Flußgebiet der Pegnitz						
Pegnitz	8	Dogger u. Malm	3	Malm	1	Quartär auf Keuper
Hirschbach	6	Malm	1	Dogger	3	Lias
Högenbach	7	Malm	4	Dogger	3	Quartär auf Lias
Rohrbach/Happurger Bach	20	Malm	8	Dogger	3	Quartär auf Lias
Sittenbach	22	Dogger	9	Lias	6	Quartär auf Lias
Flußgebiet des Mains						
Weismain	6	Malm	7	Dogger	3	Quartär auf Lias u. Keuper

3 Geologisch-hydrogeologische Beschreibung der Grundwasserleiter

Einen Überblick der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet vermitteln die hydrogeologischen Schemaprofile (Abb. 11) und die Profilschnitte (Abb. 12). Eine tektonische Übersichtskarte sowie ein Plan, in dem die wichtigsten tektonischen Elemente namentlich und lagerichtig dargestellt sind (Abb. 3 und 4), ergänzen die Profilschnitte und ermöglichen so, die geologische Karte räumlich zu interpretieren.

Die in den Übersichtsprofilen verwendete geologische Information basiert zum großen Teil auf Veröffentlichungen des GLA (insbesondere GLA 1981) sowie auf Detailkenntnissen der Regionalbearbeiter; die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserleiters wurde, unter Berücksichtigung der speziellen Morphologie, mit Hilfe der im Rahmen dieses Projektes neu erstellten Grundwassergleichenkarte konstruiert.

Die Schichten, aus denen das mesozoische Deckgebirge aufgebaut ist, lagern fast durchweg konkordant und sind der Abfolge nach stratigraphisch gegliedert und beschrieben. Die Tertiär- und Quartärbildungen füllen ebenso wie die Kreidesedimente das Jurarelieff aus und haben positionsbedingt grundwasserleitende oder -abschirmende Eigenschaften. Die vulkanischen Gesteine bei Oberleinleiter spielen hydrogeologisch kaum eine Rolle.

Die Teilkapitel sind stets nach dem gleichen Schema aufgebaut: Zunächst wird eine Kurzzusammenfassung über die wichtigsten hydrogeologischen Eigenschaften gegeben. Dann folgt eine kurze erdgeschichtliche Einführung, verbunden mit lithologischen Gesteinsbeschreibungen und Angaben zu Schichtmächtigkeiten. Schließlich werden die hydrogeologischen Eigenschaften aufgezeigt und, soweit vorhanden, hydrogeologische Kenndaten angeführt.

3.1 Mesozoikum

3.1.1 Jura

Während der Lias mit Ausnahme basaler Bereiche überwiegend aus nicht grundwasserleitenden Schichten besteht, stellen der Eisensandstein des Dogger Beta und der Malmkarst Grundwasserleiter die beiden wasserwirtschaftlich bedeutendsten Jura-Grundwasserstockwerke dar.

Die Fränkische Alb und ihr Vorland werden vorwiegend aus Gesteinen des Jura aufgebaut. Die steile Stirn der Frankenalb bildet den SSE-NNW-gerichteten Albtrauf, an den sich die teils flachwellige, teils kuppige Albhochfläche anschließt. Stratigraphisch und farblich läßt sich die jurassische Schichtenfolge in drei Einheiten unterteilen, nämlich:

- Schwarzer Jura oder Lias, der an seiner Basis aus Sandsteinen und Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen, im mittleren und oberen Bereich fast ausnahmslos aus Tonsteinen besteht.
- Brauner Jura oder Dogger, der zumeist von Sandstein- und Tonsteinfolgen aufgebaut ist.
- Weißer Jura oder Malm, der sich überwiegend aus karbonatischen Gesteinen zusammensetzt.

Zu Beginn des Lias stieß das Meer rasch von Norden her vor und überflutete die Keuperlandschaft. Im Verlauf des Doggers wurde die tonige durch eine sandige Sedimentation abgelöst, was auf relativ nahe Abtragungsgebiete und bewegteres Wasser schließen läßt. Durch epirogenetische Krustenbewegungen wurde im oberen Jura die Vindelizische Schwelle überflutet und somit das flachere Schelfmeer im fränkischen Raum direkt mit dem tieferen alpinen Mittelmeer, der Tethys, verbunden. Die Zufuhr kalkreichen Tiefenwassers aus der Tethys bei zunehmender Erwärmung auf dem fränkischen Schelf ermöglichte erst im Malm die Bildung heller Karbonatgesteine. Die besonders in den Mergeln enthaltenen Tonanteile stammen von der Mitteldeutschen Schwelle bzw. von den nahen Landgebieten. In ganz Süddeutschland, so auch im Untersuchungsgebiet, begann ein intensives Wachstum von Bakterien, Algen, Bryozoen u. dgl., das neben der geochemischen auch die biogene

Kalkbildung gefördert hat. Bereichsweise kam es zur Bildung von Riffen (Schwamm-, Algen-Bryozoen- sowie Korallen-Brachiopodenriffe); in den zwischenliegenden Becken wurden Bank- und Plattenkalke abgelagert. Gegen Ende des Malm erfolgte von Norden her eine rasche Verlandung.

3.1.1.1 Lias

Der Lias streicht in einem schmalen Streifen entlang der Jura-Landstufe über Tage aus und unterlagert den Dogger und Malm. Weitflächige Ausstrichbereiche finden sich zwischen Scheßlitz und Bamberg, SE Lichtenfels, entlang des östlichen Albrandes zwischen Weismain, Bayreuth und Creusen, im Umfeld von Lauf sowie W und S Altdorf. Von NW nach SE ist eine deutliche Mächtigkeitsabnahme festzustellen. Während für den Raum Bamberg-Staffelstein eine Gesamtmächtigkeit von 90-100 m verzeichnet werden kann, ist der Lias im Umfeld von Amberg auf ca. 20 m reduziert (MEYER & SCHMIDT-KALER 1981 a).

Die basalen Bereiche des Lias (Lias Alpha) werden vor allem im Raum Forchheim - Erlangen - Hersbruck - Amberg von Sandsteinen und Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen aufgebaut. Diese erreichen Mächtigkeiten zwischen 10 m (Umfeld von Sulzbach-Rosenberg) und knapp 40 m (Raum Erlangen - Forchheim).

Da sich der basale Abschnitt des Lias häufig lithologisch kaum vom darunter liegenden Rhät (Oberer Keuper) unterscheidet, werden diese beiden stratigraphisch aufeinanderfolgenden Einheiten meist als Rhät(o)lias zusammengefaßt. Auch hydrogeologisch stellen dann Unterer Lias und Rhät einen einheitlichen Grundwasserleiter dar. Die pelitischen Zwischenlagen des Lias Alpha sind nur geringmächtig ausgebildet und z. T. geklüftet, sie wirken durchlässig, vor allem im vertikalen Wasserdurchsatz.

Die Wasserführung dieser Abfolge ist von vielen Faktoren abhängig; so z. B. vom Durchlässigkeitsbeiwert, von tektonischen Strukturen (Sättel oder Mulden), von der Größe des Einzugsgebietes (zusammenhängendes Gebiet, Zeugenberg, tektonische Scholle) sowie von der Überdeckung (Möglichkeit der Grundwasserneubildung). Dies spiegelt eine exemplarische Gegenüberstellung der hydrogeologischen Bedeutung des Rhätolias-Bereiches in verschiedenen Teilgebieten des untersuchten Raumes wider: Während der Rhätolias im Raum Weismain-Bayreuth (APEL 1972 b; FRANK 1977) sowie im näheren Umland von Nürnberg überwiegend über dem Vorflutniveau lagert und daher hydrogeologisch von nur geringer Bedeutung ist, kann er im Raum Creußen (FÜRST 1956) und auf den Blattgebieten Nr. 6132 Buttenheim bzw. Nr. 6232 Forchheim (APEL 1979) als wichtiger Grundwasserleiter angesehen werden.

Der Rhätolias-Grundwasserleiter ist vor allem auf dem Gebiet der Kartenblätter Nr. 6031 Bamberg Nord, Nr. 6032 Scheßlitz, Nr. 6132 Buttenheim bzw. Nr. 6232 Forchheim, Nr. 6534 Happurg sowie Nr. 6634 Altdorf durch Versorgungsbrunnen erschlossen (APEL 1972 a, 1974 a, 1977 a, 1979). Brunnen aus dem Rhätolias erreichen im Regelfall Ergiebigkeiten von 3-5 l/s, gelegentlich auch von knapp 10 l/s. Unter günstigen geologischen bzw. tektonischen Voraussetzungen können aber auch bedeutend höhere Ergiebigkeiten erzielt werden. So liefern die drei Brunnen der Eggolsheimer-Gruppe (Blattgebiet Forchheim) 94-100 l/s, bei Einzelergiebigkeiten von ca. 20 bis knapp 40 l/s (APEL 1979).

Die hangenden Abfolgen des Lias sind aus Tonsteinpaketen mit gelegentlichen karbonatischen Einschaltungen aufgebaut. Dieser Abschnitt erreicht im Nordwesten bis 90 m, im Südosten (Raum Sulzbach-Amberg) <20-30 m Mächtigkeit; bedeutsamster Tonhorizont ist dabei der Amaltheonton des Lias Delta (MEYER & SCHMIDT-KALER 1981 a).

Hydrogeologisch sind diese mächtigen Tonsteinfolgen grundwasserfrei. Sie bilden das Dach des Rhätolias-Stockwerkes und zusammen mit dem ebenfalls tonigen Dogger Alpha die Grundwassersohle des hangenden Dogger-Stockwerkes. Die in das Tonsteinpaket eingelagerten Kalkbänkchen sind wasserwirtschaftlich unbedeutend.

3.1.1.2 Dogger

Der Dogger streicht vornehmlich in einem schmalen Band im Randbereich der Jura-Schichtstufe, untergeordnet in einigen sattelartigen Aufwölbungen (z. B. N Heiligenstadt und im Eschenfelder Gewölbe) aus. Die Ausstrichsbreite ist wegen der größeren Härte bzw. Verwitterungsresistenz der Gesteine dieses Schichtpaketes geringer als die des Lias. Der Dogger ist im Vergleich zum Lias reliefbetonter. Zwischen Plankenfels und Mistelgau im NW sowie Pegnitz und Schnabelwald im SE verbreitert sich der Doggerausstrich aufgrund der Schichtlagerung auf 5-10 km. In der Nördlichen Frankenalb unterlagert der Dogger den Malm.

Im Dogger ist von Nordwesten nach Südosten eine Mächtigkeitsabnahme festzustellen, die am deutlichsten der Opalinuston (Dogger Alpha) widerspiegelt. Die Gesamtmächtigkeit des Doggers beträgt im Raum Bamberg-Staffelstein 125 - 165 m, im Raum Sulzbach-Rosenberg ca. 100 - 140 m (MEYER & SCHMIDT-KALER 1981 b; vgl. Tab. 3).

Lithologisch weist der Dogger eine klare Dreigliederung auf: Die Basis bildet der Opalinuston, eine einheitlich monotone Folge von grauschwarzen, teils auch graublauen, geschichteten Tonen, in die häufig Toneisensteingeoden eingelagert sind. Gegen die Obergrenze schalten sich Sandschmitzen und dünne, unregelmäßig auskeilende Sandsteinbänkchen ein. Die Mächtigkeit der Tonfolge liegt im Durchschnitt bei 60 - 70 m, kann aber zwischen 40 m und 100 m schwanken.

Dieses Tonpaket wird vom Eisensandstein des Dogger Beta überlagert. Der Doggersandstein besteht vorwiegend aus feinkörnigen, gelbbraunen bis braunen, meist schluffig-tonig und seltener karbonatisch gebundenen Sandsteinen, denen einzelne, oft sandig-schluffige Tonlagen zwischengeschaltet sind. Die Anzahl der eingeschalteten Tonhorizonte ist im Südteil geringer als im Norden der Nördlichen Frankenalb (MEYER 1983). Innerhalb der Sandsteine treten in verschiedenen Höhenlagen Eisenoxid-Anreicherungen auf, die z. B. im Hauptwerksandstein (Krickelsdorfer Flözhorizont) zur Flöz-bildung führen können. Untergeordnet kommen harte, oft schillreiche Kalksandsteinbänke vor. — Die einzelnen lithologischen Einheiten des Dogger Beta schwanken infolge des fortwährenden horizontalen Fazieswechsels in ihrer Ausbildung und Mächtigkeit sehr stark. Die Gesamtmächtigkeit des Doggersandsteins beträgt im Durchschnitt 60 - 70 m. Sie kann jedoch im Bereich von Schwellen bis knapp 40 m reduziert sein oder stellenweise wie z. B. im Bereich des Auerbacher Troges auf über 100 m ansteigen.

Der Obere Dogger setzt mit der Sowerbyi-Bank ein, einer harten Kalksandsteinbank mit einer Geröll-Lage im Liegenden. Darüber folgen oolithische Kalksandsteine sowie Kalke, Mergelkalke, Mergel und Tonmergel mit teilweise reichlicher Ooidführung. Abgeschlossen wird der Obere Dogger durch dunkelgraue oder graugrüne, Phosphorit führende, feste Schiefertone oder mergelige Tone. Die Gesamtmächtigkeit des Oberen Dogger nimmt innerhalb des Untersuchungsgebietes von Norden (Durchschnitt: 15-20 m) nach Süden (Durchschnitt: 5-8 m) ab. Im Gebiet um den Staffelberg (Blatt Nr. 5932: Ützing) erreicht der Dogger Gamma bis Zeta mit bis zu 32 m seine größte Mächtigkeit.

Die Dreigliederung des Dogger-Schichtpaketes spiegelt sich in der hydrogeologischen Situation wider. Die mächtige, monotone Folge von Schiefertönen und Tonsteinen (Opalinuston - Dogger Alpha) an der Basis des Doggers wirkt wasserundurchlässig. Sie stellt somit die Grundwassersohle des Dogger-Grundwasserstockwerkes dar. Grundwasserleiter ist der unmittelbar darüber lagernde Eisensandstein (Dogger Beta). Obwohl die Sandsteine dieses Horizontes fest bis mürbe bzw. locker gebunden sind, gilt auch hier, daß die Anordnung und Ausbildung der Klüfte und Schichtfugen in Bezug auf ihr Wasserleitvermögen eine weitaus größere Rolle spielen als die Permeabilität des ungestörten Gesteinsverbandes (APEL 1972 b). Die Ergiebigkeit des Dogger-Grundwasserstockwerkes ist stark von der lokalen tektonischen Situation, dem Kluftvolumen und der Größe des jeweiligen Einzugsgebietes (zusammenhängendes Gebiet oder Zeugenberg) beeinflusst. So streuen die Schüttungen der Doggerquellen im allgemeinen zwischen 0,1 und <7 l/s. Ihre mittlere Schüttung liegt bei etwa 2-3 l/s. Einzelne Quellen so z. B. in Hochholz (Blatt Nr. 6535 Alfeld) oder die Wasserversorgung Stöckelsberg (Blatt Nr. 6634 Altdorf) erreichen sogar Schüttungen über 10 l/s (APEL 1974 a, 1983).

An der Grenze Opalinuston/Doggersandstein ist ein markanter Quellhorizont festzustellen. Weitere, nicht horizontgebundene Schichtquellaustritte sind über schluffig-tonigen Zwischenlagen der Sandsteinfolge zu beobachten.

Brunnen, die den Doggersandstein erschließen, sind im Untersuchungsgebiet relativ selten. Die spezifischen Ergiebigkeiten der zur Wasserversorgung genutzten Brunnen schwanken zumeist zwischen 0,3 und knapp 1 l/(s*m); die hier zugehörigen Fördermengen liegen zwischen etwa 10 und 20 l/s (APEL 1977 b, 1979, 1983). Eine bedeutend höhere spezifische Ergiebigkeit (~ 2 l/(s*m)) erreicht der nur 7,5 m tiefe Brunnen von Weismain. Möglicherweise fördert dieser, im Weismaintal gelegene Brunnen Mischwasser aus Doggersandstein und der quartären Talfüllung, die ihrerseits dort Uferfiltrat enthalten kann (APEL 1972 b).

Die tonig-mergeligen Gesteine des Oberen Doggers (Ornatenton) decken, zusammen mit Kalkmergeln des Unteren Malms, das Dogger-Grundwasserstockwerk ab. Diese Trennschicht ist jedoch bereichsweise schwach durchlässig, so daß es stellenweise zu Übertritten von Grundwasser aus dem hangenden Malm-Aquifer in das liegende Dogger-Grundwasserstockwerk kommt ("leaky-aquifer").

3.1.1.3 Malm

Die Frankenalb ist durch den Weißen Jura morphologisch besonders geprägt. Die weitflächig ausstreichenden Malmsedimente haben die Geländeoberfläche zu einem markanten Karstrelief geformt. Seine resistenten Gesteine verursachen den Steilanstieg der Jura-Schichtstufe sowie — im Zusammenwirken mit der Verkarstung — das flächige Erscheinungsbild der Malmtafel.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes erreicht der Malm seine größten Mächtigkeiten (ca. 250 m) in der Veldensteiner Mulde. Die Schichtenfolge beginnt an der Malmbasis mit Mergeln, Kalkmergeln und Mergelkalken. In den hangenden Schichten nimmt der Tongehalt zugunsten des Karbonatgehaltes sehr rasch ab. Bankige Ausbildungen verzahnen sich mit den massigen Kalk- bzw. Dolomitgesteinen der Riff-Fazies. Die obersten jurassischen Schichtglieder gehören dabei dem unteren Malm Zeta an; jüngere Ablagerungen des Malms wurden (erdgeschichtlich) später erodiert. Die fazielle Entwicklung der Malmgesteine im Untersuchungsraum ist in Abbildung 30 zusammengestellt.

Da der Malm im Untersuchungsgebiet den wichtigsten Grundwasserleiter repräsentiert, wird sein Schichtpaket im Folgenden detailliert vorgestellt:

Die geschichtete Fazies des Unteren Malm (Malm Alpha und Beta) setzt mit den Unteren Mergelkalken ein, einer Abfolge von dünngebankten Mergelkalken mit Mergelzwischenlagen. Der Ablagerungsraum wird im Unteren Malm durch die Wiesent-Riffschranke zweigeteilt. In der Feuersteinbankfolge (Nordalbfazies), nördlich der Wiesent-Riffschranke, werden die relativ geringmächtigen Mergelkalkbänke durch zahlreiche z. T. dicke Mergelzwischenlagen getrennt. Der Mergelanteil beträgt hier über 40 %. In der Hartmannshofer Bankfolge (Mittelalbfazies), die sich im Süden der Wiesent-Riffschranke anschließt, treten bei reduzierter Bankzahl mächtigere Mergelkalkbänke auf. Der Mergelanteil in der Schichtenfolge geht auf etwa 20 % zurück (MEYER 1972 a).

Über den Unteren Mergelkalken folgen die Werkkalke, wohlgeschichtete, bankige, weißgraue Kalkbänke, die nur durch wenige, geringmächtige Mergellagen voneinander getrennt sind. In der Nähe von Riffen führen die Bankkalke einen hohen Anteil an Riffschutt und können, insbesondere im Südteil, am Rande von Riffdolomiten auch dolomitisiert sein. Die Gesamtmächtigkeit der geschichteten Fazies des Unteren Malms beträgt im Durchschnitt 30 - 40 m (Tab. 3).

Bereits im Unteren Malm sind schon größere zusammenhängende Riffgebiete angelegt worden, wie der NNW-SSE streichende Fränkische Haupt-Riffzug (Hohenfels-Kastl, Hirschbach-Betzenstein), der NE-SW streichende Wiesent-Riffgürtel und das Würgau-Görauer Riff im Norden sowie der Riffast von Alfeld im Süden des Untersuchungsgebietes. Kleinere Riffareale sind bei Pegnitz-Auerbach, Vorra und südlich von Theuern festzustellen (MEYER & SCHMIDT-KALER 1989). Die Verschwammung setzt im Malm Alpha mit einzelnen Riffstotzen und kleineren Schwammrasenbänken ein. Im Laufe des Malm

Beta schließen sich die Schwammbauten zu größeren Riffkomplexen zusammen. Die grauweißen, ruppigen Schwamm-Algenriffkalke sind klotzig oder teilweise undeutlich geschichtet ausgebildet.

Die Dolomitisierung ist bevorzugt an die Riffareale gebunden. Im Nordteil des Untersuchungsgebietes (Würgau-Görauer-Riffgebiet) sind im Unteren Malm nur einzelne, eng begrenzte Bereiche der Massenfazies dolomitisiert. Massenkalk ist dort noch vorherrschend. Erst in der Wiesent-Riffschranke und den Riffarealen südlich davon gewinnt der Dolomit zunehmend größere Bedeutung. Die Riffdolomite des Malm Beta sind hart, mittel- bis grobkristallin und bilden in den Riffkernen graue, verhältnismäßig glatte Wände bzw. Absonderungsflächen (MEYER 1972 a).

Im Malm Gamma gewinnt die Riff-Fazies ausgehend von den Hauptriffzügen, insbesondere südlich der Wiesent, stark an Bedeutung. Auch innerhalb der Schichtfaziesräume überwiegen im oberen Malm Gamma, mit Ausnahme der Nordwestecke der Frankenalb (TK Nr. 5932: Ützing), nun überall Riffe (MEYER 1972 a). Die Riffareale sind hier vorwiegend dolomitisiert, Schwamm-Algenriffkalke kommen nur noch selten vor. Die hellen, grobkörnigen Gamma-Riffdolomite weisen fast ausnahmslos senkrechte Klüftung (Bretterdolomit) auf, horizontale Fugen fehlen weitestgehend (MEYER 1972 a). Im obersten Malm Gamma tritt erstmals die Biostromfazies der tafelbankigen Dolomite und Kalke auf, die im Malm Delta größere Verbreitung erlangt.

Größere Schichtfazies-Räume befinden sich im Malm Gamma noch zwischen der Wiesent-Riffschranke und dem Würgau-Görauer Riffareal, nördlich des Würgau-Görauer Riffes, am Ostrand der Alb (Pegnitz, Vilsecker Mulde, Theuern-Sulzbach-Rosenberg), am Westrand der Alb (nördlich des Alfelder Riffes bis Gräfenberg) sowie bei Pottenstein, Bronn und Plech (MEYER & SCHMIDT-KALER 1989).

Das Gebiet südlich der Wiesent gehört im Mittleren Malm zum kalkreichen Fränkischen Faziesraum, in dem Kalke, Mergelkalke und Mergel abgelagert wurden. Nördlich der Wiesent-Riffschranke ist der Mittlere Malm in mergelreicher schwäbischer Fazies ausgebildet, wobei in die vorherrschenden Mergel nur untergeordnet Mergelkalke und dünnere Bankkalke eingelagert sind (MEYER & SCHMIDT-KALER 1989).

Im Malm Delta überwiegen dunkle, vorwiegend schmutzig-graue Riffdolomite, die immer wieder horizontale oder kuppelförmige Absonderungsflächen zeigen (MEYER 1972 a). Außerdem treten Schwamm-Algenriffkalke sowie tafelbankige Dolomite und Kalke auf. Im Verlauf des oberen Malm Delta wird die Schichtfazies dieser Räume fast völlig durch die Schwammfazies (Bioherm und Biostrom) verdrängt. Die Kalke und Dolomite des Malm Delta erreichen eine Gesamtmächtigkeit bis ca. 100 m.

Im Malm Epsilon treten die Schwamm-Algenriffe wieder zurück. Die hellen, meist grauweißen Epsilon-Riffdolomite zeigen vorwiegend senkrechte Klüftung (Bretterdolomit). Die von Riffen eingeschlossenen Wannen (Wattendorfer Wanne, Großziegenfelder Wanne, Wiesentfölscher Wanne, Bronner Wanne, Poppberger Wanne, Gebiete um Theuern) enthalten helle, leicht bituminöse, feinkörnige Bankkalke, die an der Basis und an den Wannenrändern teilweise dolomitisiert sind. Südlich der Wiesent ist die Schwammrasenfazies der tafelbankigen Dolomite und Kalke weit verbreitet. Sie unterscheiden sich von den tafelbankigen Dolomiten und Kalken des Malm Delta außer durch ihre weite, regelmäßige Verbreitung auch durch dünnere und gleichmäßigere Bankung sowie stärkere Verkieselung (MEYER 1972 a). Stellenweise sind Riffschuttkalke mit gelegentlich eingeschalteten groben Fossilschuttbänken zu beobachten.

Im unteren Malm Zeta werden die Bankkalke in der Bronner- und in der Poppberger Wanne durch die Fazies der Platten- und Bankkalke abgelöst. Die Riff-Fazies sowie die tafelbankigen Dolomite und Kalke reichen stellenweise ebenfalls bis in den unteren Malm Zeta (MEYER & SCHMIDT-KALER 1989).

Tabelle 3 a: Schichtmächtigkeiten (zusammengestellt aus den Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000 - Nordteil)

Mächtigkeit (m)	Üzing	Weismain	Scheßlitz	Hollfeld	Mistelgau	Buttenheim	Muggendorf	Waischenfeld	Forchheim	Ebermannstadt
Kreide Michelf. Sch.	2	15	—	20	—	20	20	—	—	—
Malm ζ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Malm ε	—	—	—	15	—	—	—	—	—	Max: 50 / Ø 10
Malm δ	—	mind. 80	>43	80-100	—	90-95	90-100	—	19	110
Malm γ	—	—	29-35	—	—	40	50-55	—	18	35-60
Malm α+β	28	23,5-28	35-40	35-50	32	47-50	—	22-30	—	—
Malm β	—	11-14,5	20	—	—	21	14-15	—	15	13-15
Malm α	—	12,5-14	18	—	—	26,5	25-34	—	27-45	17-31
Dogger γ-ζ	19-32	13-22	23,5	—	12	8-16	15-20	12	15	15-17
Dogger β	55-67	50-70	55-70	—	70-80	64-78	50-55	60-80	50-70	55
Dogger α	50-60	50-60	70	—	70-85	65-80	—	55-65	45-100	45-90

Tabelle 3 b: Schichtmächtigkeiten (zusammengestellt aus den Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000 - Südteil)

Mächtigkeit (m)	Pottenstein	Pegnitz	Gräfenberg	Beizenstein	Auerbach	Hersbruck	Pommelsbrunn	Sulzbach-Rosenberg Nord	Happing	Allfeld	Sulzbach-Rosenberg Süd
Kreide (ges.)	15	—	—	—	—	—	—	—	bis 80	—	—
Malm ζ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Malm ε	—	—	—	—	—	—	45-65	—	—	50	—
Malm δ	—	—	—	mind. 95	—	—	75-90	—	Max:100	70-100	—
Malm γ	—	21-29,5	35-40	mind. 25	22-30	20	12-30 Max: 45	—	28	—	—
Malm α+β	—	35	—	30-32 Max: 60	—	—	41; Max: 60	—	38	—	—
Malm β	—	—	16-25	18-20	26-28	23 Max: 32	18	15-20	16	17	25
Malm α	—	—	10-12	11-12	10	12/15-20	23	7-9	22	23	15
Malm (ges.)	—	—	200	230	—	—	—	0-150	160	—	—
Dogger ζ	—	—	—	4,5-6,5	—	—	—	—	3,5-9	—	—
Dogger γ-ζ	8-15	8-18	—	—	—	9	8,5-11	2-20	10	8-9,5	4-10
Dogger β	60-65	65-75; Max: 100	54-65	40-50	109	43-50	45-58	55-75	52/40	50-75	55-78
Dogger α	60	—	70-80	65	—	60-75	65	40-55	65-80	50-71	40-55

Im Malm ist ein **Grundwasser-Stockwerk** ausgebildet. Die Grundwassersohle stellt dabei der Obere Dogger (Ornatenton) zusammen mit den weiträumig wasserundurchlässigen Schichten des Malm Alpha dar. Obwohl letzterer lokal eine gewisse Wasserwegsamkeit, z. B. durch zwischen- gelagerte Kalksteinbänke aufweist, wirkt er wegen des großen Mergelanteils, selbst auch in Riffazies, weitgehend nichtleitend für das Grundwasser.

In den darüber folgenden Malmeinheiten stehen Kalk- und Dolomitgesteine sowohl in Schicht- als auch in Massenfazies in vertikalem und horizontalem Wechsel an, die durchgehend grundwasser- leitend sind. Lediglich im Malm Gamma sind in der geschichteten Fazies Kalkmergelschichten ein- geschaltet, die weit weniger wasserwegsame Klüfte und Bankungsfugen aufweisen, als die sie umge- bendenden Kalk- und Dolomitgesteine. Die Mergel-, Kalkmergel- und Mergelkalkschichten wirken sich nur hemmend auf den vertikalen Wasserdurchsatz aus. Ansonsten stellen die Malmlagerungen oberhalb der wasserstauenden Basis einen einheitlichen, unterschiedlich durchlässigen und in seiner Gesamt- heit ergiebigen Grundwasserleiter dar. Der zum Untersuchungsraum zählende Malmbereich (Seichter und Tiefer Karst) weist eine weitgehend freie Grundwasseroberfläche auf. Nur im Umfeld von Auerbach sowie in der Vilsecker Kreidemulde wird gespanntes Grundwasser angetroffen. Die gering durchlässigen Kreidesedimente reichen stellenweise (in Erosionsformen) tief in die Malmschichten hinein.

Die **Wasserführung** ist im Malm vornehmlich auf das Klufnetz in Verbindung mit den Schichtfugen der Karbonatgesteine (mit Einschränkungen auch der Mergelkalke) beschränkt. Durch Verkarstungsvorgänge wurden besonders wasserwegsame Klüfte zu Gerinnen erweitert, was u. a. den Malm zu einem Karst-Grundwasserleiter geprägt hat. – Die Verkarstung begann dort bereits während der Kreidezeit und setzte sich über die Tertiärzeit bis heute fort. Die Verkarstung schritt in den wär- meren, subtropischen Epochen der jüngeren Erdvergangenheit aufgrund der anders gearteten klimati- schen Voraussetzungen bedeutend schneller voran als heute bzw. als während der pleistozänen Kaltzeiten.

In Abhängigkeit von der **Lage der Grundwassersohlschicht** zur jeweiligen Talsohle werden Bereiche des Seichten und des Tiefen Karstes unterschieden. Im Seichten Karst streicht die Grund- wassersohle über dem entsprechenden Talboden bzw. Erosionsniveau aus, im Tiefen Karst taucht sie darunter ab. Die Tiefenlage der Grundwassersohlschicht steht in der Nördlichen Frankenalb in engem Zusammenhang mit großräumigen Verbiegungen (vgl. Kap. 2.1.2; Abb. 3 und 4).

Entsprechend dieser Einteilung gehört das Zentrum der Nördlichen Frankenalb, insbesondere die Frankenalbfurche dem Tiefen Karst an, Randbereiche zählen weitgehend zum Seichten Karst. Die Grenze Tiefer Karst/Seichter Karst verläuft im Untersuchungsraum etwa parallel zum Rand der Jura- Landstufe (Albtrauf), wobei ihr Abstand (albeinwärts) von diesem im allgemeinen zwischen ≤ 1 und 7 km, im Mittel um 4 km beträgt. Detaillierte Auskunft über die Verteilung von Seichtem und Tiefen Karst vermittelt Abb. 10.

Im Seichten Karst treten über der Grundwassersohle Schichtquellen aus; meist ist dort ein deutlicher Quellhorizont ausgebildet. Diese Quellen unterliegen starken Schüttungsschwankungen und können nach heftigen Regengüssen oder bei Schneeschmelze Eintrübung zeigen. Oberflächen- einflüsse überwiegen, weil vor allem die Karstwasser-Speicherkapazität im Seichten Karst vergleichsweise gering ist. Die mittlere Schüttung der meisten dieser Quellen beträgt weniger als 10 l/s. Dennoch wird eine Vielzahl von ihnen zur Wasserversorgung einiger am Albrand gelegener Gemeinden genutzt.

Im Seichten Karst können neben den gering schüttenden Quellen auch einige stärkere Quellen bzw. Quellgruppen beobachtet werden. Diese sind vor allem dort anzutreffen, wo Quellen zwar am Albrand entspringen, die Grundwassersohle ihrer Einzugsgebiete bzw. große Teile davon aufgrund tektonischer Ursachen aber sehr rasch unter die Vorfluter abtauchen. Die Quellaustritte können dann als Mischformen von Schicht- und Stauquellen charakterisiert werden und weisen oft ein ähnliches Schüttungsverhalten wie die Quellen im Tiefen Karst auf. Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise Quellen bei Schwabthal und Serkendorf (nahe der Achse der nördlichen Fortsetzung der Hollfelder

Mulde), Quellen NE Roßdach (bruchtektonisch abgesenkte Scholle), die Friesenquelle bei Kasendorf sowie die Quellen bei Menchau (beide liegen am Ostflügel der Hollfelder Mulde) und die Ittlinger Quellgruppe (bruchtektonisch abgesenkte Scholle). Die Mindest-Schüttungen dieser Quellen bzw. Quellgruppen betragen zwischen knapp 50 und ca. 100 l/s.

Gelegentlich werden an zwischengelagerten Ton- oder Mergelhorizonten Quellaustritte hangender Grundwasservorkommen festgestellt. Diese weisen meist nur geringe Schüttung auf und versiegen häufig in Trockenperioden. Für die Wasserversorgung sind sie unbedeutend.

Schichtquellen des Seichten Karstes sind häufig von mächtigen Schuttschürzen überdeckt. Dadurch verlagern sich die Quellaustritte talwärts. Gelegentlich tritt dieses Wasser nicht in Schuttquellen des Malms aus, sondern infiltriert in den oberflächennah aufgelockerten Doggersandstein, vermischt sich mit dem Doggerwasser und tritt als Mischwasser an der Oberkante des Opalinuston zu Tage (HEGENBERGER & SCHIRMER 1967).

Daneben können im Seichten Karst, im Schwankungsbereich der Grundwasseroberfläche zahlreiche intermittierende Quellen, sogenannte Hungerbrunnen, beobachtet werden. Die bekanntesten stellen die "Tummler" im Leinleitertal dar. So steigt die Schüttung des Großen (= unteren) Tummlers bei einer Hochwasser-Situation auf $>1 \text{ m}^3/\text{s}$ an; das Leinleiter-Trockental wird dann von einem reißenden Bach durchflossen. Weitere große intermittierende Quellen befinden sich u. a. im Klingental (W Königsfeld), im Teichgrund (N Königsfeld), in Kotzendorf, im Paradiestal (NW Treunitz), am Schwalbenstein (N Schirradorf), in Großenohe und S Thalheim.

Die Quellen des Tiefen Karstes gehören zu den Stauquellen; sie treten häufig in Quelltöpfen oder Quellweihern zu Tage (so z. B. die Stempfermühlquelle bei Behringersmühle, die Brunbergquelle in Ranna, die zur Wasserversorgung von Arnstein und Großziegenfeld genutzten Austritte oder die Weismain- und die Krassachquelle). Zum Teil infiltriert das Karstwasser auch direkt in die Vorflut bzw. in die grobkörnigen Talsedimente. Derartige Bereiche werden bzw. wurden stellenweise durch Flach- und Horizontalbrunnen erschlossen, so z. B. im Pegnitztal die Quellfassungen Mosenberg/Haselhof und Kohlmesser- sowie Seizerfassung (EWAG), im Wiesental die Wasserversorgung der Köttweinsdorfer-Gruppe und im Weismaintal die ehemalige Versorgung Rothmannsthal sowie einige Quellen an der Weihersmühle. Gelegentlich entspringen Quellen des Tiefen Karstes auch aus Klüften, geringfügig über dem Talniveau, wie z. B. die (z. T. ehemaligen) Wasserversorgungen von Velden, Hartenstein und Engenthal im Pegnitztal, die Sachsenmühlquelle im Wiesental und einige Quellen im oberen Krassachtal. Darüberhinaus strömen verhältnismäßig große Karstwassermengen in definierten Flußstrecken unvermittelt in die Vorflut, so z. B. in die Wiesent im Abschnitt Treunitz-Weiher und im Umfeld von Behringersmühle, in die Pegnitz zwischen Neuhaus und Rupprechtstegen und in den Weismain zwischen Kleinziegenfeld und Schammendorf. Einen Überblick über Infiltrations- und Versickerungsstrecken entlang der wichtigsten Gewässer der Nördlichen Frankenalb sowie über die wichtigsten Quellen vermittelt Abb. 13.

Quellen des Tiefen Karstes zeichnen sich zumeist durch vergleichsweise hohe Mindestschüttungen aus, lassen jahreszeitlich bedingte Schüttungsänderungen in verhältnismäßig geringer Schwankungsbreite erkennen und reagieren überwiegend zeitlich verzögert auf Trocken- und Naßwetterperioden. Eine Vielzahl dieser Quellen schüttet einige 10er l/s bis 50 l/s. Weiterhin erreichen einige knapp 100 l/s oder sogar mehrere 100 l/s; so beispielsweise die Quelle Haselhof/Mosenberg (EWAG, ca. 400 l/s) und die Stempfermühlquelle (ca. 600 l/s).

Obwohl der Tiefe Karst eine hohe Grundwasser-Speicherkapazität aufweist, können Oberflächeninflüsse, ganz besonders im Bereich des unbedeckten Karstes die Karstwasserbeschaffenheit mehr oder weniger stark beeinträchtigen, wie z. B. im Raum des Kleinziegenfelder (= Weismain-)Tales. Darauf weisen neben anthropogenen Indikatoren auch zeitweilige Wassertrübungen in den betreffenden Quellen hin.

Die **spezifischen Ergiebigkeiten** von Bohrungen im Malmaquifer sind von zahlreichen Faktoren abhängig wie z. B.:

- vom Kontakt zu einer ausreichend wasserwegsamem Klüftung,
- von der Intensität der Verkarstung,
- von der Lage der Brunnen in Bezug auf Zerrüttungs- bzw. Störungszonen.

Tabelle 4: Hydraulische Kennwerte ausgewählter Brunnen im Tiefen Karst (zusammengestellt aus APEL 1972 c, 1975, 1977 b und 1983 sowie Unterlagen des LfW [1977 a, 1979])

Lokalität / Maßnahme	Bohrung	Bohrtiefe [m]	Entnahmemenge [l/s]	spezifische Ergiebigkeit [l/(s*m)]	
Erkundung Nr. 5.04 Oberes Wiesental	A(3)	96	20	1,2	
		96	55	3,1	
		128	55	3,1	
	B	85	1,6	0,03	
		160	7	0,15	
		C	85	40	1,75
	145		48	2,9	
	D	85	0,8	0,01	
		E	84	25	1,4
			84	55	2,1
Erkundung Nr. 5.03 Weidensees	A(2)	173	20	0,6	
		300	32	0,9	
	C(2)	155	35	1,75	
		255	35	2,05	
	D	158	29	3	
		230	29	7,5	
WV Brunnen Treunitz		28	10	2,2	
WV Brunnen Drosendorf		35	10	2,4	
WV Sanspareil-Gr.		30	8	2,5	
WV Stechendorfer-Gr.		110	21	0,55	
WV Betzenstein	I	150	30	4,35	
WV Riegelstein-Gr.	I	150	29,7	22,5	
WV Bachetsfelder-Gr.	III	72	17,8	1,9	
WV Schwend-Poppberger-Gr.	I	69,5	11	3,85	
WV Schwend-Poppberger-Gr.	II	120	5	2,0	
WV Schmidtstadt-Gr.	I	48	6	6,0	
WV Schmidtstadt-Gr.	II	87	4	1,0	

Die spezifischen Ergiebigkeiten unterliegen dort einer recht breiten Spannweite (0,01 - 10 l/(s*m), Ausnahmen: >10 l/(s*m)). Fehlbohrungen (z. B. die Bohrung D, der Grundwasser-Erkundung 5.04 Oberes Wiesental) belegen, daß der Malm auch relativ dicht sein kann. Andererseits wurden aber auch bei einigen Bohrungen größere Karsthohlräume im grundwassererfüllten Bereich angefahren, die

somit zu sehr hohen Ergiebigkeiten führten. So erfolgte der entscheidende Wasserzutritt bei der Bohrung D der Grundwasser-Erkundung 5.03 Weidensees erst bei einer Tiefe von 154 m u. Gel. (= unter Gelände), worauf der Wasserspiegel auf 29 m u. Gel. anstieg. Die spezifische Ergiebigkeit dieses Brunnens beträgt bei einer Bohrtiefe von 230 m 7,5 l/(s*m). (LfW 1977a, 1979). Eine sehr hohe spez. Ergiebigkeit von 22,5 l/(s*m) weist beispielsweise der nördliche, 150 m tiefe Brunnen der Riegelsteingruppe auf; bei einer Förderrate von knapp 30 l/s erfolgt hier eine Absenkung von lediglich 1,3 m (APEL 1975).

Brunnen die im Seichten Karst bzw. in der Übergangszone Seichter Karst/Tiefer Karst niedergebracht wurden, erschließen zumeist Mischwasser aus dem Malm- und dem Doggergrundwasserstockwerk. Zu dieser Gruppe gehören beispielsweise der Br. II der Leinleitergruppe (E Zoggen-dorf), die Brunnen der Alfeld-Pollandener-Gruppe sowie der Br. II der Bachetsfelder-Gruppe (E Hauritz). Die spezifischen Ergiebigkeiten dieser Brunnen schwanken im allgemeinen zwischen 0,1 und 0,5 l/(s*m).

3.1.2 Kreide

Für den Zeitraum der Unterkreide wird in Nordbayern eine durchgehende Festlandsperiode angenommen. Etwa 40 Millionen Jahre lang war die Malmtafel unter einem tropisch-subtropischen Klima der Abtragung und einer tiefgründigen Verkarstung ausgesetzt. Vor dem langsam sich herauswölbenden ostbayerischen Grundgebirge entstanden langgestreckte, trogförmige Randtalzüge, die sich bei Auerbach und Sulzbach–Amberg bis >100 m tief in den Oberen Dogger einschnitten. Östlich der Alb wurde an Störungen das Hahnbacher Gewölbe herausgehoben, vom im E angrenzenden Grundgebirge wurden >1 000 m Deckgebirge abgetragen. Vor allem die eisenreichen Schichten des Doggers lieferten eisenhaltige Wässer nach Westen, die auf der Alb durch kalkreiche Karstwässer neutralisiert wurden. Das ausfallende Eisen setzte sich in Hohlformen insbesondere in den Randtalzügen ab und bildete zusammen mit Tonen und Sanden die >60 m mächtige Amberger Erzformation. Erst in der Oberkreide erfolgten vereinzelte Meeresvorstöße von Süden in einem schmalen Meeresarm bis in den Raum Bayreuth-Bamberg.

Limnisch-fluviatile Kreideablagerungen sind im Untersuchungsgebiet nur auf der Hochfläche der Nördlichen Frankenalb zumeist reliktdartig erhalten. Sie füllen Hohlformen des Malmkarstes aus und erreichen nur wenige Meter Mächtigkeit, häufig unter 1 m. Lithologisch handelt es sich um Quarzsandsteine und Sande mit tonigen Zwischenlagen (HEGENBERGER & SCHIRMER 1967; ANTONIADIS et al. 1972; MEYER 1972, 1981)

Kreidesedimente können allerdings in den tektonischen Mulden und in Randtrögen größere Mächtigkeiten erreichen. So sind beispielsweise in der Ziegenfelder Bucht, S Weismain bis zu 15 m Kreideablagerungen anzutreffen; im Zentrum der Hollfelder Mulde, SW Wiesentfels wurden bis zu 20 m kreidezeitliche Sande und Tone erbohrt (MEYER 1972). In Karsthohlformen der Veldensteiner Mulde und in den Randtrögen von Auerbach und Sulzbach–Amberg steigt die Kreidemächtigkeit auf >100 m an (MEYER 1979, 1981). Weitflächig streicht die Kreide nur in der Vilsecker Mulde aus; im Zentrum der Muldenstruktur werden Mächtigkeiten von >100 m erreicht; wenige Kilometer E Vilseck ist der Malm vollständig erodiert, die Kreide folgt dort direkt über dem Dogger.

Die Kreide-Schichtfolge beginnt im allgemeinen mit der Erzformation, einer Wechsellagerung von Ocker- und Bunttonen mit Ockererz, Brauneisenerz, im Bereich des Kartenblattes Nr. 6335 Auerbach auch Spateisenerz. Untergeordnet sind Hornsteine und Sande eingeschaltet. Über der Erzformation folgt eine limnisch-fluviatile Serie vorwiegend weißer, z. T. aber auch ockergelber bis olivgrüner und rötlicher, fein- bis grobkörniger Kaolin-Quarzsande und Feldspat-Quarzsande bzw. schwach verfestigter Sandsteine, in die bereichsweise bunte, bereichsweise feinsandige Tone eingeschaltet sind. Diese im Nord- und Mittelteil des Untersuchungsgebietes als Michelfelder Schichten (Cenoman bis Oberturon) bekannte Sedimentserie entspricht faziell den im Südteil auftretenden Schutzfelsschichten (GUDDEN & TREIBS 1964; TILLMANN & TREIBS 1967).

Während die vorwiegend marine Oberkreide im Hangenden der Michelfelder bzw. Schutzfelschichten in großen Teilen des Untersuchungsgebiets nur in Form einzelner Reliktblöcke erhalten ist, tritt im Raum von Auerbach–Amberg eine mächtige Folge mariner und untergeordnet terrestrischer Sandsteine auf (Reinhauser Schichten, Knollensand, Hornsand, Freihölser Bausand, Hiltersdorfer Sandstein, Knölling-Jedinger Sandstein, Auerbacher Kellersandstein). Dieser Sandsteinfolge (Unterturon bis Untersanton) ist eine Serie von grünen bis blaugrauen, bis zu 40 m mächtigen, glaukonitführenden Fein- oder Schluffsand und Tonen (Cardionton) zwischengeschaltet, die stratigraphisch dem Coniac zugerechnet wird (TILLMANN, TREIBS & ZIEHR 1963; TILLMANN & TREIBS 1967). Mergel (Eibrunner Mergel, Pulverturmschichten) und Kalke (Sulzbacher Kreidekalk) kommen nur vereinzelt vor und weisen geringe Mächtigkeiten auf.

Die meist inselartigen sandig-tonigen Kreideablagerungen wirken lediglich filternd für das Sickerwasser; zum Teil schirmen sie, in Abhängigkeit von Mächtigkeit, Ausdehnung und Ausbildung das Karstwasser vor schädlichen Oberflächeneinflüssen ab (APEL 1972 b). In der Veldensteiner Mulde können in Kreidesedimenten räumlich begrenzte Grundwasservorkommen beobachtet werden, aus denen insbesondere in niederschlagsreichen Perioden kleinere, häufig intermittierende Quellen entspringen (z. B. Quellaustritte und Feuchtstellen im Veldensteiner Forst).

Demgegenüber bilden in der Vilsecker Mulde Jura- und Kreidesedimente einen gemeinsamen Grundwasserleiter. In den Oberkreide-Sedimenten der Vilsecker Mulde wechseln durchlässige Sandsteine mit undurchlässigen Tonlinsen bzw. Tonzwischenschichten und mäßig bis schlecht durchlässigen Sand- und Schlufflagen horizontal und vertikal miteinander ab. In den tieferen Kreideschichten überwiegen deutlich die durchlässigen Partien, nahe der Geländeoberfläche sind die undurchlässigen und schlecht durchlässigen Lagen dominierend, so daß sich das Kreidegrundwasserstockwerk bereichsweise selbst abschirmt. Im E der Vilsecker Mulde ist der Ornatenton in der präenomanen Schichtenfolge erodiert worden. Dort liegt die Kreide direkt auf dem Doggersandstein (Bohrungen Seugast u. Kaltenbrunn). Somit ist ein natürlicher hydraulischer Zusammenhang zwischen dem Grundwasser von Dogger, Malm und Kreide hergestellt. Aufgrund der speziellen tektonischen Situation bewegt sich das Grundwasser allseitig auf die morphologische Mulde bei Vilseck zu (GLA 1989).

Mit den Grundwassererkundungen 6.01 und 6.02 Vilseck wurden die Grundwasservorkommen in der Vilsecker Mulde untersucht. In drei Bohrungen, die im morphologischen Muldentiefsten NE Vilseck niedergebracht worden sind, wurde unter abdichtenden Schichten artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen. Der artesische Auftrieb lag zwischen 0,5 und 1 bar, was bedeutet, daß sich der Ruhewasserspiegel bei 5-10 m über Gelände einstellen würde. Bei den Einzelpumpversuchen wurden maximale Förderleistungen von knapp 80 - 140 l/s, bei einem Mittelwert von knapp 100 l/s erzielt. Dies entspricht spezifischen Ergiebigkeiten zwischen knapp 2 und ca. 5 l/(s*m) (Lfw 1990).

3.2 Känozoikum

3.2.1 Tertiär

Mit dem Tertiär beginnt im Untersuchungsgebiet die zweite Abtragungsphase; in großen Teilen wird die Kreidedecke fast völlig zerstört und der Malm angegriffen. Ein bevorzugt W-E-verlaufendes, konsequent der Alabdachung folgendes Entwässerungssystem wird angelegt; das Abflußregime ist insgesamt nach S zum Molassebecken gerichtet. Im Zuge der Plattentektonik brechen parallel zum Rheintalgraben Spalten auf, in die z. T. Basalte eindringen.

3.2.1.1 Basaltintrusionen

Zwischen Hohenpözl und Kalteneggolsheim (TK 6032 Scheßlitz und 6132 Buttenheim) streichen auf einer Länge von ~6,5 km NNE-SSW- (= rheinisch-) gerichtete Basaltschlote und -gänge aus. POHL & SOFFEL (1977) geben für den Basalt E Oberleinleiter ein radiometrisches Alter von 30 Millionen Jahren (Oligozän) an. Bezogen auf ihren geologischen Rahmen spielen die Basaltintrusionen nur eine untergeordnete Rolle. So erreicht der größte Schlot E Oberleinleiter eine Ausdehnung von 200 m

Länge und 100 m Breite, die übrigen sind deutlich kleiner ($\leq 1100 \text{ m}^2$). Die Gänge werden maximal 650 m lang und sind zusammen mit ihren Nebengängchen wenige 10er Meter breit (BADER 1979).

In den Basalten bewegt sich das Wasser ausschließlich auf Klüften. Diese sind durch Abkühlungsvorgänge nach dem Aufdringen des Magmas entstanden. Die Basaltvorkommen in der Nördlichen Frankenalb sind aufgrund ihrer geringen Ausdehnung als Grundwasserleiter fast bedeutungslos; unter besonderen Bedingungen können sie allerdings einen hydraulischen Kontakt zwischen sonst getrennten Grundwasserstockwerken herstellen.

3.2.1.2 Verwitterungsbildungen

Ablehm (tertiäre und quartäre Bildungen)

Die Albhochfläche wird weitflächig von gelbbraunen Lehmen unterschiedlicher Mächtigkeit verhüllt. Der überwiegende Teil der Ablehme ist unter dem tropischen Klima des Tertiärs aus Kreide- und Malmschichten entstanden und hat sich im Quartär durch periglaziale Solifluktion mit meist sandigen Kreidesedimenten, jüngeren Braunlehmen und älteren Lößlehmen vermischt. Seltener treten unverlagerte rötliche und gelbbraune Malm-Verwitterungslehme sowie autochthone sandige Braunlehme im Verbreitungsgebiet der Kreidesande und -sandsteine auf. Mit zunehmender Abtragung der Kreide und erneuter Verkarstung des Malms im Tertiär und Quartär wanderte der Ablehm immer weiter in die Talwannen und Vertiefungen der Albhochfläche, in denen er heute bevorzugt und in größerer Mächtigkeit ansteht.

3.2.2 Quartär

Das Quartär, die jüngste und zugleich kürzeste Epoche der erdgeschichtlichen Entwicklung, begann vor etwa 2 Millionen Jahren, dauert bis heute an und teilt sich stratigraphisch in Pleistozän und Holozän. Die Grenze Holozän/Pleistozän liegt bei etwa 10 000 Jahren vor heute. Während im Pleistozän weitgehend das heutige Landschaftsbild geformt wurde, fanden im Holozän nur noch kleinräumige Veränderungen statt.

Im Pleistozän wechselten Kalt- und Warmperioden einander ab; während dieser Zeit gehörte das Untersuchungsgebiet dem eisfreien Periglazial-Bereich an. Das Gebiet war im jahreszeitlichen Wechsel verschiedenen Verwitterungs- und Umlagerungsprozessen ausgesetzt: So lockerte z. B. der Spaltenfrost oberflächennah die Gesteinsdecken; es entstanden Blockschutthalden. Durch Solifluktion (Bodenfließen) über gefrorenem Untergrund bildeten sich Fließerden und Wanderschutt. Die Zerstörung der Kreideüberdeckung und die Abtragung des Jura setzte sich fort. Teile des kreidezeitlichen Karstes wurden freigelegt, neue Karstformen entstanden.

Durch den Anschluß des Abflußregimes an ein tiefer liegendes, zum Rhein hin entwässerndes Flußsystem, an der Wende Tertiär/Quartär, schnitten sich Bäche und Flüsse in die Malmtafel ein. Dabei erreichte die Eintiefung des Mains bereits im frühen Pleistozän etwa ihr heutiges Niveau. Im Zuge dieser Tieferlegung wurden große Bergsturz-, Abschlämm-, Hangschutt- und Solifluktionsmassen in Bewegung gesetzt.

Aus Sandsteinrücken, Schotterfluren und Verwitterungsdecken wurden Sand und Staub ausgeblasen und im Windschatten von Erhebungen sowie vor den Landstufen wieder sedimentiert. So entstanden z. T. mehrere Meter mächtige Löß- (insbesondere im Albvorland / Raum Scheßlitz) und Flugsandvorkommen (v. a. N Altdorf sowie zwischen Lauf und Schnaittach). Teilweise überziehen dünne, hellgelbe Lößlehmdecken die Ablehme.

Im Vorland der Alb lagerten an den Talflanken größere Bäche und kleinere Flüsse Schotter ab, die heute relikartig erhalten sind. Demgegenüber sind Terrassenreste an den Rändern der Kastentäler in der Nördlichen Frankenalb relativ selten. Lediglich im Raum Drosendorf/Wiesentfels finden sich auf Höhenlagen um 450 m ü. NN lyditführende Schotterreste eines alten nach S entwässernden Flußsystems. Weiterhin wird das Pegnitztal auf Höhenlagen von 40-70 m über dem heutigen Talboden von den sogenannten "Urpegnitz-Schottern" sowie an flachen Hängen zwischen Rothenbruck und Pegnitz

von den "Limonitsandsteinschottern" begleitet. Die Talfüllungen der Flüsse und Bäche sind im Untersuchungsgebiet i. d. R. relativ gering und überschreiten nur selten 5 m. Lediglich im Wiesental bei Ebermannstadt erreichen quartäre Kiese bis zu 15 m Mächtigkeit.

Flugsande und sandig-kiesige Terrassenreste oberhalb des Vorflutniveaus sind meist grundwasserfrei, besitzen nur geringes Rückhaltevermögen und üben, als Deckschichten, einen bedingten Schutz für darunter befindliche Grundwasservorkommen aus. — Fließerden und Wanderschutt können, in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein, ähnlich wie der Löß, Niederschlagswasser aufnehmen und geben dieses langsam wieder ab; sie haben ein beachtliches Rückhaltevermögen. Allerdings sind Quellen, die ausschließlich aus solchen Lockergesteinen gespeist werden, selten, wobei ihre Schüttung vergleichsweise gering ist.

Pleistozäner Blockschutt und Blockmeere sowie holozäner Hangschutt können in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung bzw. der Sortierung ihrer Komponenten in unterschiedlichem Maße Wasser aufnehmen und speichern. Gelegentlich treten aus solchen Deckschichten temporäre Quellen aus. Meist verschleiern derartige Lockergesteine Quellaustritte aus dem Festgestein (z. B. an den Schichtstufen). Tonig-schluffige Deckschichten bewirken einen besseren Grundwasserschutz als sandige.

Talfüllungen sind in der Frankenalb häufig aus steinigen, kiesigen und sandigen Komponenten aufgebaut und somit relativ gut durchlässig. Das Karstwasser speist dann die Talfüllung und tritt direkt in den Vorfluter über. Andererseits kann aber auch (bei Exfiltrations-Verhältnissen) Flußwasser in den Karstwasserkörper über die Talfüllung abgegeben werden.

Ein lokal bedeutsames Grundwasservorkommen erschließen beispielsweise die im Pegnitztal gelegenen Brunnen Happurg I und II. Ihre Förderleistungen betragen 5 bzw. 6 l/s, die spezifischen Ergiebigkeiten zwischen 2,6 und 3 l/(s*m). Ein weiteres Grundwasservorkommen von überörtlicher Bedeutung befindet sich am südwestlichen Albrand (Blattgebiete 6533 Röthenbach und 6534 Happurg, Wasserversorgung Ursprung-Obermühle [EWAG]). Den Grundwasserleiter stellen hier Terrassen- und Flugsande dar, seine Sohle bilden Lias und Dogger (APEL 1977, SCHMIDT-KALER 1977).

Darüberhinaus wurde im Zuge der Grundwassererkundung "Unteres Wiesental 4.05" in der quartären Talfüllung der Wiesent zwischen Forchheim und Ebermannstadt, am Westrand des Untersuchungsraumes ein weiteres ergiebiges Grundwasservorkommen untersucht. Die Quartär-mächtigkeiten schwanken hier zwischen 8 und 16 m. Unter 1-3 m starken, meist schluffigen Deckschichten liegen überwiegend grobe Kiese. In Einzelpumpversuchen konnten in sechs Versuchsbohrungen maximale Ergiebigkeiten zwischen 26 und 34 l/s erzielt werden. Die spezifischen Ergiebigkeiten schwanken zwischen 4,9 und 23,6 l/(s*m), der Mittelwert liegt bei 11 l/(s*m). Mit Hilfe verschiedener Methoden (Pumpversuchsdaten) wurden Durchlässigkeitsbeiwerte für den quartären Aquifer bestimmt; sie betragen im Mittel ca. $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die Kiese sind somit als gut durchlässig anzusehen (LfW 1977 b).

4 Spezielle Untersuchungen im Malm-Grundwasserleiter

4.1 Geologische Bearbeitungen

4.1.1 Erstellung der geologischen Strukturkarte "Dogger/Malm-Grenze"

Die Dogger/Malm-Grenze stellt mit dem Ornament die Sohlschicht des Malm-Grundwasserleiters dar. Die Kenntnis ihrer Schichtlagerung ist somit Grundlage für weitere Bearbeitungen und Beurteilungen. Vom Untersuchungsraum lag eine großmaßstäbliche Übersicht der Lagerungsverhältnisse vor (v. FREYBERG 1969), die sich allerdings vornehmlich nicht an den Schichtgrenzen im Jura orientierte, sondern vom Keuper hochkonstruiert worden war. Zahlreiche geologische Neubearbeitungen des GLA in der Nördlichen und Mittleren Frankenalb nach Erscheinen der tektonischen Übersicht (Tab. 5) und diversen Bohrungen (insbesondere im Zuge von Grundwassererkundungs- und -erschließungsmaßnahmen) zeigten, daß die Schichtlagerungsverhältnisse im Detail komplizierter sind, als von v. FREYBERG dargestellt. Weiterhin sollte die hydrogeologische Bearbeitung aufgrund der hohen Datendichte im Maßstab 1:50 000 durchgeführt werden. Daher erschien eine Neukonstruktion einer auf die Dogger/Malm-Grenze bezogenen Strukturkarte unumgänglich.

Vor der Erstellung der Schichtlagerungskarte mußte eine Umgrenzung des Malmausstriches erarbeitet werden. Diese "abgedeckte Karte" (= Karte, die junge Deckschichten unberücksichtigt läßt) wurde aus den amtlichen Geologischen Karten (GK 25), Sonderveröffentlichungen und Archivunterlagen zusammengestellt. — In der Vilsecker Mulde sowie im Raum Kirchenthumbach liegt in Randbereichen des Untersuchungsraumes die Kreide diskordant auf dem Dogger (der Malm ist dort während der Unterkreide vollständig erodiert worden). Die Ostgrenze der Kartendarstellung schließt daher dort mit der Verbreitungsgrenze des Malms (unter Kreidebedeckung; strich-punktierte Linie) ab.

Die Schichtlagerungskarte "Dogger/Malm-Grenze" fußt vorwiegend auf dem Kartenwerk der GK 25, in Randbereichen auch auf Sonderveröffentlichungen. Wie Tabelle 5 zeigt, sind 95 % des Untersuchungsraumes im Maßstab 1:25 000 geologisch bearbeitet. Insbesondere bei den jüngeren geologischen Aufnahmen konnte auf Streichkurvenkarten zurückgegriffen werden. Allerdings wählten nicht alle Autoren den gleichen Bezugshorizont; desweiteren existieren Darstellungen mit verschiedenen Bezugshorizonten. Darüberhinaus weisen die Streichkurvenkarten sehr unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe auf.

Die so erhaltenen Erkenntnisse, verknüpft mit den für das jeweilige Kartenblatt angegebenen Mächtigkeitsangaben, wurden einheitlich auf die Dogger/Malm-Grenze bezogen. Anschließend mußten die Karten lagerichtig eingepaßt und auf den Maßstab 1:50 000 umgezeichnet werden. Gelegentlich traten Unstimmigkeiten an Bearbeitungsgrenzen auf. Sie wurden zunächst mit den jeweiligen geologischen Bearbeitungen überprüft, dann entsprechend angeglichen. — Dieses Kartenbild mußte nun mit den Ergebnissen von Bohrungen überprüft werden. Dabei erlangten vor allem jüngere Untersuchungen des LfW in der Hollfelder, Veldensteiner und Vilsecker Mulde (vgl. LfW 1977 a, 1979, 1980), aber auch Archivunterlagen des LfW und des GLA (v. a. Rohstofferkundungsbohrungen und Schürfe in den Räumen Veldensteiner Mulde-Auerbach und Sulzbach-Amberg) an Bedeutung.

Auf eine eingehende Diskussion der Basiskarte wird verzichtet, zumal sie nur die geologische Grundlage für die weiteren Bearbeitungen darstellt und ihre wichtigsten Karteninhalte bereits im Kapitel 2.1 vorgestellt wurden.

4.1.2 Tektonische Detailuntersuchungen

Wie bereits in Kap. 3 dargestellt, bilden Kluft- und Schichtfugen im Malm ein räumlich zusammenhängendes Hohlräumssystem, in dem das Karstwasser als hydraulisch einheitlicher Grundwasserleiter gespeichert werden und sich bewegen kann. Die vom Wasser bevorzugten Kluft- und Schichtfugen sind im Zuge der Verkarstung häufig zu Gerinnen erweitert worden. Zur Ermittlung bevorzugter Fließrichtungen wurden daher umfangreiche tektonische Detailuntersuchungen im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

Tabelle 5: Stand der geologischen Bearbeitung im Untersuchungsraum

TK-Nr.	TK-Name	Bearbeiter	Jahr	+o/-	Anm.
5832	Lichtenfels	---	---		R
5932	Ützing	W. HEGENBERGER, W. SCHIRMER	1967	o	
5933	Weismain	R. MEYER, G. VIOHL, H. ZORN	1972	+	
5934	Thurnau	K. REUL	1953	—	R, N
6032	Scheßlitz	P. ANTONIADIS, N. FYTROLAKIS, W. HEGENBERGER, R. MEYER, CHR. STRASSNER	1972	+	
6033	Hollfeld	R. MEYER	1972	+	
6034	Mistelgau	K. BRUNNACKER	1955	—	R
6132	Buttenheim	R. MEYER	1979	+	
6133	Muggendorf	H. GOTTWALD	1959	—	
6134	Waischenfeld	J. WIPPERN	1955	—	R
6232	Forchheim	L. KRUMBECK	1956	—	R
6233	Ebermannstadt	K. W. MÜLLER	1959	—	
6234	Pottenstein	H. J. EXLER	1957	—	
6235	Pegnitz	H. J. EXLER, B. V. FREYBERG, A. LEUBE, H. STEINLEIN	1961	—	
6236	Eschenbach	Z. T.: E. NEUPERT	1959	—	N
6333	Gräfenberg	P. DORN	1958	—	
6334	Betzenstein	F. GOETZE, W. TREIBS	1973	+	
6335	Auerbach	H. TILLMANN, W. TREIBS	1964	—	
6336	Vilseck	---	---		
6337	Kaltenbrunn	H. TILLMANN	1958	—	
6434	Hersbruck	W. HAARLÄNDER, K. H. RUPPRECHT	1961	—	
6435	Pommelsbrunn	W. TREIBS, F. GOETZE, R. MEYER	1977	+	
6436	Sulzbach-Rosenberg Nord	H. GUDDEN, W. TREIBS	1956	—	
6534	Happurg	H. SCHMIDT-KALER	1977	+	
6535	Alfeld	R. MEYER	1983	+	
6536	Sulzbach-Rosenberg Süd	H. GUDDEN, W. TREIBS	1956	—	
6537	Amberg	H. TILLMANN, W. TREIBS, H. ZIEHR	1963	—	R
6634	Altdorf b. Nürnberg	H. SCHMIDT-KALER	1974	+	R
6635	Lauterhofen	R. MEYER	1984	+	R
6636	Kastl	R. MEYER	1986	+	R
6637	Rieden	KL. DOBEN, F. HELLER	1968	o	R

Erläuterungen zur Tabelle 5:

(Erscheinungsjahr siehe Spalte "Jahr")

o: Erscheinungsjahr zwischen 1965 und 1969

N: keine Veröffentlichung des GLA

R: Nur geringe Anteile des Malm-Ausstrichs, bzw. nur geringe Anteile des Untersuchungsraumes

+: Erscheinungsjahr nach 1969

—: Erscheinungsjahr vor 1965

---: unbearbeitet

4.1.2.1 Kluftrichtungen

Die meist in sehr unregelmäßiger Verteilung vorliegenden Richtungsauswertungen von Klüften, die mehrheitlich den Erläuterungen zur GK 25 entnommen wurden, mußten durch eigene Untersuchungen ergänzt werden. Somit liegt nun ein aussagekräftiges Netz von Kluftrichtungsauswertungen des Untersuchungsraumes vor (Abb. 5). Die maximalen Abstände zwischen einzelnen Lokalitäten wurden möglichst konstant gehalten. Lediglich in der Vilsecker Mulde waren im weitflächigen Kreide-Ausbiß keine Kluftrichtungen möglich. Insgesamt sind etwa 140 Meßlokalitäten berücksichtigt; etwa die Hälfte davon wurde im Zuge dieses Projektes vorgenommen. Um ein statistisch gesichertes Ergebnis zu erhalten, wurden an jeder Lokalität mindestens 100 Messungen durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt eine generalisierte Verteilung von Haupt- und Nebenmaxima. Diese Darstellungsform wurde gewählt, um einen besseren Überblick zu erhalten. Sternförmige Signaturen weisen darauf hin, daß an dieser Stelle kein ausgeprägtes Richtungsmaximum feststellbar war.

Generell überwiegen Kluftrichtungen in herzynischer und flachherzynischer Richtung (NW-SE bis WNW-ESE). Häufig bildet die antiherzynische Streichrichtung (NE-SW) ein zweites Maximum, teilweise ist sie jedoch nur untergeordnet ausgebildet. Daneben treten, insbesondere am nordwestlichen Albrand und S Sulzbach-Rosenberg, die rheinische (NNE-SSW) sowie die eggische (NNW-SSE) Streichrichtung als örtliche Maxima auf.

Die in der Nähe von Talrändern bzw. entlang der Schichtstufe vorgenommenen Messungen lassen häufig Hauptkluftrichtungen erkennen, die mit den Richtungsmaxima des rezenten Flußnetzes (z. B. der Aufseß oder der Wiesent) bzw. dem Verlauf der Schichtstufen übereinstimmen. Diese Richtungen sind dort wahrscheinlich durch Hangentlastung [sog. "gravitative Tektonik"] verstärkt. — Rheinische Richtungsmaxima im NW des Untersuchungsraumes, insbesondere zwischen Buttenheim und Königsfeld, werden mit Scherbeanspruchungen in Beziehung gebracht, in die später Basaltintrusionen von Höhenpözl-Kalteneggolsheim eingedrungen sind (vgl. Kap. 3.2.1.1).

Die Klufflächen fallen im Malm im allgemeinen relativ steil ein (80-90°). Gesteinsspezifische Besonderheiten (z. B. unterschiedliche Ausbildung von Klüften in gebankter Fazies und in Riff-Fazies) wurden bereits in der Beschreibung des Malm-Schichtpaketes (Kap. 3.1.1.3) angesprochen.

4.1.2.2 Auswertung von Talrichtungen

Weitere Hinweise auf den regionalen, bruchtektonischen Formenschatz können die Talrichtungen, insbesondere die Richtungen der Trockentäler liefern. Daher wurden kartenblattweise (TK 25) die Talrichtungen ausgemessen. Für repräsentativ erscheinende Teilgebiete wurden zunächst Richtungsrosen erstellt (Arbeitskarten). Summendarstellungen zeigen jeweils die Richtungsmaxima für den Nord- und den Südteil des Untersuchungsraumes (Abb. 6).

Überraschenderweise überwiegen bei den Tälern ENE-WSW bis ESE-WNW-Richtungen. Nur untergeordnet kommen NW, NE und N-verlaufende Täler vor. Die etwa W-E-Täler waren bereits auf der alttertiären Landoberfläche angelegt (BIRZER 1939). Es sind verhältnismäßig flache Täler, die in weiten Wannen auf der Hochfläche ansetzen und zuerst mit geringem, später mit stärkerem Gefälle als Hängetälchen in die heutigen Flußtäler bzw. in das jüngere Trockentalsystem münden. Sie spiegeln mehrheitlich wahrscheinlich nicht den bruchtektonischen Formenschatz wider und können vielmehr als konsequente Entwässerung einer leicht nach E geneigten Landoberfläche interpretiert werden.

Die jüngeren, tief eingeschnittenen Täler weisen im Nordteil vorwiegend NW-SE- bzw. untergeordnet NE-SW-Richtungsmaxima auf. Diese Maxima entsprechen weitgehend den Kluffmaxima (auch in talfernen Lokalitäten). Eine Anlage dieser Täler entlang bruchtektonischer Schwächezonen darf daher angenommen werden. — Demgegenüber tritt im Pegnitzlauf zwischen der Stadt Pegnitz und Neuhaus die N-S-Richtung in den Vordergrund; W Neuhaus biegt der Fluß nach SW um. Beide Hauptrichtungen dieses Talsystems finden sich, wenn überhaupt, nur als Nebenmaxima in den im Umfeld ermittelten Kluffdiagrammen. Daher liegt die Vermutung nahe, daß die Entstehung des Pegnitz-

tales nicht ursächlich mit bruchtektonischen Beanspruchungen in Beziehung gebracht werden kann. — Weiterhin weisen hochgelegene quarzreiche Schotter darauf hin, daß dieser Flußlauf eine relativ alte Geschichte hat. Die Urpegnitz gehörte wahrscheinlich zu einem Flußsystem, das im Pliozän nach S entwässerte (BÜTTNER 1990). Dabei hat dieser Fluß v. a. im N ein deutlich größeres Einzugsgebiet besessen als der rezente Flußlauf.

4.1.2.3 Auswertung von Luftbildern

Verwerfungs- und Klufflinien zeichnen sich nicht nur in Talläufen, natürlichen Einschnitten und Kanten, Böschungen und in der Vegetationsverteilung ab, sie verursachen ebenfalls an tektonischen Grenzflächen unterschiedliche Bodenfeuchte oder verschiedenartige Bodenbildung. Dies läßt sich mit Hilfe differenzierter Grautöne auf Luftbildern erkennen. Die steil und senkrecht einfallenden tektonischen Elemente werden dabei bevorzugt erfaßt. Über größere Strecken durchhaltende Lineamente können als Verwerfungen, kürzere hingegen als Klüfte gedeutet werden (BODECHTEL 1969; GANGEL 1977; STREIT 1977; BÜTTNER 1989).

Vom Untersuchungsraum lagen bereits weitflächige Photolineations-Auswertungen vor (STREIT 1977); diese wurden durch eigene Untersuchungen ergänzt und zunächst kartenblattweise in Richtungsdiagrammen dargestellt. Zur besseren Übersicht sind anschließend die Ergebnisse für den Nord- und den Südteil des Bearbeitungsraumes zusammengefaßt und den Talrichtungen gegenübergestellt worden (Abb. 6).

Photolineationen streichen in der Nördlichen Frankenalb bevorzugt ENE-WSW (60-90°; dies entspricht den Talverläufen) und weniger ausgeprägt in herzynischer Richtung (NW-SE bis WNW-ESE; dies entspricht den Kluffmaxima), daneben sind eggische (NNE-SSW) und vor allem im Südteil rheinische (NNW-SSE) Komponenten festzustellen. Das Haupt-Trennfugennetz setzt sich somit genetisch aus bruchtektonischen und Talbildungs-Komponenten zusammen.

4.1.2.4 Kluffweiten-Messungen

Um einen Überblick über das nutzbare Hohlraumvolumen zu erhalten, wurden in Lokalitäten, die sich nahe der Grundwasseroberfläche befinden, Kluffweiten bestimmt. Dabei zeigte sich, daß in den meisten Aufschlüssen zwar viele Klüfte vorhanden sind, diese jedoch mehrheitlich nur Haarrisse darstellen. Häufig sind die größeren Klüfte und Fugen versintert, verlehmt oder mit Mergeln versetzt, deshalb sind nicht alle Gesteinshohlräume wasserwegsam. Diese Beobachtung muß jedoch nicht zwingend auf den grundwasserdurchströmten Bereich übertragen werden. Die an heutigen Aufschlüssen feststellbare Verlehmung kann zumindest teilweise ein Resultat des Trockenfallens (in der jüngeren geologischen Geschichte) sein.

Das Kluffgefüge kann sich, unabhängig von der Fazies kleinräumig, innerhalb weniger 10er Meter stark ändern, wie die Lokalitäten Gräfenberg und Rupprechtstegen zeigten. In den Steinbrüchen wechseln relativ dichte, kaum geklüftete Bereiche, mit vereinzelt durch Verkarstung erweiterten Kluffugen, die Öffnungsweiten bis zu 20 cm aufweisen. Im Steinbruch Gräfenberg (Fa. ENDRES) strömte aus einer ca. 15 cm breiten Spalte, die sich nur wenige Meter über der Grundwasseroberfläche auftat, im Hochsommer 1985 kalte Luft aus (Hinweis auf Karstwasseranstieg bei guter Anbindung an das Gesamt-Hohlraumvolumen). — Kluffweitemessungen an Talrändern, mit senkrecht zueinander gerichteten Meßstrecken, wiesen häufig unterschiedliche Ergebnisse auf. Allerdings war hier keine einheitliche Tendenz erkennbar.

Tabelle 6 gibt einen Überblick von Kluffweitemessungen an zwölf Lokalitäten. Die festgestellten Kluffvolumina (bezogen auf die jeweilige Meßstrecke) schwanken zwischen <0,1 und 1,7 %. Dabei wurden nur offene Kluffugen berücksichtigt. Verlehnte oder versinterte Klüfte weisen fast in jeder Lokalität Kluffweiten mit einem drei- bis vierfach höheren Wert auf. Von den in Tab. 6 aufgeführten Meßpunkten wurden nur in Gräfenberg durch Verkarstung erweiterte Spalten angetroffen.

Tabelle 6: Auswahl von Kluffweiten-Messungen in nahe der Grundwasseroberfläche gelegenen Lokalitäten

Lokalität	TK 25	Faziestyp	Richtung der Messung	Länge der Meßstrecke	Gesamtbreite der offenen Kluffugen	Kluffvolumen (%)
Kasendorf	5934	Bank-Fazies	senkrecht z. Tal	4 m	0,5 cm	0,1
			parallel z. Tal	5 m	1,8 cm	0,35
Wiesentfels	6033	Riff-Fazies		10 m	8,7 cm	0,9
Drosendorf	6033	Bank-Fazies, z. T. knaurig		7 m	2,35 cm	0,35
Brunn	6132	Massen-Fazies		4 m	1,8 cm	0,45
Veilbronn	6133	Bank-Fazies		5 m	1,9 cm	0,4
Pulvermühle	6134	Bank-Fazies		3 m	1,8 cm	0,6
Unterailsfeld	6134	Riff-Fazies		12 m	1,0 cm	0,1
Beringersmühle/Doos	6233	Bank-Fazies		4 m	0,8 cm	0,2
				10 m	4,0 cm	0,4
Egloffstein	6233	Bank-Fazies		4 m	2,45 cm	0,6
Pottenstein	6234	Riff-Fazies	senkrecht z. Tal	0,75 m	0,5 cm	0,7
			parallel z. Tal	6 m	0,3 cm	0,05
Hammermühle	6333	Bank-Fazies		4,5 m	7,2 cm	1,6
Gräfenberg	6333	Bank-Fazies	Richtg. 35°	11 m	9,5 cm	0,85
			Richtg. 125°	18 m	30 cm	1,7

Aufgrund der bereits erwähnten Einschränkungen stellt sich die Frage, wie repräsentativ - in Bezug auf das gesamte Hohlraumvolumen des Karstgrundwasserleiters - diese Werte überhaupt sind. Denn einerseits dürfte sich der überwiegende Wasserdurchsatz über verkarstete Bereiche (geweitete Spalten und Höhlen) vollziehen, andererseits sind im Grundwasser vorwiegend offene Klüfte anzutreffen. Das Kluff-Hohlraumvolumen der unverkarsteten Bereiche kann somit im ungünstigsten Fall <1 % betragen (relativ dichte Komplexe), in bruchtektonisch beanspruchten und/oder stark verkarsteten Abschnitten bis >10 % ansteigen. Wie bereits aus der Aufstellung der spezifischen Ergiebigkeiten (Tab. 4) zu ersehen ist, erscheint die Angabe eines Mittelwertes nicht sinnvoll.

4.2 Hydrogeologische und hydrologische Bearbeitungen

4.2.1 Hydrologische Grundkarte

Um einen Überblick über die hydrologischen Verhältnisse im Malmkarst zu erhalten, wurde eine Grundkarte erstellt (Abb. 13). In dieser Darstellung sind folgende Informationen eingetragen:

- Gewässernetz
- Lage der berücksichtigten Meßstellen und Hilfspegel (zur Ermittlung des Abflußgeschehens)
- Klassifizierte Ausweisung von Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken
- Lage von Quellen und Brunnen
- Klassifizierung der Quellschüttungen bzw. Fördermengen von Brunnen
- Schüttungsverhalten von Quellen (vereinfachte Trennung perennierender und intermittierender Quellaustritte)

- Für die Trinkwasserversorgung genutzte Brunnen/Quellen
- Für öffentliche Wasserversorgung oder für private Zwecke (Brauchwasser, Wasser für Brauzwecke etc.) genutzte Brunnen.

4.2.1.1 Klassifizierte Ausweisung von Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken

Grundlagen

Im Regelfall bewegt sich das Grundwasser vom Aquifer zur Vorflut bzw. gelangt in die Talfüllung; nur gelegentlich geben auch die Flüsse Wasser in den Untergrund ab (Infiltration). Die Menge des Grundwasserzulaufs kann auf unterschiedlichen Flußabschnitten stark variieren. Sie hängt u. a. vom Potentialgefälle, von der Grundwasserneubildungsrate, von den Wasserwegsamkeiten im Talbereich sowie von der Größe des unterirdischen Einzugsgebietes der betrachteten Flußstrecke ab.

Um einen Überblick über das Abflußgeschehen im Untersuchungsgebiet zu erhalten, haben das GLA und die örtlichen WWÄ (insbesondere WWÄ Bamberg, WWÄ Bayreuth und WWÄ Amberg) zwischen 1984 und 1993 Trockenwetterabflußmessungen an den Flüssen und an größeren Bächen durchgeführt. Außerdem fanden die mittleren Niedrigwasserabflüsse (berechnet nach der Methode von KILLE [1970]) der amtlichen Abflußmeßstellen Eingang in diese Berechnung. Die Daten hierfür erhielt das GLA vom LfW. — Daneben wurde versucht, den Grundwasserzutritt auf Teilstrecken zu ermitteln. Hierfür mußten Detailuntersuchungen vorgenommen werden. Daher hat das GLA zusammen mit den WWÄ Bamberg und Bayreuth im Nordteil der Frankenalb während definierter Zeiträume (Trockenwetter-Stichtagsmessungen) engmaschig, d. h. jeweils im Abstand weniger Kilometer, die Abflüsse gemessen.

Neben den verschiedenartigen Exfiltrationsraten wurden Einflüsse stark schüttender Quellen bzw. Quellgruppen auf das Abflußgeschehen berücksichtigt. Für Flußstrecken mit hohem Zufluß aus Quellen wurde der verbleibende Grundwasserzufluß gesondert berechnet.

Die so erhaltenen Mengenangaben beziehen sich jeweils auf die Länge des Flußabschnittes und werden als Exfiltrationsraten in der Einheit $l/(s \cdot km)$ angegeben. Es handelt sich dabei nicht um tatsächliche Spenden, sondern um eine Wassermenge, die pro Kilometer Flußstrecke anströmt. (Ist der Referenzabschnitt >1 km, so ist die anzunehmende Wassermenge entsprechend höher und umgekehrt.) Diese Darstellungsform wurde gewählt, da sie es ermöglicht, einen Mittelwert über eine Strecke anzugeben, zumal vielfach die exakten Exfiltrationsbereiche nicht bekannt sind. Für die zeichnerische Darstellung wurden die ermittelten Grundwasserzuläufe anschließend zu sechs Wertebereichen zusammengefaßt:

- Infiltration : $<0 l/(s \cdot km)$
- Exfiltration : $0-10 l/(s \cdot km)$, $10-25 l/(s \cdot km)$, $25-50 l/(s \cdot km)$, $50-100 l/(s \cdot km)$, $100-500 l/(s \cdot km)$.

Diese relativ grobe Abstufung trennt einerseits markante Größenordnungen, verleitet andererseits aber nicht zu einer Überinterpretation der Werte.

Ergebnisse

Die Flüsse üben fast ausschließlich Vorflutfunktion auf das Malmkarst-Grundwasser aus, lediglich im mittleren Wiesental zwischen Hollfeld und Plankenfels, sowie in Teilen der Vilsecker Mulde finden meßbare Versickerungen statt.

Nordteil des Untersuchungsgebietes (Abb. 13 a)

Die nach Norden entwässernden Flüsse zeigen i. a. hohe Exfiltrationsraten zwischen 25 und $500 l/(s \cdot km)$. So strömen dem Weismain streckenweise $100-500 l/(s \cdot km)$ zu; Krassach und die Döberten erhalten ebenfalls zwischen 100 und $500 l/(s \cdot km)$. Der hohe Grundwasserzulauf im Quellbereich dieser Flüsse ist, ebenso wie die teilweise extrem hohen Exfiltrationsraten im Weismaintal einerseits auf lokal sehr gute Wasserwegsamkeiten, andererseits auf ein Anschneiden der Hollfelder

Mulde durch die entsprechenden Vorfluter zurückzuführen. Demgegenüber weist die nach S zur Wiesent gerichtete Kainach, mit Ausnahme ihres Oberlaufes relativ geringe Grundwasserzuläufe auf.

Im Oberlauf der Wiesent liegt zwischen Steinfeld und Hollfeld die Exfiltrationsrate zwischen 25 und 100 l/(s*km). Südlich Hollfeld und N Plankenfels, im Zentrum der Hollfelder Mulde gibt die Wiesent auf einer Strecke von ca. 6,5 km Wasser an den Untergrund ab. Sie schneidet hier nur flach in den Malmkarst ein; im Talgrund entspringen kaum Quellen. Unterhalb der Versickerungsstrecke exfiltriert das Karstwasser wieder mit 25-100 l/(s*km) in den Vorfluter. Bei Gößweinstein ist im Umfeld der Stempfermühlquelle auf einer knapp 1 km langen Flußstrecke ein sehr starker Grundwasserzulauf festzustellen.

Die Aufseß erhält im Oberlauf einen Grundwasserzufluß von 10-25 l/(s*km), wobei dem Fluß auf kurzen Abschnitten verhältnismäßig große Wassermengen zuströmen können (100-500 l/(s*km)). Im Mittellauf exfiltrieren 25-100 l/(s*km), vor der Mündung in die Wiesent jedoch nur noch <10 l/(s*km) in das Flußbett der Aufseß. Der geringe Grundwasserzulauf im Mündungsbereich ist vermutlich auf die starke Vorflutwirkung der Wiesent zurückzuführen.

Die von E auf die Nördliche Frankenalb übertretenden Flüsse (Truppach, Schmierbach, Ailsbach) weisen nur geringe Grundwasserzuläufe (0-25 l/(s*km)) auf. Das Grundwasser strömt wahrscheinlich im N (Truppach, Schmierbach) direkt zur Wiesent, im S (Ailsbach) teils zur Wiesent, teils zur Püttlach. Demgegenüber ist bei Püttlach und Weiherbach ein relativ hoher Grundwasserandrang von 25-100 l/(s*km) festzustellen. Beide Flüsse schneiden den Nordrand der Veldensteiner Mulde an.

Die kleinen, zum Westrand der Nördlichen Frankenalb entwässernden Bäche, deren Einzugsgebiete fast ausschließlich im Seichten Karst liegen, erhalten häufig nur geringe Grundwasserzuflüsse (<10 l/(s*km)). Dies ist mit der allgemein niedrigen Grundwasserneubildung im Seichten Karst (geringere Speicherkapazität) zu erklären. Stellenweise sind allerdings auch hohe Grundwasserzuflüsse, wie z. B. im Ursprungsgebiet des Leinleiterbaches festzustellen.

Südteil des Untersuchungsgebietes (Abb. 13 b)

Für die Pegnitz ergibt sich oberhalb der Abflußmeßstelle Neuhaus, im Bereich der Veldensteiner Mulde, ein relativ geringer Grundwasseranstrom von nur 25-50 l/(s*km) und streckenweise von 50-100 l/(s*km). Im Flußabschnitt Neuhaus-Rupprechtstegen wurde für die Pegnitz hingegen ein hoher Grundwasserzufluß (100-500 l/(s*km)) ermittelt. Im Vergleich dazu erreicht die Veldensteiner Mulde mit ihrer hohen Grundwasser-Speicherkapazität statt einer deutlich höheren sogar eine niedrigere Exfiltrationsrate in der Flußstrecke Neuhaus-Rupprechtstegen. Für diese Diskrepanz gibt es zwei Erklärungsmöglichkeiten:

1. Ein Teil des Pegnitz-Flußwassers versickert durch im Talbereich ausgebildete Klüfte im Nahbereich der Abflußmeßstelle Neuhaus, so daß diese unterströmt wird.
 2. Im Flußabschnitt oberhalb der Abflußmeßstelle Neuhaus infiltriert ein Teil des Flußwassers seitlich in weitreichende Kluft- und Hohlräume. In diesen Hohlräume systemen umfließt das Wasser die Abflußmeßstelle Neuhaus weiträumig und exfiltriert erst weiter flußabwärts wieder in die Pegnitz.
- Aufgrund der im Gelände gemachten Beobachtungen wird die zweite Theorie als die wahrscheinlichere angesehen.

Der östlich in die Pegnitz mündende Flembach weist einen Grundwasserandrang von 25-50 l/(s*km) auf. In den Speckbach exfiltrieren vor dem Zusammenfluß mit dem Flembach nur 0-25 l/(s*km). Beide Bäche weisen nur eine bedingte Vorfluter-Funktion auf; der Grundwasserstrom ist hier wahrscheinlich vorwiegend zum Hauptvorfluter Pegnitz nach SE gerichtet.

In der Vilsecker Mulde sind im Kreideausstrich die Grundwasser-Exfiltrationsraten relativ gering. Altbach, Sigraser Bach, Ebers-Bach und Frankenohe weisen auf ihrer gesamten Fließstrecke nur einen Grundwasserzulauf von 0-10 l/(s*km) auf. Dem Auerbach und seinen Nebenbächen fließen

10-25 l/(s*km) Grundwasser zu. Nur im Quellbereich dieser Bäche treten z. T. hohe bis sehr hohe Grundwasserzuflüsse auf (50-500 l/(s*km)). Die Quellen und Exfiltrationsstrecken im Oberlauf dieser Bäche können dem Typus der Stauquellen zugerechnet werden. Das Grundwasser tritt an der Westflanke der Muldenstruktur aus, weil sich in ihrem Zentrum schlechter durchlässige Kreidesedimente tief in den Malm eingeschnitten haben. — Stark wechselnde Zuströme erhält die Vils; während die Exfiltrationsrate in ihrem Quellbereich sowie zwischen Vilseck und der Dogger/Malm-Grenze 10-25 l/(s*km) beträgt, sinkt sie E der Abflußmeßstelle Gressenwöhr auf 0-10 l/(s*km) ab. Zwischen den Abflußpegeln Gressenwöhr und Vilseck findet demgegenüber ein relativ hoher Grundwasserzustrom (50-100 l/(s*km)) statt. — Die Bäche erhalten im Zentrum der Vilsecker Mulde nur einen geringen Grundwasserandrang, da sie in sandig-tonigen Kreidesedimenten, die oberflächennah nur geringe Grundwassermengen führen, verlaufen. Die relativ hohe Grundwasser-Exfiltrationsrate der Vils zwischen Gressenwöhr und Vilseck dürfte auf gut durchlässige Bereiche im Flußbett zurückzuführen sein.

Der von E den Untersuchungsraum erreichende Eiselbach sowie der Mühl- und Schlierbach, welche sich bei Oberreinbach zum Reinbach vereinigen, erhalten nur geringe Grundwasserzuflüsse aus der Kreidebedeckung (0-25 l/(s*km)). Bis Mittelreinbach ist für den Reinbach ebenfalls nur ein geringer Grundwasserandrang (0-10 l/(s*km)) aus den Kreidesedimenten festzustellen. Ab Mittelreinbach verläuft er auf der Malmoberfläche, ohne Anschluß zum Malmkarst-Grundwasserleiter zu gewinnen und versickert infolgedessen auf der Strecke Mittelreinbach-Kirchenreinbach.

Der Rosenbach, der durch die Vereinigung des periodisch Wasser führenden Klafferbaches und des Erlbaches gebildet wird, erhält bis Sulzbach-Rosenberg ebenso wie seine Quellbäche nur einen geringen Grundwasserzufluß aus der Kreidebedeckung (0-10 l/(s*km)). Flußabwärts von Sulzbach-Rosenberg schneidet sich der Rosenbach tiefer in die Malmtafel ein und gewinnt Anschluß zum Malmkarst-Grundwasserleiter, was durch eine deutlich höhere Grundwasser-Exfiltrationsrate von 50-100 l/(s*km), teilweise sogar 100-500 l/(s*km) dokumentiert wird. Umgekehrt dazu verhält sich der Ammerbach. Er entspringt im Tiefen Karst bei Ammerthal und weist dort eine hohe Grundwasser-Exfiltrationsrate (50-100 l/(s*km)) auf. Bei Rammertshof fließt er in der Kreidebedeckung und verliert somit die Vorflutfunktion für das Malmkarst-Grundwasser. Infolgedessen sinkt der Grundwasserandrang auf dem Flußabschnitt Ammerthal-Amberg zunächst auf 10-25 l/(s*km) und schließlich auf <10 l/(s*km). Erst bei Amberg steigt der Grundwasserzulauf wieder auf 10-25 l/(s*km) an. — Der Fiederbach, ein Seitenbach des Ammerbaches, fließt bis zu seiner Mündung in der Kreideüberdeckung. Sein Grundwasserzufluß beträgt deshalb nur 0-10 l/(s*km). — Die Vils, die bei Amberg wieder in das Untersuchungsgebiet eintritt, stellt hier, mit Exfiltrationsraten von 50-100 l/(s*km), den Hauptvorfluter für das Malmkarst-Grundwasser dar.

Die Flüsse, die auf der Frankenalb entspringen und zum Albwestrand hin entwässern, weisen im S des Untersuchungsgebietes unterschiedliche Grundwasserzuläufe auf. Bäche, denen ausschließlich aus dem Seichten Karst Grundwasser zuströmt, erhalten meist nur geringe Zuflußmengen (0-25 l/(s*km)). Davon zeigen einige jedoch hohe Grundwasserzuflüsse (50-500 l/(s*km)), so z. B. Thosbach, Großnoher Bach, Sittenbach, Harnbach und Traunfelder Bach. Dies ist im wesentlichen lokal auf besonders gute Grundwasserwegsamkeiten und Speicherfähigkeiten im Untergrund zurückzuführen.

Die Bäche, deren Einzugsgebiete sich überwiegend im Tiefen Karst erstrecken, erhalten allgemein deutlich höhere Grundwasserzuflüsse (25-500 l/(s*km)); z. B. Trubach, Hirschbach, Högenbach, Albach, Etzelbach, Naifer Bach, Ittlinger Bach).

4.2.1.2 Klassifizierung der Quellschüttungen bzw. Fördermengen der Brunnen

Grundlagen

Informationen über Quellschüttungen wurden zunächst aus der Literatur (z. B. Erläuterungen zur GK 25) sowie aus Archivmaterial des LfW, der WWÄ und des GLA zusammengestellt. Mit Schüttungsmessungen, vorwiegend während Trockenwetterphasen durchgeführt, wurde anschließend das Schüttungsverhalten der größeren Quellen überprüft.

Angaben über Förderraten von Brunnen lieferten vorwiegend die Archive des LfW bzw. der WWÄ; z. T. wurden diese Daten auch aus der Literatur (z. B. Erläuterungen zur GK 25) entnommen. In unsicheren Fällen wurden Befragungen vor Ort durchgeführt. Die in der Karte dargestellten Fördermengen stellen eine über 24 Stunden ermittelte Dauerförderung dar. Sie wurden aus den jeweiligen maximal zulässigen Tagesfördermengen berechnet. Diese Umwandlung erschien sinnvoll, um die Brunnen-Ergiebigkeiten gleichwertig mit den Quellschüttungen in einer Abbildung darstellen zu können. Zur Klassifizierung der Fördermengen bzw. Quellschüttungen wurden sechs Größenordnungen gewählt und zwar:

<10 l/s, 10-25 l/s, 25-50 l/s, 50-100 l/s, 100-500 l/s, >500 l/s.

Große intermittierende Quellen (Tummler) sind mit einer besonderen Signatur (unterbrochene Kreise) in der Karte dargestellt.

Ergebnisse

Die Tendenzen der Quellschüttungs-Darstellung entsprechen weitgehend den Erkenntnissen, die bei der abschnittswisen Klassifizierung der Grundwasserzutritte gemacht wurden. Daher wird auf eine eingehende Diskussion verzichtet, die Ergebnisse werden kurz zusammengefaßt:

- Im Seichten Karst überwiegen geringschüttende Quellen (<10 l/s), wenngleich auch hier einige Ausnahmen bestehen (z. B. Leinleiter-Quelle, Quelle an der Thosmühle, Quellgruppe Großenöhe).
- Im Tiefen Karst treten vornehmlich mittelgroße Quellen zu Tage. Dabei sind Flußstrecken, in denen größere Exfiltrationsraten festgestellt wurden, häufig gepaart mit größeren Quellaustritten. Manchmal verteilt sich allerdings die Wassermenge auf eine Vielzahl mittelgroßer und kleinerer Austritte. Größere Quellaustritte können mit erhöhten Durchlässigkeiten und bevorzugten Fließwegen in Beziehung gebracht werden.
- Die beiden größten Quellen im Untersuchungsraum sind die Stempfermühlquelle mit einer Mindestschüttung von ca. 600 l/s und die Fassung Haselhof, die mit ≥ 400 l/s der EWAG zur Versorgung der Stadt Nürnberg dient. Beide Quellen liegen an den Rändern der Veldensteiner Mulde, die Stempfermühlquelle an ihrem NW-, die Quelle Haselhof am SE-Rand. Weiterhin dürften beide Quellaustritte mit bruchtektonischen Schwächezonen in Verbindung zu bringen sein.

Die Förderleistungen der Brunnen spiegeln die geologischen Strukturen wider. So liegen an den Muldenrändern meist Brunnen mit vergleichsweise niedrigen Fördermengen, in den Muldenachsen die mit relativ hohen. Die Brunnenstandorte sind weitgehend "historisch" bedingt. Die Brunnen wurden fast immer in Ortsnähe niedergebracht, um von der Wassergewinnung bis zur -nutzung möglichst kurze Strecken überwinden zu müssen (Brunnen in Randgebieten der Muldenzonen). Heute versorgen Wasserzweckverbände viele Gemeinden. Für Brunnenstandorte bevorzugt man jetzt geologisch-hydrologisch günstigere Lokalitäten, abseits der Besiedlung.

4.2.2 Karstwassermarkierungsversuche

4.2.2.1 Grundlagen

Mit Karstwassermarkierungsversuchen erkundete das GLA die hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse in Teilgebieten der Nördlichen und Mittleren Frankenalb. Die Zielsetzungen dieser Untersuchungen waren:

- die Ermittlung von Hauptfließrichtungen
- die Abgrenzung von unterirdischen Grundwasserscheiden sowie die Erkundung ihrer Lageveränderungen bei steigenden oder fallenden Grundwasserständen
- die Abschätzung von Einzugsgebieten größerer Quellen und ergiebiger Brunnen

- die Abschätzung von Oberflächeneinflüssen auf Brunnen und Karstquellen (z. B. durch Markierung von Abwässern)
- die Ermittlung von Verweildauer und Abstandsgeschwindigkeiten der jeweiligen Tracer
- die Ermittlung der etwaigen Rückgewinnungsmengen der eingegebenen Tracer (Kennwerte für die Beurteilung potentieller Schadstoffeinträge)
- die Überprüfung von Gefährdungspotentialen durch Versickerungen häuslicher Abwässer und Straßenabwässer.

Tabelle 7 zeigt die vom GLA zwischen 1983 und 1993 im Untersuchungsraum durchgeführten Karstwassermarkierungsversuche.

Aufgrund der speziellen Fragestellung nämlich der Erfassung und Bewertung grundwasserhöffiger Gebiete, beschränkte sich die Mehrzahl der Untersuchungen auf Areale des Tiefen Karstes mit mittleren bis hohen Grundwassermächtigkeiten. Daher existieren trotz der Vielzahl der Untersuchungen und einer allgemein hohen Informationsdichte Gebiete, in denen keine Karstwassermarkierungen durchgeführt wurden; hierzu gehören im N die Malmtafel zwischen dem Leinleitertal und dem Westrand der Alb sowie der Ailsbachsattel (zwischen der Püttlach und der Wiesent), im S das Umfeld des Eschenfelder Gewölbes und große Teile der sog. Hersbrucker Schweiz sowie die Vilsecker Mulde.

Teilgebiete, die bereits durch Versuche anderer Institutionen hinreichend bearbeitet worden sind (vgl. Tab. 8), wurden bei dieser großräumigen Untersuchung ausgeklammert. Hierzu zählen der südliche Tairücken des Wiesentales zwischen Gößweinstein und Moggast, die Abgrenzung der Einzugsgebiete von Wiesent und Thosbach, sowie der Höhenrücken zwischen dem Leinleiter- und dem Aufseßtal. — Allerdings fanden bei der Bewertung von externen Versuchen nur solche Berücksichtigung, die mit bewährten Tracern durchgeführt wurden (z. B. mit Salz und Fluoreszenz-Farbstoffen, nicht aber mit Geruchsstoffen, Detergenzien oder Schallimpulsen; vgl. SCHNITZER 1965, 1967; SCHNITZER & WAGNER 1967).

Während die Markierungsversuche in der Hollfelder und der Veldensteiner Mulde vornehmlich die hydraulischen Verhältnisse in diesen Muldenstrukturen untersuchen sollten, wurde mit den Farbstoff-Eingaben in den Randbereichen der Muldenstrukturen vor allem die Beeinflussung des Karstgrundwassers durch Abwassereinleitungen überprüft. Die Versuche wurden eng mit dem LfW, den örtlichen WWÄ (WWA Bamberg, Bayreuth und Nürnberg) sowie mit den größeren Wasserversorgungs-Unternehmen koordiniert. Etwa 50 % der Untersuchungen wurden im Zuge dieses Forschungsprojektes (NFA) vorgenommen, 33 % erstellte das GLA in einem Gemeinschaftsprojekt zusammen mit dem LfW, die übrigen 17 % dienten der Erkundung von Einzelprojekten (Aufträge von Kommunen und Trinkwasserzweckverbänden).

Bei den Markierungsversuchen des GLA kamen ausnahmslos Fluoreszenzfarbstoffe zum Einsatz (vgl. Tab. 7). Die Tracermengen orientierten sich an der Grundwassermächtigkeit, den zu erwartenden Verdriftungs-Geschwindigkeiten sowie an den speziellen Aufgabestellungen. Im allgemeinen wurden zwischen 0,5 und 5 kg Tracer eingegeben. Nur in Ausnahmefällen wurden über 5 kg Farbstoff eingesetzt, so z. B. bei sehr großen Grundwassermächtigkeiten (im Zentrum der Veldensteiner Mulde) oder bei der Abwasserverrieselung Hiltoltstein. — Das GLA führte stets kombinierte Grundwassermarkierungsversuche durch; das bedeutet: Es wurden verschiedene Fluoreszenzstoffe an unterschiedlichen Stellen innerhalb des gleichen Zeitraums eingegeben. Da sich diese Stoffe gleichzeitig (nebeneinander), während eines Meßvorgangs feststellen lassen, kann bei gleichem Probenahme- und Meßaufwand wie bei der Eingabe nur eines Tracers, deutlich größere Information gewonnen werden.

Tabelle 7: Auflistung der vom GLA zwischen 1982 und 1993 im Untersuchungsgebiet durchgeführten Karstwassermarkierungsversuche

Code-Nr.	Versuchsname	Auftraggeber / Projekt	Jahr	Tracer
001	Ursensollen	Gde. Ursensollen	1983	Uranin
003	Ursensollen	Gde. Ursensollen	1983	Eosin
004	Ursensollen	Gde. Ursensollen	1983	Amidorhodamin
005	Veldensteiner Mulde	NFA	1986	Uranin
006	Veldensteiner Mulde	NFA	1986	Eosin
007	Veldensteiner Mulde	NFA	1986	Rhodamin
008	Veldensteiner Mulde	NFA	1986	Rhodamin
009	Veldensteiner Mulde	NFA	1986	Amidorhodamin
010	Nördliche Hollfelder Mulde	NFA	1986	Eosin
011	Nördliche Hollfelder Mulde	NFA	1986	Rhodamin
012	Nördliche Hollfelder Mulde	NFA	1986	Uranin
013	Nördliche Hollfelder Mulde	NFA	1986	Rhodamin
014	Südliche Hollfelder Mulde	NFA	1988	Uranin
015	Südliche Hollfelder Mulde	NFA	1988	Uranin
016	Südliche Hollfelder Mulde	NFA	1988	Eosin
017	Südliche Hollfelder Mulde	NFA	1988	Amidorhodamin
018	Veldensteiner Mulde	NFA	1990	Eosin
019	Veldensteiner Mulde	NFA	1990	Rhodamin
020	Veldensteiner Mulde	NFA	1990	Uranin
021	Veldensteiner Mulde	NFA	1990	Eosin
022	Leutenbach-Egloffstein-Hundshaupten	LfW	1991	Uranin
023	Leutenbach-Egloffstein-Hundshaupten	LfW	1991	Eosin
024	Gräfenberg-Egloffstein-Betzenstein-Hüttenbach	LfW	1991	Uranin
025	Gräfenberg-Egloffstein-Betzenstein-Hüttenbach	LfW	1991	Eosin
026	Gräfenberg-Egloffstein-Betzenstein-Hüttenbach	LfW	1991	Rhodamin
027	Hollfelder Mulde / Brunnen Scherleiten	Jura-Gr.	1991	Uranin
028	Hollfelder Mulde / Brunnen Scherleiten	Jura-Gr.	1991	Eosin
029	Hollfelder Mulde / Brunnen Scherleiten	Jura-Gr.	1991	Säurerhodamin
030	Nördliche Hollfelder Mulde	LfW	1991	Uranin
031	Nördliche Hollfelder Mulde	LfW	1991	Eosin
032	Nördliche Hollfelder Mulde	LfW	1991	Rhodamin
033	Nördliche Hollfelder Mulde	LfW	1991	Säurerhodamin
034	Veldensteiner Mulde	LfW	1993	Säurerhodamin
035	Veldensteiner Mulde	LfW	1993	Rhodamin
036	Veldensteiner Mulde	LfW	1993	Eosin
037	Veldensteiner Mulde	LfW	1993	Uranin
038	Hollfelder Mulde	LfW	1993	Uranin
039	Hollfelder Mulde	LfW	1993	Säurerhodamin
040	Hollfelder Mulde	LfW	1993	Eosin
041	Hollfelder Mulde	LfW	1993	Uranin

Tabelle 8: Auflistung der in Abbildung 7 berücksichtigten, von anderen Institutionen im Untersuchungsgebiet durchgeführten Karstwassermarkierungsversuche

Code-Nr.	Versuchsname	Durchführung	Jahr	Tracer
503	Roßdach	LfW	1969	Uranin
504	Leutzdorf	SCHNITZER	1970	Kochsalz
521	Gößweinstein	FHKF	1975	Kochsalz
522	Albertshof	WALAYATI	1976	Uranin
525	Albertshof	WALAYATI	1977	Uranin
526	Albertshof	WALAYATI	1977	Rhodamin
527	Gößmannsberg	WALAYATI	1977	Uranin
528	Draisendorf	WALAYATI	1977	Rhodamin
529	Neudorf	WALAYATI	1977	Uranin
530	Draisendorf	WALAYATI	1977	Uranin
531	Morschenreuth	FHKF	1977	Kochsalz
536	Etzdorf	FHKF	1990	Kochsalz
537	Kanndorf	FHKF	1992	Kochsalz

Für die Tracereingaben wurden häufig Dolinen (punktuelle Eingabestelle) oder Trockengräben (lineare Eingabestelle) gewählt. Vielfach handelte es sich hierbei um Bereiche, an denen gezielt häusliche Abwässer oder Straßenabwässer zur Versickerung gelangten. Darüberhinaus wurde im Zuge einer speziellen Fragestellung der Tracer Uranin in der Abwasser-Verrieselung in Hiltspoltstein flächig versprüht. Hierzu war der Farbstoff in einem Becken der Kläranlage dem Abwasser beigemischt worden. — Meist wurden die Tracer oberhalb der Grundwasseroberfläche, in die ungesättigte Zone eingespeist, nur untergeordnet fand eine direkte Eingabe in das Karstgrundwasser statt (so z. B. beim Impfen der Grundwassermeßstelle C des Brunnen Scherleiten). — Vor der jeweiligen Eingabe wurde das Schluckvermögen mit einigen 100 l bis 1 m³ Wasser überprüft. Die Nachspülmengen schwankten zwischen 10 und knapp 200 m³.

Im Zuge jedes Versuchs wurden alle grundsätzlich in Frage kommenden Karstwasseraufschlüsse (Quellen, Brunnen, Oberflächengewässer) in Abhängigkeit von den zu erwartenden Fließgeschwindigkeiten beprobt. Durch Kombination mit gleichzeitigen Tracereingaben an verschiedenen Stellen ergaben sich Überlappungen und Erweiterungen der Beprobungsgebiete. Die Meßstellenanzahl schwankte in Abhängigkeit von der Gebietsgröße zwischen 20 und 60 Lokalitäten. Der Probenahmeturnus begann mit der sogenannten Nullbeprobung, i. d. R. mehrere Tage vor den Tracereingaben. An den ersten beiden Tagen nach der Farbstoffeingabe erfolgte die Probenahme an den Quellen und Bachbeprobungen in etwa 6-stündigen Abständen (an Brunnen ein- bis zweimal täglich). Daraufhin wurde eine Woche lang jede Meßstelle ein- bis zweimal täglich beprobt. Im weiteren Versuchsablauf änderte sich der Rhythmus der Probenahme meist folgendermaßen:

<u>Dauer</u>	<u>Rhythmus</u>
2-3 Wochen	jeden 2. Tag
2-3 Wochen	zweimal pro Woche
mehrere Monate	einmal pro Woche

Die Proben wurden am GLA bis 1989 mit einem Fluorimeter der Fa. JOBIN YVON, ab 1990 mit einem HITACHI-Fluorimeter (F-3010) gemessen und anschließend ausgewertet.

4.2.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind zusammen mit den Stamm- und Grunddaten, getrennt für jede Eingabestelle dokumentiert und liegen in Tabellenform am LfW und am GLA vor. Darüberhinaus hat das GLA für einzelne Versuche Berichte erstellt (GLA 1983 a,b; 1992 a-d; 1994 a,b).

Farbstoffausbreitung

Generell kann für die Farbstoffausbreitung im Malmkarst des Untersuchungsraumes folgendes Modell entworfen werden: Das markierte Wasser durchströmt zunächst den ungesättigten Bereich, wobei Teile des jeweiligen Farbstoffes vom Gestein adsorbiert und z. T. später, z. B. bei Schwankungen des Grundwasserspiegels wieder freigesetzt und abtransportiert werden. Die eingesetzten Tracer Uranin und Eosin werden im allgemeinen nur relativ schwach, Säurerhodamin und vor allem Rhodamin stärker vom Gestein adsorbiert. Im Nahbereich der Grundwasseroberfläche erfolgt im Regelfall eine annähernd laminare Verdriftung und somit ein beschleunigter Abfluß zur jeweiligen Vorflut. Dabei vollzieht sich die Ausbreitung über ein verzweigtes Netz von Klüften, Bankungsfugen und geweiteten Karstgerinnen, so daß Farbnachweise an verschiedenen Austrittstellen beobachtet werden können. Ein weiterer Teil der Tracer wird wahrscheinlich durch Dispersion, u. a. durch das Schichtfallen begünstigt, in tiefere Bereiche der jeweiligen Muldenstruktur verdriftet, was zu verzögerten Farbnachweisen führt.

Abbildung 7 gibt einen Überblick aller Tracerindikationen bezogen auf eine Zeitebene. Diese Darstellungsform erzeugt zunächst ein wirres Bild von Linien, das einer Erläuterung bedarf:

- Die Verbindungslinien zwischen den Tracer-Eingabestellen und den Punkten, an denen Indikationen erfolgten, stellen nicht die tatsächlichen Fließwege dar; es handelt sich vielmehr um die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. (Der wahre Fließweg ist unbekannt.)
- Die Karte ist als zweidimensionale Projektion von vier Ebenen, nämlich den drei Vektoren des Raumes und dem Faktor Zeit zu sehen. Eine solche Darstellung generalisiert die tatsächlichen Verhältnisse sehr stark, vermittelt aber dennoch einen Überblick.
- Der Karstgrundwasserleiter kann im Untersuchungsgebiet nicht als homogener und einheitlich mächtiger Körper angesehen werden. Vielmehr wechseln schlechter und besser durchlässige Bereiche sowie Sattel- und Muldenzonen miteinander ab. So haben fast alle Versuche gezeigt, daß es verschiedene Gruppen von Nachweisen, mit charakteristischen Verweilzeiten und Fließgeschwindigkeiten gibt, die unterschiedliche Tiefenbereiche und/oder verschiedenartige Kluff-/Karstsysteme des Malm durchströmen. So können einzelne der hier dargestellten Indikationen ein- und derselben Einspeisung mehrere Monate auseinander liegen und daher unterschiedlichste Fließwege und -zeiten repräsentieren.
- Die Erkundung von Grundwasserscheiden gehört zum Grundinventar hydrogeologischer Untersuchungen. Daher erfolgten zeitlich versetzte Einspeisungen unterschiedlicher Tracer in benachbarten Lokationen bei verschiedenen Grundwasserständen. Daraus folgt, daß die Richtungspfeile der Tracerverdriftung nicht immer dem Grundwassergefälle (Isohypsenplan) folgen und sich sogar kreuzen können. Vor allem bei der Darstellung der Muldenzonen entsteht dadurch ein scheinbar unübersichtliches Bild.

Die unterschiedlichen Linien geben Auskunft über Dauer und Konzentration der Farbnachweise. Doppelte Linien weisen auf lang anhaltende Farbdurchgänge im hohen (teils sichtbaren) Konzentrationsbereich hin. Einfach durchgezogene Linien bedeuten wiederholte Farbnachweise in deutlichen Konzentrationen während des Beobachtungszeitraumes. Gestrichelte Linien stehen für wenige Einzelnachweise, allerdings in deutlichen Konzentrationen; punktierte Linien schließlich für Einzelnachweise im Spurenbereich. Fragezeichen weisen auf unsichere Indikationen hin. Die Ziffern neben den Dreiecken (= Eingabestellen) weisen auf die Code-Nummer des entsprechenden Versuchs hin. Diese Nummern finden sich im folgenden Text in eckigen Klammern (z. B.[001]).

Abbildung 7 läßt trotz der starken Vereinfachung bereits wichtige Zusammenhänge erkennen:

- Langanhaltende, deutliche Farbkonzentrationen sind im Untersuchungsgebiet relativ selten und auf bevorzugte Bereiche beschränkt, so z. B. auf das Umfeld des Köttler Grundes [010, 011, 013, 030-033] oder zwischen Hiltoltstein und Großenohe [029]. Solche Nachweise werden im Untersuchungsraum mit guten Durchlässigkeiten zwischen der jeweiligen Farbeingabestelle und den Traceraustritten mit einem speicherfähigen Hohlraumvolumen, im Regelfall aber auch mit mittleren bis geringen Grundwassermächtigkeiten in Beziehung gebracht.
- In den Muldenzonen häufen sich wiederholte Einzel-Indikationen (keine Durchgangskurve der Tracerkonzentrationen) bis hin zum Spurenbereich, was auf die vorhandenen großen Grundwassermächtigkeiten und die daraus folgenden Verdünnungen der Farbkonzentrationen zurückgeführt wird. Ausnahmen stellen Farbeingaben direkt in das Grundwasser dar, wie beispielsweise im Einzugsgebiet des Brunnens Scherleiten [029].
- Im Norden des Untersuchungsgebietes ist eine deutliche Grundwasserscheide zwischen dem Einzugsgebiet der Wiesent und den nach N bzw. W entwässernden Bächen erkennbar [038-041]. Die Abströmung erfolgte hier v. a. nach S, was als Hinweis darauf gewertet wird, daß die Wasserscheide zum Zeitpunkt der Einspeisung (August 1993), bei außergewöhnlich niedrigen Grundwasserständen, etwas nördlich der Eingabestelle lag. Demgegenüber weisen die Indikationen des Eingabepunktes N Eichenhüll [012] eine größere Streubreite auf. Bei der im Spätsommer 1986 erfolgten Farbeingabe konnten relativ hohe Grundwasserstände registriert werden, auf Grund derer sich die o.g. Wasserscheide offenbar etwas weiter nach Süden verschoben hatte.
- Eine weitere Grundwasserscheide trennt zwischen Hubenberg und Tiefenlösau das Einzugsgebiet der Wiesent von dem der Aufseß. Bei der Ausbreitung eines Tracers können manchmal auch Berg- und Talwasserscheiden gequert werden, wenn Teilmengen des in den Tiefen Karst eingespeisten Farbstoffes durch Dispersion weit unter Vorflutniveau gelangen und dann auf tektonisch angelegten Spalten zum übernächsten Fluß, der noch tiefer in der Muldenstruktur eingetieft ist, verdriftet werden und wieder zum Vorschein kommen. So haben Karstwasseraufschlüsse im Wiesenttal positiv auf einen kombinierten Karstwassermarkierungsversuch vom Frühjahr 1988 angesprochen [014], bei dem die Tracereingabestellen auf der Hochfläche westlich der Aufseß liegen. Der Tracer hat sich also nicht gleichsinnig mit der Grundwasseroberfläche bewegt, sondern hat die Aufseß und die folgende Bergwasserscheide gequert und ist in z. T. deutlichen, länger anhaltenden Konzentrationen im Wiesenttal nachgewiesen worden. — Umgekehrt dazu verhielt sich der N der Aufseß eingespeiste Farbstoff [017], der (aufgrund zu geringer Nachspülung) erst im beginnenden Sommer in den Grundwasserleiter gelangte. Er strömte z. T. nach S, zur Aufseß, z. T. aber auch einem Nebenbach der Leinleiter zu.
- In der Veldensteiner Mulde ist zwischen dem Pegnitztal und den Einzugsgebieten der Wiesent, der Trubach und der Schnaittach eine Grundwasserscheide ausgebildet, die etwa dem Verlauf der BAB A9 folgt. Ihr Schwankungsbereich, der ca. 2 km beträgt, kann mit Hilfe der Eingabestellen Weidensees und Teufelsdoline [020/034] sowie Plech [005] und Strüthhof [037] nachvollzogen werden.
- Im Zentrum der Muldenstruktur überkreuzen sich die markierten Verbindungswege am deutlichsten. Das wird mit periodischen Grundwasserspiegeländerungen erklärt, bei denen zeitweilig räumlich verschieden angeordnete Kluftsysteme für die Karstwasserbewegung aktiviert werden.
- Auch in der Veldensteiner Mulde wurde Unterströmung des Vorfluters Pegnitz beobachtet. So reagierte beispielsweise die Quelle Rothenbruck (am westlichen Pegnitzufer) auf einen Tracer, der E Engenthal am östlichen Talhang eingespeist worden ist (GLA 1983 a). Umgekehrt zeigte die am östlichen Pegnitzufer gelegene Quellgruppe Engenthal-Hartenstein wiederholt Indikationen von Farbstoffen, die von 1986 und 1993 durchgeführten Markierungsversuchen westlich der Pegnitz herrühren [z. B. 005, 037].

- Eine außergewöhnliche Rolle spielt die Stempfermühlquelle und ihr näheres Umfeld; das Einzugsgebiet dieses Quell- und Exfiltrationsbereichs erstreckt sich nicht nur nach S, wie Untersuchungen in ihrem direkten Umfeld [536, 521, 021] vermuten lassen, sondern auch nach SE, bis zur Wasserscheide im Veldensteiner Forst. So reagierte diese Quelle und ihr Umfeld auf Einspeisungen in der Teufelsdoline (1990: [020]) und in der Kläranlage Weidensees (1993: [034]).
- Vergleicht man ältere Markierungsversuche anderer Bearbeiter mit denen des GLA, so fällt auf, daß bei den Versuchen des GLA stets mehrere Stellen, wenn auch z. T. nur kurzfristig und in geringen Konzentrationen, auf die Farbeingaben reagierten, während bei den Fremdversuchen, mit einer Ausnahme, je Versuch nur ein Farbnachweis festgestellt wurde. Wenngleich diese Untersuchungen in Gebieten mit geringerer Grundwassermächtigkeit durchgeführt wurden und entsprechend zerrüttete und/oder verkarstete Zonen ein bevorzugtes, nur in eine Richtung verlaufendes Strömen erklären könnten, so sind dafür erfahrungsgemäß eher methodische Ursachen anzunehmen:
 - Moderne Fluorimeter weisen deutlich höhere Empfindlichkeiten auf als die Meßgeräte, die in den 70er Jahren für solche Untersuchungen verwendet wurden. Somit können jetzt im Gegensatz zu früher auch Indikationen erfaßt werden, bei denen die Konzentrationen bis in den Spurenbereich verdünnt werden, so daß sich Haupt- von langzeitlichen Nebenfließwegen unterscheiden lassen.
 - Beim Einsatz von Fluoreszenzfarbstoffen werden die Untersuchungen effizienter als bei der Verwendung chemischer Markierungsmittel. Bei den früher gebräuchlichen Salzungsversuchen (Höhlenforscher, insbesondere FHKF) liegt die Nachweisgrenze für den Indikator Chlorid bei etwa $5 \cdot 10^{-5}$ g/l und im Vergleich für den Fluoreszenzfarbstoff Uranin bei ca. $5 \cdot 10^{-9}$ g/l.

Verweilzeiten und Verdriftungsgeschwindigkeiten

Die in der Nördlichen Frankenalb durchgeführten Markierungsversuche ließen erkennen, daß zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Farbstoff-Nachweisen unterschieden werden kann. Diesen Verweilzeiten sind Bereiche typischer Verdriftungsgeschwindigkeiten zuzuordnen.

Kurzfristige Indikationen erfolgen meist innerhalb weniger Tage und erreichen somit Verdriftungsgeschwindigkeiten von $>1\ 000$ m/d [= Meter pro Tag], was auf ausgeprägte Klüfte bzw. auf Karstgerinne als Bewegungsbahnen hinweist.

Zu dieser Gruppe zählen markante Tracer-Nachweise (vereinzelt bis zu Konzentrationen im sichtbaren Bereich), wie z. B. die Quelle Kotzendorf [014], die Quellgruppe Großenöhe [025], die Quelle der Wasserversorgung von Arnstein [031-033] sowie die Friesenquelle [041]. Der Gruppe gehören auch die Indikationen mit deutlichen Nachweisen (Konz. $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ g/l), wie beispielsweise in den Wasserversorgungen im mittleren Weismaintal [031-033] sowie in Gräfenhäusling [038] und in Eichenhüll [039] an. Stellenweise können kurzfristig Indikationen auch noch als Spuren festgestellt werden. Solche wurden erst bei wiederholtem Auftreten des Tracers als positiv gewertet.

Farbstoffnachweise innerhalb der ersten zwei Monate nach der Farbstoffeingabe können als mittelfristige Indikationen betrachtet werden. Derartige Nachweise werden im N des Untersuchungsgebiets mit Verdriftungsgeschwindigkeiten zwischen >80 und <800 m/d, im S mit >100 und $<1\ 000$ m/d in Beziehung gebracht. Das gekennzeichnete Wasser bewegt sich in der laminaren Strömung entlang der Grundwasseroberfläche. Etwa 60 % aller gesicherten Erstrnachweise zählen zu mittelfristigen Indikationen.

Erstrnachweise nach über zweimonatiger Versuchsdauer deuten auf ein Durchströmen tieferer Bereiche des Grundwasserleiters, wobei im Zentrum der Hollfelder Mulde die Karstwasser-Mächtigkeit über 100 m, in der Veldensteiner Mulde über 200 m beträgt. Derart langfristige Indikationen können auch dadurch verursacht werden, daß bei der Einspeisung Teilmengen des Tracers in Hohlräumen innerhalb der ungesättigten Zone hängen bleiben und erst durch spätere heftige Niederschläge bzw. durch den Grundwasseranstieg für eine Verdriftung reaktiviert werden.

Rückgewinnungsmengen

Der prozentuale Anteil der Rückgewinnungsmengen hängt von den Durchlässigkeiten im Eingabebereich sowie zwischen den Eingabestellen und den Austrittsstellen, von der Adsorption des jeweiligen Tracers an Deckschichten und Gestein sowie von der Grundwassermächtigkeit ab.

Die Vorfluter enthalten bereits ständig wechselnde Gehalte an Uranin. Dieser Farbstoff ist in Wasch- und Bademitteln als Färbungszusatz enthalten und gelangt mit den Abwässern in die Vorflut. Bei der Auswertung der Markierungsversuche konnten bei den Flußmeßstellen daher nur deutliche Überschreitungen dieser anthropogenen "Grundbelastung" berücksichtigt werden. Dies erklärt, weshalb sich in den meisten Vorflutern im Gegensatz zum Eosin und Säurerhodamin beim Uranin keine längeren Farbdurchgänge eindeutig zuweisen ließen. Uranin-Nachweise stellen sich bei den Flußmeßstellen nach Abzug der "Grundbelastung" als kurzfristige Konzentrationsspitzen dar.

Die Rückgewinnungsmengen sind in Brunnen und teilweise auch in Quellen in der Regel geringer als in Bächen, weil die Fließgewässer eine größere Wasserführung aufweisen. Außerdem können sie markiertes Grundwasser direkt aus der Talfüllung aufnehmen. Insbesondere in Gebieten mit geringen und mittleren Grundwassermächtigkeiten (vor allem im Seichten Karst sowie im Übergangsbereich Seichter Karst/Tiefer Karst) werden relativ hohe Rückgewinnungsmengen zwischen 10 und knapp 100 % erreicht. Derartige Ergebnisse erhielt bereits WALAYATI (1978) bei Untersuchungen zwischen dem Aufseß- und dem Wiesental [522, 526-530]. Dabei zeigte sich jedoch, daß die Rückgewinnungsmengen stark vom verwendeten Tracer abhängen. So betrug die Rückgewinnungsmenge bei einem Wiederholungsversuch an der selben Eingabestelle beim Uranin immerhin 86 %, beim Rhodamin lediglich 10 %. Dies ist auf die starke Adsorption des Rhodamins an das Gestein und an bindige Deckschichten zurückzuführen.

Eine weitere wichtige Rolle spielt bei der Beurteilung von Rückgewinnungsmengen in Gebieten geringer bis mittlerer Grundwassermächtigkeit die Berücksichtigung lokaler Durchlässigkeiten. So wurden beispielsweise bei Farbstoffeingaben im Raum Eichig-Köttel [030-033], bei einer Fließrichtung parallel zum Köttler Grund, Rückgewinnungsmengen zwischen 20 und 90 % erzielt. Demgegenüber erbrachte eine Einspeisung bei Bojendorf, an der Südflanke des Köttler Grundes [011,013] lediglich Rückgewinnungsmengen von ≤ 10 %. Die Abströmung erfolgt hier quer zur tektonischen Hauptbeanspruchung.

In den Muldenstrukturen erreichen die Rückgewinnungsmengen häufig nur einige Promille bis wenige Prozent der eingegebenen Tracermenge; dies kann meist mit den hohen Grundwassermächtigkeiten und den hieraus resultierenden starken Verdünnungen erklärt werden. Lediglich bei einer Farbstoffeingabe, die direkt in den Grundwasserleiter erfolgte, traten in der südlichen Hollfelder Mulde ca. 20 % des eingegebenen Tracers am Abfluß zutage [029].

Überprüfung von Gefährdungspotentialen durch Abwasser-Versickerungen

Wie bereits die Rückgewinnungsmengen und Verweilzeiten erkennen lassen, sind vor allem dort starke Beeinflussungen durch Abwasserversickerungen zu erwarten, wo kurze Verweilzeiten, gepaart mit hohen Rückgewinnungsmengen auftreten. Hierbei können Gebiete mit geringer bis mittlerer Grundwassermächtigkeit, insbesondere der Seichte Karst, als sehr sensibel angesehen werden.

Im Folgenden sind einige Beispiele hierfür angeführt:

Eingabestelle / Versuchscode	Art der Abwasser-einleitung	Bezeichnung der Tracer-Austrittsstellen	Nutzung als Wasser-versorgung (WV) zur Zeit des Versuchs
Eichig [033]	Doline	Quelle Arnstein	ja
Köttel [031, 032]	Versickerungsgräben	Quelle Arnstein	ja
Welschenkahl [041]	Versickerungsgraben / verfüllte Doline	Friesenquelle	ja
Hiltpoltstein-Süd [025]	Doline	Quellen Großenöhe	nein
Ortspitz [022]	Versickerungsgraben	Quellen d. Ehrenbürg-Gruppe	alte WV, aus hygienischen Gründen aufgelassen

Karstwasserbeeinträchtigungen durch anthropogene Einwirkungen sind überall dort anzunehmen, wo längere Farbnachweise in mittleren Konzentrationen zu verzeichnen sind. Derartige Beobachtungen wurden dort gemacht, wo sich bei mittleren Grundwassermächtigkeiten die Tracernachweise auf verschiedene Fließrichtungen verteilen; so z. B. bei der Versickerung von Straßenabwässern in einer Doline bei Roßdorf am Berg [038] (→ WV Gräfenhäusling) und im Umfeld der Versickerungen häuslicher Abwässer bei Hubenberg und Tiefenlösau [015,016,027]. Andererseits konnte ein solcher Nachweis aber auch an der sehr stark schüttenden Stempfermühlquelle festgestellt werden [021]. Die vergleichsweise niedrigen Farbstoffkonzentrationen werden hier mit der starken Verdünnung erklärt.

In Bereichen sehr hoher Grundwassermächtigkeit erfolgten überwiegend Einzelnachweise, meist nur in Spurenkonzentrationen. Wenngleich sich die Tracer hier auch in zur Wasserversorgung genutzten Quellen und Brunnen nachweisen ließen, darf man annehmen, daß sich Schadstoffeinträge in ähnlicher Weise verdünnen werden.

Weiterhin zeigten die Tracernachweise bzw. -konzentrationen, daß die Brunnen im Zentrum der Muldenstrukturen (z. B. Brunnen der Jura-, Betzenstein- und Riegelstein-Gruppe) weitgehend Wasser aus den tieferen Bereichen des Grundwasserleiters fördern und daß diese Mulden darüber hinausgehende Karstwasserreserven enthalten.

4.2.3 Generalisierte Grundwasserhöhengleichenkarte

Vom Untersuchungsgebiet lag eine stark generalisierte Übersichtskarte von STREIT (1971) vor, daneben existierten in Teilbereichen Grundwasser-Höhengleichenkarten im Maßstab 1:100 000, so z. B. für die nordöstliche Veldensteiner Mulde (SPÖCKER 1935, 1950), die Blattgebiete 5932 Ützing, 5933 Weismain, 6032 Scheßlitz und 6033 Hoffeld (APEL 1972 a-c) sowie vom Blattgebiet Kastl (BÜTTNER 1986). — Das GLA hat für den Malmkarst des Untersuchungsgebietes aufgrund umfangreicher eigener Untersuchungen den nun vorliegenden Höhengleichenplan neu erstellt. Er repräsentiert in etwa die Situation der mittleren Grundwasseroberfläche, von der bei unterschiedlichen Grundwassersituationen (Schwankungen von hohen bis niedrigen Grundwasserständen) durchaus Abweichungen zu erwarten sind.

Grundlagen:

Zur Erstellung des Grundwasser-Höhengleichenplanes wurden zunächst alle Punkte, an denen die Höhenlage des Grundwasserspiegels bekannt war, erfaßt und auf Meter über NN bezogen. Zu diesen Punktdaten zählen:

- Ruhewasserspiegel von Versorgungsbrunnen,
- Grundwasserstände von Erkundungs-, Forschungsbohrungen und Grundwassermeßstellen
- Höhenkoten der Karstquellen.

Da im Untersuchungsgebiet im allgemeinen das Grundwasser direkt in die Vorfluter übertritt (Exfiltration), wurden auch die Flußläufe zur Bestimmung der Höhenlage des Grundwasserspiegels verwendet. Durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Höhenpunkten wurden anschließend die Grundwasser-Isohypsen gezeichnet, dabei bildeten die häufig auftretenden Trockentäler ein sogenanntes "negatives Kriterium" (tiefer als ... m ü.NN). — Schließlich fanden die Ergebnisse der Karstwassermarkierungsversuche Berücksichtigung. Hierzu wurden vor allem die kurz- und mittelfristigen Tracerindikationen zur Überprüfung der Isohypsen herangezogen. (Dabei ergaben sich nur wenige Diskrepanzen zum Grundwassergleichenplan, im Gegensatz zu den längerfristigen Indikationen.) Durch die Verschneidung der Grundwasseroberfläche mit der Strukturkarte (Dogger/Malm-Grenze) konnten "grundwasserfreie Bereiche" ausgeschieden werden. Diese können vor allem entlang des östlichen Albrandes und im Eschenfeldener Gewölbe, also in tektonischen Hochgebieten, angetroffen werden.

Im E des Untersuchungsgebietes (im Umfeld von Auerbach, Königstein und Vilseck) wurde unter Berücksichtigung der lokalen Kreidemächtigkeiten die etwaige Ausdehnung gespannter Grundwasser-Verhältnisse abgegrenzt. Die Druckwasserspiegel wurden, unter Anbindung an die jeweilige freie Grundwasseroberfläche, mit einer speziellen (gestrichelten) Signatur versehen (vgl. Abb. 8).

Ergebnisse:

Der Nordteil des Untersuchungsgebietes läßt sich durch die vorwiegend NW-SE-verlaufenden Vorfluter relativ gut in einzelne Teil-Einzugsgebiete untergliedern:

- Eine parallel zum Albrand verlaufende Grundwasserscheide trennt im W den zum Albrand bzw. zum Leinleitertal gerichteten Grundwasserstrom von dem zur Aufseß bzw. Wiesent. Im N begrenzt sie die unterirdischen Einzugsgebiete von Wiesent und Weismain bzw. Krassach, im E teilt sie die der Kainach von denen der Friesenquelle, der Quellgruppe Menchau, der Lochau und des Erbachs.
- Weitere untergeordnete Grundwasserscheiden trennen im N die Einzugsgebiete von Wiesent und Aufseß sowie von Wiesent und Kainach, im S von Wiesent und Ailsbach sowie von Püttlach und Ailsbach.
- Am Albrand, vor allem im Seichten Karst, ist der Grundwasserleiter morphologisch bedingt stark gegliedert, wobei dort die Einzugsgebiete der Bäche mehr oder weniger voneinander abgegrenzt sind.

Der Südteil kann überblicksmäßig in drei Einheiten gegliedert werden:

1. Der zum Albwestrand und zum Wiesent-Püttlach-Talzug gerichtete Grundwasserstrom
 2. Das unterirdische Einzugsgebiet der Pegnitz (und ihrer Nebenbäche Flembach und Speckbach) zwischen der Stadt Pegnitz und der Gemeinde Rupprechtstegen
 3. Das zur Vils abfließende Grundwasser
- Eine Hauptgrundwasserscheide grenzt im E das Pegnitz-System von dem zur Vilsecker Mulde strömenden Grundwasser ab; westlich dieser Grundwasserscheide ist der unterirdische Abfluß zum Main-Rhein-System, östlich zur Donau gerichtet. Vom Eschenfeldener Gewölbe setzt sich diese Wasserscheide nach S fort und trennt die unterirdischen Einzugsgebiete der zur Vils entwässernden Bäche von den nach W gerichteten.
 - Eine weitere übergeordnete Grundwasserscheide besteht zwischen der Pegnitz und den Flüssen Wiesent-Püttlach, Trubach, Schnaittach und Sittenbach.

Die Gefällsverhältnisse der Grundwasseroberfläche sind vor allem an den S- und E-Flanken des Wiesent-Püttlach-Talzugs mit 2 bis knapp 3 % relativ steil. Sie schwanken an den Randbereichen der Malmtafel (überwiegend im Seichten Karst) im allgemeinen um 2 % und erreichen in den Kernzonen der Fränkischen Alb (Tiefer Karst) in der Regel 0,5 - 1 %. Die unterschiedlichen Gefällsverhältnisse sind mit verschiedenartigen Durchlässigkeiten zu erklären (Steile Gefälle sind auf relativ schlecht durchlässige Bereiche, geringe Gefälle auf gut durchlässige Gebiete zurückzuführen.).

4.2.4 Darstellung der Grundwassermächtigkeit im Malmkarst-Grundwasserstockwerk

Grundlagen

Bei der Grundwassermächtigkeitskarte (Abb. 9) handelt es sich um eine Differenzendarstellung zwischen der Grundwassersohle (Dogger/Malm-Grenze) und der Grundwasseroberfläche. Folglich nimmt diese Karte, wie bereits die Grundwasseroberfläche, Bezug auf eine mittlere Grundwasser-Situation.

Für die Erstellung der Karte wurden die Grundwasser-Höhengleichen mit den Streichlinien der Dogger/Malm-Grenze verschnitten. Die Schnittpunkte, die sich zwischen den jeweiligen 10m-Linien ergaben wurden auf eine dritte Karte aufgetragen, die Höhendifferenz für die Schnittpunkte errechnet. Somit erhielt man eine Punktkarte mit Grundwassermächtigkeits-Angaben (10m-Intervalle). Die Punkte gleicher Grundwassermächtigkeit wurden anschließend verbunden, Zwischenpunkte mußten mit Hilfe linearer Interpolation ermittelt werden. So entstand eine Linienkarte mit einer 10m-Abstufung. — Zur Erstellung der Farbrasterkarte wurden folgend Grundwasser-Mächtigkeitsintervalle gebildet:

0 - 10m, 10 - 50m, 50 - 100m, 100 - 150m, 150 - 200m, >200m.

Die Abgrenzung grundwasserfreier Gebiete wurde von der Kartendarstellung der Grundwasseroberfläche übernommen. Flächen mit ausgefülltem Farbraster weisen auf eine freie Grundwasseroberfläche, schräg gestreifte Flächen auf gespannte Grundwasserverhältnisse hin; diese Information wurde direkt aus der Grundwasser-Höhengleichenkarte übertragen.

Ergebnisse

Die Verteilung unterschiedlicher Grundwassermächtigkeiten läßt sich im Untersuchungsgebiet relativ klar in vier Abschnitte gliedern und spiegelt im wesentlichen die Grundzüge der Strukturkarte wider:

- In einem parallel zum westlichen, nördlichen und nordöstlichen Albrand verlaufenden Streifen, im Ailsbachsattel sowie im Umfeld des Eschenfelder Gewölbes schwanken die Karstwassermächtigkeiten im allgemeinen zwischen 10 und 50 m.
- Mächtigkeiten darunter (<10 m) werden vor allem entlang des Albrandes sowie auf fingerartigen, aus der Malmtafel herausragenden Inseln angetroffen.
- In den Muldenstrukturen wächst die Karstwassermächtigkeit auf über 100 m an; so z. B. ca. 140 m im Zentrum der Hollfelder Mulde bzw. ~ 130 m in der Ziegenfelder Bucht, auf ca. 230 m in der Veldensteiner Mulde, auf >150 m im Muldentiefsten der Vilsecker Mulde und auf 150 m in der Sulzbacher Delle. Die Form der tektonischen Muldenstrukturen wird von Gebieten hoher bis sehr hoher Grundwassermächtigkeit nachgezeichnet.
- Zwischen Gebieten hoher Grundwassermächtigkeiten und dem Albrandstreifen liegt ein Bereich mit Mächtigkeiten zwischen 50 und 100 m; seine W-E-Erstreckung kann weitgehend mit der jeweiligen Schichtlagerung der Grundwassersohle in Verbindung gebracht werden.

4.2.5 Abgrenzung von Tiefem Karst und Seichtem Karst sowie den überdeckten Flächen

4.2.5.1 Abgrenzung von Tiefem und Seichtem Karst (Abb. 10)

Der Einzugsbereich des Seichten Karstes ist dadurch definiert, daß die Grundwassersohlschicht über dem jeweiligen Talboden, d. h. über dem jeweils vorherrschenden Erosionsniveau ausstreicht,

wegen im Einzugsbereich des Tiefen Karstes die Grundwassersohlschicht unter die Talböden abtaucht. Um eine zusätzliche Sicherheit für den Bereich des Tiefen Karstes einzubauen (z. B. Verdünnungsfunktion bei Schadstoffimmissionen) wurde in der vorliegenden Karte die Einzugsgebietsgrenze zwischen Tiefem und Seichtem Karst dort gezogen, wo unterhalb des Talbodens noch eine Grundwassermächtigkeit von 10 m vorhanden ist, d. h. das Erosionsniveau noch 10 m über der Grundwassersohlschicht (meist Dogger/Malm-Grenze) liegt. Dieser Übergangsbereich zwischen dem Seichten Karst und dem Tiefen Karst wird bei den folgenden Betrachtungen, Bewertungen und Verschneidungen dem Seichten Karst zugerechnet.

Aus der Grundwassermächtigkeitskarte wurden zunächst die Punkte übertragen, an denen die Talböden von der 10 m Grenzlinie geschnitten werden. Von diesen Punkten ausgehend, wurde mittels der Grundwasser-Höhengleichkarte die Trennstromlinie zwischen Tiefem und Seichtem Karst eingezeichnet.

4.2.5.2 Ausweisung und Klassifizierung kreideüberdeckter Flächen

In einigen Bereichen des Untersuchungsraumes bilden die Kreideschichten großflächige und z. T. sehr mächtige Deckschichten, die den Malmkarst gegen Beeinträchtigungen von der Geländeoberfläche her wirksam abschirmen. Lokal können die Kreidesedimente sogar hängendes Grundwasser aufweisen. Erreicht die Kreideverbreitung im Bezugsraster zusammenhängend 95-100 % werden diese Bereiche als Flächen "mit Kreideüberdeckung" (vgl. Abb.10) charakterisiert. Bei 70-95 % Flächenanteil werden sie als Flächen mit "teilweise mit Kreideüberdeckung" eingestuft und bei <70 % werden sie den Flächen "ohne Kreideüberdeckung" zugeordnet, zumal sich wegen zu geringer Kreidemächtigkeiten in der letzten Kategorie keine ausreichende Abschirmung für das Karstwasser erkennen läßt.

4.2.5.3 Verschneidung Seichter Karst/Tiefer Karst und Art der Kreideüberdeckung

In einem dritten Vorgang wurden die oben dargestellten Flächeninhalte miteinander verschnitten. Für das Untersuchungsgebiet ergaben sich folgende Kombinationen:

Seichter Karst, ohne Kreideüberdeckung	Tiefer Karst, ohne Kreideüberdeckung
Seichter Karst, teilweise mit Kreideüberdeckung	Tiefer Karst, teilweise mit Kreideüberdeckung
Seichter Karst, mit Kreideüberdeckung	Tiefer Karst, mit Kreideüberdeckung

4.2.5.4 Klassifizierung der Gesamtüberdeckung

Lehmig-schluffige Deckschichten verzögern ebenfalls die Bodenpassage des Sickerwassers. Durch Adsorptionsvorgänge werden hierbei Schadstoffe abgebaut bzw. ihr Eindringen ins Grundwasser wird verringert. Daher wurden in einem weiteren Arbeitsschritt auch tertiäre und quartäre Ablagerungen (vorwiegend Alb- und Lößlehm) mitberücksichtigt. Die Verbreitung tertiärer und quartärer Ablagerungen wurde zusammen mit den Kreidesedimenten als Gesamtüberdeckung in Abb.10 (Übersignatur) dargestellt. Die Darstellung der Gesamtüberdeckung wurde aus maßstäblichen Gründen (1 : 200 000) und wegen der unzureichenden Angaben zu den Deckschichtenmächtigkeiten wie folgt klassifiziert: Gebiete mit <30 %, 30-50 %, 50-80 % und >80 %, wobei die kleinste Bezugseinheit 1 km² beträgt (Grundlagen: GK 25, GK 200, s. Tab. 5).

4.2.5.5 Ergebnisse

Der Seichte Karst tritt im Nordteil des Untersuchungsgebietes als durchschnittlich 2-4 km breiter Saum am Nord- und Westrand auf. Im Gebiet Tiefenellern-Dürrbrunn nimmt er einen größeren Raum ein und erreicht in W-E-Erstreckung eine Ausdehnung von bis zu 10 km.

Im S ist der Seichte Karst mit durchschnittlich 3-6 km etwas breiter und wird vornehmlich am westlichen Albrand angetroffen. Er nimmt insbesondere dort größere Flächen ein, wo Flußtäler weit in die Malmtafel eingreifen (so z. B. um Egloffstein). Auffällig ist ein schmaler Sporn, der E Artelshofen, in ENE-Richtung verlaufend, beinahe bis zum Eschenfelder Gewölbe reicht. Eine weitere spornartige Ausbuchtung findet man E Pommelsbrunn. Im Günching-Hausener Sattel reicht der Seichte Karst in einem etwa 5 km breiten Band bis zur Lauterach.

Am Albostrand kommen nur einzelne kleine Gebiete mit Seichtem Karst vor. Einerseits nimmt die Mächtigkeit der Malmgesteine aufgrund des steil einfallenden Ostflügels der Frankenalbfurche sowie der am Ostrand der Nördlichen Frankenalb auftretenden Störungszonen zum Muldenzentrum hin rasch zu, andererseits haben sich die auf die Malmtafel übertretenden Flüsse nicht mehr allzu stark in die Malmschichten eingeschnitten.

Der Seichte Karst ist zum größten Teil nicht oder nur unvollständig mit Kreidesedimenten bedeckt. Nur einige kleine Bereiche im S weisen Kreide-Teilbedeckung, am Rande der Vilsecker Mulde auch Bedeckung auf.

Der Tiefe Karst nimmt die Kernzone des Untersuchungsgebietes ein und ist nur spärlich bis kaum mit Kreideablagerungen bedeckt. Die einzelnen Gebiete mit Kreide-Teilbedeckung treten innerhalb der Hollfelder Mulde, zwischen Auerbach und Betzenstein sowie im Gebiet des Veldensteiner Forstes und des Herzogwaldes auf. Darüberhinaus ist in der Vilsecker Mulde, mit Ausnahme von Teilbereichen ihrer Randzone, eine vollständige Kreide-Überdeckung erhalten geblieben.

5 Hydrogeochemische Beurteilung der Grundwässer

Der Chemismus eines Grundwassers wird von den petrographischen Eigenschaften des jeweiligen Grundwasserleiters, der Aufenthaltsdauer in ihm, von den chemischen Reaktionen mit dem Boden und von anthropogenen Einwirkungen beeinflusst. Im Kapitel 5 werden die Wässer der verschiedenen Grundwasserleiter, geordnet nach deren stratigraphischer Abfolge, hydrochemisch charakterisiert. Es wird dabei auf regionale bzw. lokale hydrogeochemische Besonderheiten eingegangen. Weiterhin finden geogen bedingte Eigenschaften Berücksichtigung; auf Einschränkung der Nutzbarkeit durch Überschreiten von Grenzwerten wird hingewiesen. Dieses Kapitel vermittelt einen Überblick über:

- die Gesamtmineralisation (als Näherungswert wird hierfür die elektrische Leitfähigkeit verwendet),
- die Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) (siehe Abb. 14),
- die Beurteilung der Gesamthärte nach KLUT-OLSZEWSKI (1945),
- die Konzentrationen wichtiger Ionen (soweit diese für den Grundwasserleiter typisch sind oder innerhalb des Grundwasserleiters regionale Unterschiede aufweisen),
- die Aggressivität der Wässer,
- die Schwankungsbreite der pH-Werte,
- Besonderheiten (reduzierte Wässer, geogen bedingtes Überschreiten von Grenzwerten, hohe Gehalte von Spurenstoffen usw.).

5.1 Rhätolias und Lias

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist der Rhätolias im Untersuchungsraum lokal bedeutsam, dagegen spielen die Schichten des Lias für Wassererschließungszwecke kaum eine Rolle. Daher liegen aus diesen stratigraphischen Bereichen nur relativ wenige Vollanalysen vor: 35 von Wässern aus Rhätolias-Sandsteinen und neun von Wässern aus dem kalkigen Lias. Die wichtigsten physikalischen und chemischen Angaben zu diesen Wässern sind in Tabelle 9 zusammengefaßt.

Die Wässer aus den Rhätolias-Sandsteinen lassen sich im Sinne von FURTAK & LANGGUTH (1967) vorwiegend als "Normal erdalkalische Wässer", gelegentlich auch als "Erdalkalische Wässer" charakterisieren. Die Einstufung bezüglich der Anionen streut von "überwiegend sulfatisch" über "hydrogenkarbonatisch-sulfatisch" bis zu "überwiegend hydrogenkarbonatisch". Sie weisen sehr unterschiedliche Mineralisierungen, zwischen 280 und 1 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, auf. Diese große Streubreite spiegelt sich in den Karbonat- und Gesamthärten wider. Die Wässer schwanken somit zwischen sehr weich und sehr hart. Erhöhte Hydrogenkarbonatwerte dürften ursächlich auf karbonatisches Bindemittel der Sandsteine und/oder auf hydraulische Kurzschlüsse mit den in karbonatischen Bänken des Hangenden zirkulierenden Wässern zurückzuführen sein.

Die Sulfatkonzentrationen schwanken beträchtlich, nämlich von knapp 20 mg/l bis 275 mg/l, was eine unterschiedliche Typisierung der Wässer nach sich zieht. Diese Schwankungsbreite ist weitgehend geogen bedingt und beruht hauptsächlich auf der Auslaugung von Gips, der in diesen Schichten bereichsweise in schichtig angeordneten Konkretionen (sog. Gipsschnüre) bzw. in Form von Kluft- oder Schichtfugenfüllungen vorkommt.

Der Ausstrich der Rhätolias-Sandsteine ist weitgehend mit Wald bestanden. In solchen Gebieten sind die Nitrat- und Chloridwerte mit durchschnittlich 20 mg/l relativ niedrig. Wenn in den Einzugsgebieten der betrachteten Brunnen und Quellen statt der forstwirtschaftlichen eine andere Flächennutzung vorherrschend ist, treten merklich höhere Werte im Grundwasser auf, die dort für NO_3 bis 80 mg/l und für Cl bis knapp 50 mg/l ausmachen. Die Calciumgehalte schwanken, in Abhängigkeit von den Hydrogenkarbonat- bzw. Sulfat-Konzentrationen, zwischen 15 und 170 mg/l, die Magnesiumkonzentrationen zwischen 2 und 60 mg/l.

Die meisten der untersuchten Wässer weisen nur geringe Alkaligehalte auf, ihr prozentualer Anteil tritt gegenüber den Erdalkalien stark zurück. Abweichend davon erreichen die Alkalien in einigen

Austauschwässern über 15 % der Gesamtkationen. Solche Austauschwässer kommen in den Brunnen Scheßlitz I (Blattgebiet 6032 Scheßlitz) sowie Seigendorf und Eggolsheim II und IV (Blattgebiet 6132 Buttenheim) vor. Sie sind gemäß der Einteilung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) als "Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt überwiegend sulfatisch" zu typisieren. Der primäre Chemismus dieser Rhätolias-Wässer wird vermutlich durch Tiefenwässer überprägt, die entlang von Störungen aufsteigen.

Tabelle 9: Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Lias bzw. den Rhätolias-Schichten im Untersuchungsraum

(zusammengestellt aus: APEL 1972 a, 1972 b, 1974 a, 1974 b, 1977 a, 1979 sowie FRANK 1979)

Grundwasserleiter	Lias (I)		Rhätolias (I+ko)		Rhätolias u. Lias (gesamt)	
Anzahl	9		35		44	
chemische und physikalische Angaben	Wertespanne	Mittelwert	Wertespanne	Mittelwert	Wertespanne	Mittelwert
elektr. Leitfähigkeit $\mu\text{S}/\text{cm}$	490 - 750	666	280 - 1 250	564	280 - 1 250	585
pH	7,0 - 8,1	7,75	6,6 - 7,7	7,3	6,6 - 8,1	7,4
KH °d	5 - 20	15	1 - 21,5	12	1 - 21,5	13
GH °d	12 - 32	20,5	3 - 37	17	3 - 37	18
Angaben in mg/l						
Ca ²⁺	80 - 147	111	15 - 167	83	15 - 167	89
Mg ²⁺	4,5 - 50,5	22	2,5 - 58	24,5	2,5 - 58	24
Na ⁺	6 - 38,5	12,5	1 - 86	13	1 - 86	13
K ⁺	0,1 - 37	5,5	0,6 - 21	4	0,1 - 37	4,5
Fe ^{2+/3+}	<0,01 - 0,54	0,15	0,01 - 3,3	0,45	<0,01 - 3,3	0,4
Mn ²⁺	0 - 0,08	<0,01	0 - 0,07	0,01	0 - 0,08	0,01
HCO ₃ ⁻	104 - 432	320	24 - 468	265	24 - 468	276
SO ₄ ²⁻	33 - 89	63	14 - 275	81	14 - 275	77
Cl ⁻	8 - 56	29	1 - 45	16,5	1 - 56	19
NO ₃ ⁻	1 - 74	32	0,2 - 80	22	0,2 - 80	24
NO ₂ ⁻	0 - 0,08	0,04	0 - 0,5	0,01	0 - 0,5	0,02

Einige der aus dem Rhätoliassandstein geförderten Wässer weisen beachtlich hohe Eisengehalte von ca. 1 mg/l (maximal 3,3 mg/l) auf. Der erhöhte Eisengehalt wird auf die eisenschüssigen Sandsteine im Schichtverband zurückgeführt. Die Mobilisierung des Eisens wird ermöglicht durch den leicht sauren Charakter des Grundwassers, wie er für schwach mineralisierte Sandsteinwässer typisch ist. Wässer mit derart hohen Eisengehalten werden in der Regel für Trinkwasserzwecke aufbereitet.

Aus dem kalkigen Lias Gamma (den Numismalis-Schichten) und dem Lias Epsilon (den Posidonienschichten) liegen nur neun Voll- und einige Teilanalysen vor. Die Wässer sind im Mittel etwas stärker mineralisiert als diejenigen aus dem Rhätolias-Sandstein, Calcium-Hydrogenkarbonatbetont und von neutralem bis schwach basischem Charakter.

Die Magnesium- und Alkalienanteile treten zurück; lokal werden erhöhte Sulfatgehalte bis zu knapp 90 mg/l beobachtet. Der Calcium-Hydrogenkarbonat-Gehalt ist geogenen Ursprungs und steht in ursächlichem Zusammenhang mit den kalkigen Grundwasserleitern. Erhöhte Sulfatwerte sind auf Oxidation von schichtgebundenen Sulfidanreicherungen zurückzuführen.

5.2 Dogger

Das Dogger-Grundwasserstockwerk wird auf der Grundlage von 102 Vollanalysen hydrochemisch bewertet. — Die Gesamtmineralisation beträgt durchschnittlich 430 mg/l, die elektrische Leitfähigkeit im Mittel ca. 400 μ S/cm. Ausnahmen hiervon bilden mineralarme Wässer der Quellen Holstein/Oberhohenried (Blattgebiet 6435 Pommelsbrunn) mit 24 μ S/cm und Gnadenberg (Blattgebiet 6634 Altdorf) mit knapp 100 μ S/cm. Die Gesamthärte beträgt im Mittel 15 °dH, wovon der Karbonathärte-Anteil rund 12 °dH ausmacht. Die Doggerwässer können somit nach KLUT-OLSZEWSKI in der Regel als "weich" bis "hart" bezeichnet werden, wobei es sich mehrheitlich um "ziemlich (oder etwas) harte" Wässer handelt. Sie lassen sich im Sinne von FURTAK & LANGGUTH (1967) überwiegend dem Grundwassertyp "Normal erdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch" zuordnen (Abb. 15). Stellenweise gehören sie aufgrund erhöhter Sulfatgehalte dem Grundwassertyp "erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatisch-sulfatische Wässer" an; untergeordnet können bei Hervortreten des Chloridanteils auch "Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt, überwiegend chloridisch" angetroffen werden.

Bei den Anionen läßt sich eine deutliche Vormacht des Hydrogenkarbonats erkennen; seine Durchschnittskonzentration beträgt 265 mg/l, sein Anteil an der Anionensumme über 70 %. Das Hydrogenkarbonat ist, ebenso wie das zugehörige Calcium, geogenen Ursprungs; es stellt das Produkt der Auflösung des calcitischen Bindemittels der vorwiegend sandig ausgebildeten Doggerserie durch kohlendioxidhaltige Sickerwässer dar.

Vergleichsweise gering fallen mit je <20 mg/l die Mittelwerte für Chlorid und Nitrat aus. Aufgrund der vorliegenden niedrigen Konzentrationen läßt sich keine Aussage über Anteile geogener oder anthropogener Bildungen treffen. Beide Ionen gehören zu den Primärbestandteilen des Grundwassers, deren Konzentrationen noch mehr oder weniger stark durch anthropogene Einflüsse (Landwirtschaft, Abfalldeponien, Abwasserversickerung, Salzstreuung) örtlich beaufschlagt sein können. Das Vorhandensein von Nitrat deutet auf aerobes Milieu (durchlüftete Wässer) hin.

Die Sulfatwerte liegen, bei einer durchschnittlichen Konzentration von 29 mg/l, selten höher als 50 mg/l. Bevorzugt in Brunnen können erhöhte Sulfatgehalte angetroffen werden, so z.B. in den Brunnen der Poxdorfer-Gruppe (Kartenblatt Nr. 6032 Scheßlitz); hier schwanken die Sulfatgehalte zwischen 110 und 140 mg/l. Vermutlich werden Brunnen verstärkt durch sulfathaltige Liaswässer, die an Verwerfungen aufsteigen, beeinflusst.

Auf der Seite der Kationen dominiert das in den Grundwasserleitern gebildete Calcium. Sein Anteil an der Summe der Kationen liegt, bei einer Durchschnittskonzentration von 86 mg/l, meist über 70 %. Der hohe Calciumgehalt steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem in der Anionen-Summe vorherrschenden Hydrogenkarbonat (Partner-Ion). Das Magnesium erreicht demgegenüber oft weniger als 20 % der Kationensumme, wobei der Mittelwert mit 11 mg/l relativ niedrig liegt. Das Doggerwasser weist auch relativ niedrige Natriumkonzentrationen auf (Mittelwert 3,5 mg/l). Die Doggersedimente enthalten primär wenig Mg- und Na-lösliche Minerale. Die Kalium-Werte bleiben gegenüber den Natriumgehalten nicht proportional zurück, so daß das Verhältnis Natrium : Kalium im Mittel nur 3 : 2 ausmacht.

Fast alle Wässer weisen tendenziell erhöhte Eisengehalte auf, die aus den Eisenoxid-Anreicherungen des Dogger-Beta-Sandsteins stammen. Die Lösung des Eisens aus dem Gesteinskörper erfolgt

zwar unter reduzierenden Bedingungen bzw. im sauren Milieu (pH <4,8), jedoch kommt es während des Fördervorganges in den Brunnen meist zur Vermischung mit sauerstoffreicherem bzw. basischem Wasser, so daß die untersuchten Brunnenwässer nicht das originäre Milieu der Doggersandstein-Wässer widerspiegeln. Die Nutzung eisenhaltigen Wassers als Trink- oder Brauchwasser erfordert eine Aufbereitung (Belüftung und Filtration).

Die Doggerwässer sind im allgemeinen sauerstoffgesättigt ($\bar{\varnothing}$ 9,0 mg/l O₂); nur vereinzelt treten größere Sauerstoffdefizite auf. Die sauerstofffreien bzw. -armen Wässer entstammen Grundwasserleitern, in denen reduzierendes Milieu vorherrscht. Die pH-Werte schwanken von schwach sauer bis leicht basisch, um einen Mittelwert von 7,5. Von den untersuchten Wässern führt nur ein Teil aggressive Kohlensäure; es sind dies vor allem jene Wässer mit pH-Werten um 7,0. Tabelle 10 vermittelt einen Überblick der wichtigsten chemischen und physikalischen Parameter von Wässern aus dem Dogger (im Untersuchungsraum).

Tabelle 10: Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Dogger (zusammengestellt aus: APEL 1972 a, 1972 b, 1974 a, 1974 b, 1975, 1977 a, 1979, 1983, 1984 und BÜTTNER 1986)
A: Ausnahme (Mischwasser Malm/Dogger)

Grundwasserleiter	Dogger	
Anzahl	102	
chemische und physikalische Angaben	Wertespanne	Mittelwert
elektr. Leitfähigkeit $\mu\text{S/cm}$	24 - 820	408
pH	5,7 - 8,2	7,5
KH °d	0,2 - 26,5	12
GH °d	0,7 - 24	15
	Angaben in mg/l	
Ca ²⁺	4 - 152	86
Mg ²⁺	1 - 39	11
Na ⁺	1 - 43	3,5
K ⁺	0,2 - 28	2
Fe ^{2+/3+}	0.02-8	0,35
Mn ²⁺	0 - 0,25	<0,01
HCO ₃ ⁻	6 - 580	265
SO ₄ ²⁻	2 - 88 A: 134	29
Cl ⁻	<1 - 104	18,5
NO ₃ ⁻	<1 - 90	13
NO ₂ ⁻	0 - 0,1	<0,01

5.3 Malm

Während im Kapitel 5.3.1 der allgemeine Chemismus der Wässer aus dem Karstgrundwasserleiter erläutert wird, ist im Kapitel 5.3.2 die flächenhafte Verteilung bestimmter hydrochemischer Parameter dargestellt.

5.3.1 Klassifizierung der Wässer aus dem Malm

Zur Beurteilung des Grundwassers aus dem Malmkarst standen etwa 210 Vollanalysen und eine Vielzahl von Teilanalysen zur Verfügung. Die Wässer sind mittelstark bis stark mineralisiert, ihre elektrischen Leitfähigkeiten schwanken zwischen 280 und 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mit einem Mittelwert von 14,5 $^\circ\text{dH}$ macht die Karbonathärte einen relativ hohen Anteil an der Gesamthärte (Mittelwert 18 $^\circ\text{dH}$) aus. Die Wässer schwanken nach der Klassifizierung von KLUT-OLSZEWSKI zwischen "mittelhart" und "hart"; gemäß der Einteilung von FURTAK & LANGGUTH (1967) sind nahezu alle als "Normal erdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch" zu bezeichnen, nur wenige Proben, noch Hydrogenkarbonat-Betonung aufweisend, fallen in den Bereich "hydrogenkarbonatisch-sulfatisch" (Abb. 16, Abb. 17).

Auf der Seite der Anionen ist eine überragende Vormacht des Hydrogenkarbonates (Mittelwert knapp 320 mg/l) zu verzeichnen, was bei der überwiegend kalkig/dolomitischen Ausbildung des Grundwasserleiters auch zu erwarten ist. Bei denjenigen Wässern, die überwiegend dem Schichtbereich Malm Alpha-Beta entstammen, beträgt allerdings die Hydrogenkarbonat-Konzentration lediglich 100 bis 200 mg/l, was von der mergeligen Ausbildung des Malm Alpha (Zurücktreten des Karbonatanteiles) herrührt. Der Malm Alpha-Beta nimmt, oberflächennah verbreitet, im wesentlichen die Areale des Seichten Karstes ein, wo die Aufenthaltsdauer des durchsetzenden Karstwassers deutlich geringer ist als im Tiefen Karst. Im Bereich des Tiefen Karstes liegen die Malm Alpha-Beta-Schichten so tief unter der Geländeoberfläche, daß sie von den meisten Karstbrunnen nicht mehr erreicht werden. Darum fehlen aus diesem Bereich statistisch gesicherte Daten der Wasserbeschaffenheit. Die ansonsten in den Malmwässern vorliegende Hydrogenkarbonat-Vormacht tritt nicht nur bei einem Vergleich der absoluten Konzentrationswerte, sondern auch in der Ionenbilanz deutlich in Erscheinung: Das Hydrogenkarbonat erreicht Anteile zwischen 70 und 90 %. Dementsprechend niedrig liegen die Gehalte der übrigen Anionen.

Beim Chlorid ist ein Mittelwert von 13 mg/l zu verzeichnen. In Ausnahmefällen werden lokal und zeitlich schwankend bis 90 mg/l erreicht. Das dürfte auf die Verwendung von Salz beim winterlichen Straßendienst zurückzuführen sein. Die Sulfatkonzentration übersteigt selten 50 mg/l, sie liegt im Mittel um ~ 20 mg/l. Die Quellen bei Görau und Zultenberg (Blattgebiet Nr. 5933 Weismain) entspringen in der Massenfazies knapp oberhalb der Malmbasis (Quellaustritte am Hang des Seichten Karstes). Sie enthalten rd. 70 mg/l Sulfat, was auf anthropogene Einwirkungen hindeutet. Der Nitratgehalt der Malmwässer beträgt im Mittel knapp 20 mg/l, wobei die Werte nur in Einzelfällen unter 10 mg/l verbleiben, während die Maxima gebietsweise, v. a. im Seichten Karst und im Nordteil des Untersuchungsgebietes um 50 mg/l schwanken. Die Nitratgehalte im Karstwasser sind in jenen Gebieten erhöht, deren Deckschichten keine ausreichende Grundwasserabschirmung bewirken können und die außerdem intensiv landwirtschaftlich genutzt sind.

Einen deutlichen Hinweis auf anthropogene Beeinflussung liefern erhöhte Phosphat-Gehalte, die teilweise im Seichten Karst, vor allem jedoch am Nordrand der Alb (im Umfeld des Kleinziegenfelder Tals) angetroffen wurden; hier betrug der Mittelwert von ca. 40 berücksichtigten Analysen knapp 0,1 mg/l. Als "Phosphor-Quellen" kommen landwirtschaftliche Düngung, Massentierhaltung und Abwasser-versickerung bzw. -versenkung (in Dolinen des Malm-Karstkörpers) in Betracht.

Bezüglich der Erdalkalien (Calcium, Magnesium) lassen sich zwei verschiedene Wassertypen erkennen: Zum einen Wässer mit deutlicher Calciumvormacht und Magnesiumanteilen unter 20 %, meist sogar unter 10 %, zum anderen Wässer mit einem Magnesiumanteil zwischen 30 und 50 % und entsprechend geringem Calcium-Anteil (Tab. 11). Bei Wässern mit Calciumvormacht beträgt die Konzentration des Calciums häufig zwischen 80 und 120 mg/l, wobei die Magnesiumgehalte um oder

unter 20 mg/l, teilweise sogar unter 5 mg/l ausmachen. Diese Wässer entstammen überwiegend der kalkigen Bankfazies der Malm-Schichtglieder Alpha bis Gamma, bei der das Magnesiumangebot aufgrund der Lithologie gering ist. Die Wässer mit höherem Magnesiumgehalt – der Mittelwert liegt hier bei 30,5 mg/l – und Calciumwerten um 75 mg/l kommen aus der dolomitisierten Massenkalkfazies des Malm bzw. sind von dieser beeinflusst. Dort betragen in der Regel auch die Alkalianteile (Natrium, Kalium) weniger als 10 %, wenn man von chloridreichen Karstwässern absieht. Die mittleren Konzentrationen betragen für das Natrium 3 mg/l, für das Kalium 1,4 mg/l. Erhöhte Alkaliwerte sind dort fast nur auf anthropogene Faktoren (Einsatz von Streusalz und Mineraldünger) zurückzuführen.

Tabelle 11: Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Malmkarst

(zusammengestellt aus: APEL 1972 a, 1972 b, 1972 c, 1974 a, 1975, 1977 a, 1977 b, 1979, 1983, 1984 sowie BÖTTNER 1986, ergänzt durch eigene Untersuchungen [siehe Kapitel 7]); (A: Ausnahme Quelle am südwestlichen Albrand)

Grundwasserleiter	Seichter Karst		Tiefer Karst		Karst (gesamt)	
	ca. 110		ca. 100		ca. 210	
chemische und physikal. Angaben	Wertespanne	Mittelwert	Wertespanne	Mittelwert	Wertespanne	Mittelwert
elektr. Leitfähigkeit $\mu\text{S}/\text{cm}$	280 - 645	470	300 - 750	515	280 - 750	490
pH	6,55 - 8,1	7,5	7,05 - 7,9	7,5	6,55 - 8,1	7,5
KH °d	5,5 - 19,5	14	12 - 19	15	5,5 - 19,5	14,5
GH °d	12 - 22	18	11,5 - 23,5	17,5	11,5 - 23,5	18
Ca/Mg-Verhältnis	—	4,7:1	—	2,4:1	—	3,7:1
	Angaben in mg/l					
Ca ²⁺	50 - 132	91	50 - 116	73,5	50 - 132	83
Mg ²⁺	1 - 41	19,5	11 - 40	30,5	1 - 41	24,5
Na ⁺	0,5 - 30	4	0,5 - 8	2,5	0,5 - 30	3
K ⁺	0,2 - 8	1,3	0,3 - 12	1,5	0,2 - 12	1,4
Fe ^{2+/3+}	0,02 - 0,5	0,06	0,01 - 0,5	0,05	0,01 - 0,5	0,06
Mn ²⁺	<0,01 - 0,4	<0,01	<0,01	—	<0,01 - 0,4	<0,01
HCO ₃ ⁻	118 - 425	308	260 - 415	327	118 - 425	317
SO ₄ ²⁻	<1 - 70	23,5	7,5 - 31	17	<1 - 70	20,5
Cl ⁻	<1 - 70	15	2 - 45	11	<1 - 70	13
NO ₃ ⁻	<1 - 42 (A:>50)	20,5	<1 - 33	15	<1 - 42	18
NO ₂ ⁻	0 - 0,1	<0,01	0 - 0,09	<0,01	0 - 0,1	<0,01

Der durchschnittliche pH-Wert der Malmwässer beträgt 7,5; die Wässer reagieren somit leicht basisch, was aufgrund der geochemischen Charakteristik des Aquifers auch zu erwarten ist. Freie Kohlensäure ist in der Regel vertreten; aggressive Kohlensäure fehlt im allgemeinen, doch lassen sich Ausnahmen feststellen, so bei der für die Wasserversorgung Würzgau gefaßten Quelle (TK 25 Nr. 6032 Scheßlitz), wo in einer Probe rund 20 mg/l CO₂ bestimmt wurden.

Die Malm-Karstwässer sind in der Regel reich an gelöstem Sauerstoff. Der relativ hohe Sauerstoff-Sättigungsindex (>70 %) der meisten Wässer belegt deren Prägung durch oberflächennahe (durchlüftete) Zuflüsse; nur wenige Proben, zumeist mit hohem Anteil aus unteren Bereichen des Tiefen Karstes (z. B. Veldensteiner und Hollfelder Mulde), weisen mit Sättigungsindizes von unter 50 % deutliche Sauerstoffdefizite auf. Letztgenannte geben zusammen mit Eisengehalten von über 0,1 mg/l zu erkennen, daß die Wässer Teufenzonen mit reduziertem Milieu entstammen. Solche Wässer bedürfen im Falle der Trinkwassernutzung einer Aufbereitung durch Belüftung und Filtration. – Die Mangangehalte liegen meist unter der Nachweisgrenze.

5.3.2 Beschreibung der hydrochemischen Karten

Wie bereits eingangs dargestellt, hat das GLA im Malmkarst-Grundwasserleiter umfangreiche hydrochemische Beprobungen vorgenommen und einen großen Teil der Wässer nach der "Großen Trinkwasseranalyse" untersucht. Diese Daten wurden zusammen mit aus der Literatur und vom LfW bzw. den lokalen WWÄ übernommenen Daten in einem Datenbanksystem gespeichert, so daß für bestimmte Parameter hydrochemische Punktkarten erstellt und diese in einem weiteren Arbeitsschritt in flächenhafte Informationen umgewandelt werden konnten (Abb. 18-23). Die hydrochemischen Karten beziehen sich jeweils auf 250 bis 700 Einzeldaten.

Da neben der geogenen Charakteristik der Wässer, der anthropogene Anteil gewisser Parameter abgeschätzt werden sollte, wurden vor allem hydrochemische Parameter ausgewählt, die einen Hinweis auf anthropogene Einflüsse geben können. Die ausgewählten hydrochemischen Parameter sollen einen Überblick über die kausalen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Grundwassers und dem Malmkarst vermitteln sowie auf mögliche anthropogene Einflüsse hinweisen.

5.3.2.1 Sulfatgehalte im Karstwasser (Abb. 18)

Die Verbreitung unterschiedlicher Sulfatgehalte wurde anhand von etwa 650 Meßpunkten erstellt. Die Werte überschreiten in der Regel die 70-mg/l-Grenze nicht. Lediglich in einigen Mischwässern aus dem Malm- und dem Dogger-Grundwasserleiter können höhere Sulfatkonzentrationen angetroffen werden (z. B. Wässer aus Brunnen im Raum Heiligenstadt). Derartige Mischwässer wurden allerdings in der vorliegenden Karte (nur auf Malm bezogen) nicht berücksichtigt. — Die von vornherein geringe Streubreite ließ eine Untergliederung in zwei Klassen sinnvoll erscheinen, nämlich in Wässer mit Sulfatgehalten unter 25 mg/l und in solche mit Sulfatkonzentrationen zwischen 25 und 75 mg/l.

Im unbedeckten Seichten Karst am Nordrand der Alb und im Raum Gräfenberg-Egloffstein-Ebermannstadt schwanken die Sulfatkonzentrationen im allgemeinen zwischen 25 und 75 mg/l; in den überwiegenden Bereichen des Seichten Karstes, in Teilbereichen der Hollfelder Mulde sowie am östlichen Albrand werden Sulfatkonzentrationen zwischen <25 und 75 mg/l angetroffen. Insbesondere in den Gebieten des teil- bis bedeckten Tiefen Karstes sinken die Sulfatgehalte in der Regel auf <25 mg/l ab, wobei Sulfatgehalte um 20 mg/l in der Riff-Fazies der Nördlichen und Mittleren Frankenalb geogenen Ursprung haben dürften; höhere Werte weisen hier unter Umständen auf anthropogene Beeinflussung hin. Insbesondere in der Bank- bzw. Schichtfazies können aber auch geogene Ursachen (z. B. die Oxidation von Sulfiden) erhöhte Sulfatkonzentrationen verursachen. Daher kann mit Hilfe der Sulfatgehalte allein nicht beurteilt werden, ob eine anthropogene Beeinflussung vorliegt; eine solche Bewertung ist nur in Kombination mit anderen Indikatoren (z. B. Chlorid-, Nitrat-, Phosphatgehalt) sinnvoll (vgl. Kap. 5.3.3).

5.3.2.2 Chloridgehalte im Karstwasser (Abb. 19)

Zur Beurteilung der Chloridkonzentrationen standen etwa 700 Meßwerte zur Verfügung. Die Chloridgehalte schwanken im Arbeitsgebiet im allgemeinen zwischen <10 und 50 mg/l; lediglich in Einzelfällen (ca. 2 % der Proben) wurden höhere Konzentrationen gemessen. Chloridgehalte von <10 mg dürften weitgehend geogenen Ursprung haben; so gibt HOHBERGER (1977) für Karbonatgesteine (des Muschelkalks) maximale geogene Konzentrationen von 15 mg/l an. Demgegenüber weisen (leicht) erhöhte Werte zwischen 15 und 50 mg/l auf anthropogene Einflüsse (Düngung und/oder Salzstreuung) hin. Die Verteilung der Chloridgehalte läßt deutliche Tendenzen erkennen:

- In der Veldensteiner Mulde und im Raum Sulzbach-Rosenberg treten weitflächig die niedrigsten Chloridwerte (<10 mg/l) auf. Diese Gebiete sind weitgehend kreidebedeckt bzw. -teilbedeckt und/oder forstwirtschaftlich genutzt.
- In der Hollfelder und der Vilsecker Mulde sowie in weiten Teilen des Seichten Karstes sind die Chloridgehalte leicht erhöht, sie schwanken dort zwischen <10 und 25 mg/l. Hier ist die Kreidebedeckung nur unvollständig ausgebildet, forst- und landwirtschaftliche Nutzung wechseln miteinander ab.
- Stärker erhöhte Werte (25-50 mg/l) bzw. Wechsel von leicht- und stärker erhöhten Konzentrationen (10-50 mg/l) werden vor allem im Seichten Karst (am Albwestrand) sowie im nördlichen Abschnitt der Hollfelder Mulde beobachtet. Diese Gebiete zählen meist zum nackten Karst (lückenhafte bis fehlende Kreide-Überdeckung) und werden z. T. intensiv landwirtschaftlich genutzt.
- Gehalte über 50 mg/l wurden ausnahmslos am Albwestrand festgestellt; sie zählen zu Grundwasservorkommen, deren Einzugsgebiete von wichtigen Straßen durchzogen werden. Aufgrund der winterlichen Salzstreuung läßt sich hier ein deutliches Ansteigen (z. T. jahreszeitliche Schwankungen) des Chloridgehaltes erkennen, während die Chloridkonzentrationen in der weiteren Umgebung im allgemeinen unter 25 mg/l liegen.

5.3.2.3 Nitratgehalte im Karstwasser (Abb. 20)

Der Nitratgehalt in Grund- und Oberflächengewässern unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Der saisonale Wechsel der Bodennutzung trägt auf natürliche Weise zur Nitratschwankung im Wasser bei. Dazu kommt eine periodisch wiederkehrende, z. T. außerordentlich hohe Nitratsfreisetzung durch die landwirtschaftliche Düngung. Weitere künstliche "Nitratquellen" sind Abfalldeponien und Anlagen zur Abwasserversickerung bzw. -versenkung. In saisonabhängigem Ausmaß gelangt das auf natürliche oder künstliche Weise erzeugte Nitrat über den Sickerwasserpfad von der Erdoberfläche in das Grundwasser.

Die vorliegende Karte der Nitratgehalte in den Grundwässern des Malmkarstes basiert auf den bisher bekannten Höchstwerten, d. h. sie stellt ein Abbild der im Erfassungszeitraum aufgetretenen Maximalbelastungen dar; die Karte stützt sich auf knapp 600 Meßwerte. Für das Untersuchungsgebiet ist von einem geogenen mittleren Grundgehalt von rund 10 mg/l Nitrat auszugehen.

Dieser Wert wird (größerflächig) nur im Zentrum der Veldensteiner Mulde unterschritten. In Gebieten hoher Grundwassermächtigkeit, insbesondere in der Veldensteiner und Vilsecker Mulde sowie in der Sulzbacher Delle schwanken die Nitratkonzentrationen zumeist zwischen <10 und 25 mg/l. Dieser Konzentrationsbereich weist auf bedingte anthropogene Beeinflussung hin, wobei der EG-Richtwert (25 mg/l) nicht überschritten wird.

Am Westrand der Alb, aber auch in der Hollfelder Mulde schwanken die maximalen Nitratkonzentrationen zwischen 10 und 50 mg/l. Die Werte spiegeln anthropogene Einflüsse im meist (Kreide) un- oder nur teilbedecktem Karst wider. Allerdings liegen auch diese Werte fast ausnahmslos unter dem zur Zeit gültigen Grenzwert der TrinkwV (BMJFG 1986, 1990) von 50 mg/l.

Weitflächig betrachtet wurden deutliche anthropogene Beeinflussungen am Nordrand der Alb festgestellt. Der unbedeckte Karst wird hier einerseits intensiv landwirtschaftlich genutzt, andererseits liegen in diesem Teilgebiet zahlreiche Ortschaften, deren Abwasser bis heute (z. T. nur mechanisch vorgeklärt) gezielt in Gräben und Dolinen geleitet wird. - Nitratkonzentrationen von >50 mg/l nehmen im Untersuchungsgebiet etwa 1 % der Meßwerte ein und wurden nur am Albrand im Seichten Karst festgestellt. Dort kann der aus landwirtschaftlicher Nutzung stammende Nitratreintrag in dem gering mächtigen Karstwasserleiter nicht ausreichend verdünnt werden.

5.3.2.4 Phosphatgehalte im Karstwasser (Abb. 21)

Der Phosphatgehalt ist ein weiterer wichtiger Indikator für anthropogene Beeinflussungen. Phosphat gelangt vorwiegend durch landwirtschaftliche Düngung (Stallmist, Gülle, Kunstdünger) und durch Abwasserversickerung bzw. -versenkung in den Untergrund. Daneben ist im Malmkarst ein geringer geogener Phosphatanteil durch die Lösung phosphathaltiger Einschlüsse möglich.

Phosphatwerte von weniger als 0,05 mg/l können im Malmkarst weitgehend als geogen angesehen werden; über 80 % der 450 berücksichtigten Meßwerte gehören zu dieser Klasse. Weitflächig sind derart niedrige Phosphatgehalte im mit Kreidesedimenten bedeckten bzw. teilbedeckten Tiefen Karst, vor allem in den großen Muldenzonen (starke Verdünnung) verbreitet.

Vereinzelte erhöhte Phosphatgehalte (meist zwischen 0,07 und 0,15 mg/l) treten in den Teilbereichen des Tiefen Karstes, so z. B. in der nördlichen Hollfelder und Veldensteiner Mulde auf, in denen die Kreideablagerungen erodiert sind. Häufig handelt es sich um eine Aufsattelung häuslicher Abwässer oder Einträge aus der Landwirtschaft auf primär schadstoffarme Wässer unmittelbar vor den jeweiligen Quellaustritten. — Im unbedeckten Seichten Karst, am nördlichen und westlichen Albrand, werden weitflächig erhöhte Phosphatkonzentrationen angetroffen. Ähnlich wie bei den Nitratgehalten ist auch beim Phosphat die stärkste Beeinflussung am Nordrand der Alb festzustellen; die Phosphatgehalte schwanken dort im allgemeinen zwischen 0,05 und 0,15 mg/l.

5.3.2.5 Kaliumpermanganat-Verbrauch im Karstwasser (Abb. 22)

Der Kaliumpermanganatverbrauch vermittelt einen Überblick über den Lösungsinhalt an organischer Substanz. Dabei bezeichnet HÖLL (1968) einen KMnO_4 -Verbrauch von 3-6 mg/l als normalen Wert, MATTHESS (1990) nennt ein Wasser bis 9,5 mg KMnO_4 /l als ein Grundwasser außerhalb einer Verunreinigungszone. WALAYATI (1978) ermittelte bei Untersuchungen in der Fränkischen Schweiz einen mittleren Kaliumpermanganat-Verbrauch von 2-3 mg/l; der gesamte Wertebereich seiner Daten streute von 1 bis 8 mg/l. Dabei traten an einzelnen Quellen jahreszeitlich bedingte Schwankungen von bis zu 5 mg/l auf. Insbesondere mit zunehmender Quellschüttung war eine Zunahme des KMnO_4 -Verbrauchs zu beobachten.

Der Kaliumpermanganat-Verbrauchs-Bestimmung wurden 250 Lokalitäten im Malmkarst unterzogen. 80 Prozent dieser Werte lagen zwischen <2,5 und 4,5 mg/l, also mit Sicherheit im unbeeinflussten Bereich. Insgesamt zeichnet auch der Kaliumpermanganat-Verbrauch die geologisch-hydrogeologischen Großstrukturen nach: In den teils kreidebedeckten Muldenstrukturen sinken die Werte auf unter 2,5 mg/l; weitflächig überwiegen zwischen 2,5 und 4,5 mg/l, insbesondere im Seichten Karst, in Gebieten geringer Grundwassermächtigkeiten sind leicht erhöhte Werte (2,5 - >4,5 mg/l) anzutreffen. Dabei überschreiten allerdings nur ca. 20 % der Wässer die 4,5 mg/l-Marke. Obwohl diese Werte in Gebieten festgestellt wurden, in denen auch die Nitrat- und Phosphat-Gehalte erhöht waren, kann man hieraus lediglich eine bedingte anthropogene Beeinflussung, nicht aber eine Verunreinigung ableiten.

5.3.2.6 Elektrische Leitfähigkeit im Karstwasser (Abb. 23)

Die elektrische (richtiger: elektrolytische) Leitfähigkeit einer wäßrigen Lösung resultiert aus ihrem Gehalt an dissoziierten Stoffen (Ionen). Die Leitfähigkeit steigt mit der Konzentration der in der Lösung enthaltenen Ionen. Somit liefert dieser Parameter, welcher mit sehr einfachen Mitteln (geeichtes elektrisches Meßgerät) vor Ort bestimmt werden kann, einen sicheren Anhaltspunkt für den Mineralisationsgrad eines Wassers.

Ebenso wie bei den übrigen der im vorliegenden Abschnitt erläuterten hydrochemischen Kenngrößen ergibt sich die Mineralisation bzw. die elektrische Leitfähigkeit der Grundwässer aus dem Zusammenwirken geogener und anthropogener Faktoren. Lösungsinhalte des Grundwassers im mittleren Konzentrationsbereich, in der Hauptsache aus Hydrogenkarbonat-, Calcium- und Magnesiumionen zusammengesetzt, markieren das Verbreitungsgebiet karbonatischer Grundwasserleiter.

Die anthropogene Aufhärtung der Grundwässer wird in erster Linie durch die künstliche, teils gezielte, teils unbeabsichtigte Ausbringung von Stoffen auf der Erdoberfläche bzw. in den Untergrund verursacht. Anthropogene Einflüsse stammen aus der Landwirtschaft (Anwendung von Natur- und Kunstdünger; Massentierhaltung), von der Abwasserbeseitigung (Ableitung ungeklärter oder unzureichend gereinigter Abwässer in den Untergrund, hierher gehören auch Versickerungen von Straßenabflüssen; undichte Kanalisationssysteme) und von der Abfallbeseitigung (Übertritt von Deponiesickerwässern in den Grundwasserleiter). Treten in einem Grundwasserkörper erhöhte elektrische Leitfähigkeiten auf, die sich nicht aus den örtlichen geochemischen Gegebenheiten ableiten lassen, so müssen in der Regel die oben genannten Ursachen in Betracht gezogen werden.

Die elektrischen Leitfähigkeiten schwanken im Untersuchungsgebiet zwischen <300 und >750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bei einem Mittelwert von knapp 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dabei liegen nur etwa 5% der hier berücksichtigten 530 Werte unter 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und lediglich 1% über 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Werte <350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ wurden vor allem bei Mischwässern aus dem kombinierten Kreide-Malm-Grundwasserleiter der Vilsecker Mulde festgestellt. Daneben weisen einige Wässer aus dem Malmkarst im Süden des Arbeitsgebietes derart niedrige Gehalte auf. Solch niedrige Leitfähigkeiten weisen auf ein geringes geogenes Lösungspotential bei gleichzeitig niedrigen anthropogenen Einträgen hin.

Im südlichen Abschnitt des Untersuchungsgebietes, hier wiederum vor allem in den Muldenzonen, überwiegen Wässer mit elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 300 und 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Am Albrand und in Gebieten geringerer Grundwassermächtigkeiten werden elektrische Leitfähigkeiten zwischen 300 und 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ beobachtet, wobei sich die Struktur der Veldensteiner und Vilsecker Mulde in der Konzentrationsverteilung abzeichnet.

Im Nordteil des Untersuchungsgebietes sind die Werte tendenziell höher als im Süden; die Hollfelder Mulde läßt sich nicht mit Hilfe unterschiedlicher Konzentrationen abgrenzen. Der Wertebereich umfaßt im allgemeinen $300 - 750$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, wobei mehrheitlich Wässer mit elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 500 und 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ angetroffen werden.

Für den Malmkarst außergewöhnlich hohe Werte ($>750\mu\text{S}/\text{cm}$) treten nur vereinzelt am Albrand auf. Es handelt sich dabei um Lokalisationen, an denen gleichzeitig Chloridgehalte von >50 mg/l festgestellt wurden (winterliche Salzstreuung). Die hohen elektrischen Leitfähigkeiten haben somit vorwiegend anthropogene Ursachen.

5.3.3 Bewertung der aktuellen anthropogenen Beeinflussung des Malm-Grundwasserleiters im Untersuchungsgebiet

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, daß der derzeitige Belastungszustand des Malmkarstes, auch des Seichten Karstes, überraschend gering ist, und daß die TrinkwV-Grenzwerte (BMJFG 1986, 1990) der untersuchten Parameter nur in seltenen Fällen überschritten werden. — Mit Hilfe der in Kapitel 5.3.2 dargestellten Indikatoren lassen sich Bereiche unterschiedlicher anthropogener Beeinflussung abgrenzen:

- Am geringsten ist der bedeckte Tiefe Karst im Zentrum der Veldensteiner Mulde beeinflusst; hier sind mit >200 m die höchsten Grundwassermächtigkeiten anzutreffen, mögliche Schadstoffeinträge können somit stark verdünnt werden. Das Gebiet wird vornehmlich forstwirtschaftlich genutzt.
- Bedingte Beeinflussungen, die sich z. B. in leicht erhöhten Nitrat- und Phosphatkonzentrationen äußern, weisen Randgebiete der Veldensteiner Mulde, die Vilsecker Mulde und die Sulzbacher

Delle auf (teilweise kreideüberdeckter Tiefer Karst mit hohen Grundwassermächtigkeiten). In diesen Gebieten wechseln landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Nutzungen miteinander ab. Die Besiedlungsdichte ist (mit Ausnahme im Gebiet der Sulzbacher Delle) relativ gering. Zum Teil kommt es zu einer Aufsattelung anthropogener Einträge auf primär schadstoffarme Wässer, kurz vor deren Quellaustritt oder im direkten Umfeld von Grundwassererschließungen.

- Geringfügig höhere anthropogene Anteile werden in der südlichen Hollfelder Mulde festgestellt. Der Tiefe Karst ist hier z. T. nackt oder teilbedeckt. Die Grundwassermächtigkeiten sind mit ca. 100 m relativ hoch. In der südlichen Hollfelder Mulde fehlen große zusammenhängende Waldflächen; ein Teil der auf der Malmtafel liegenden Ortschaften läßt das vorgeklärte Abwasser in Trockengräben versickern, einige Ortschaften wurden während dieser Untersuchungen an einen zentralen Abwasser-Entsorgungsverband angeschlossen. Durch die Ableitung des Abwassers von der Karsthochfläche in Kläranlagen im Niveau der Vorfluter (Wiesent und Aufseß) ist hier längerfristig eine Verbesserung des aktuellen Zustands zu erwarten. Die potentiellen Karstwasserreserven zur Trinkwassernutzung können demnach besonders durch die Ableitung der Abwässer in Kläranlagen an den Vorflutern wirksam geschützt werden.
- In der nördlichen Hollfelder Mulde und am Albrand machen sich verstärkt anthropogene Einflüsse bemerkbar. Der Karst ist dort weitgehend nicht mit Kreidesedimenten bedeckt, die Karstwassermächtigkeiten schwanken zwischen "mittel" (Albrand) und "hoch" (nördliche Hollfelder Mulde). Die Nutzungsarten wechseln meist relativ engräumig; viele Orte verfügen nur über mechanische Abwasser-Kläranlagen. Das derart vorgeklärte Abwasser gelangt zumeist in Trockengräben, seltener in Dolinen zur Versickerung.
- Der nördliche Albrand kristallisiert sich bei fast allen Indikatoren als das am stärksten beeinflusste Teilgebiet heraus. Dieser Raum zählt zum unbeckten Karst, die Karstwassermächtigkeit ist hier mit 0-100 m etwa gleich hoch wie am Alwstrand. Daher sind wahrscheinlich die Nutzungsfaktoren für den hohen Grad der Beeinflussung ausschlaggebend. So wird hier nicht nur intensive Landwirtschaft betrieben, es wird auch in einer Vielzahl von Ortschaften gezielt Abwasser zur Versickerung gebracht.
- Einzelne sehr hohe Konzentrationen (z. T. über den TrinkwV-Grenzwerten [BMJFG 1986, 1990]) wurden bevorzugt am äußersten Albrand im Seichten Karst festgestellt. Diese Gebiete weisen eine geringe Grundwassermächtigkeit (<50 m) auf, so daß Schadstoffeinträge nur unzureichend verdünnt werden.

5.4 Kreide

Wie bereits im Kapitel 3.1.2 dargestellt, sind mit Ausnahme der Vilsecker Mulde nur lokale Grundwasservorkommen in der Kreide ausgebildet. Dort entspringen nur vereinzelt perennierende Quellen. Daher liegen von Kreidewässern nur wenige (ca. 10) Voll- und Teilanalysen vor.

In Abhängigkeit von der Lithologie des Grundwasserleiters und vor allem von der Verweilzeit des Wassers in der Kreide schwanken die elektrischen Leitfähigkeiten dieser wenigen Wässer bereits zwischen ca. 40 und 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, so daß im Folgenden auf die Angabe von Mittelwerten verzichtet wird. Während die Quellwässer häufig eine deutliche Calcium-(Magnesium)-Hydrogenkarbonat-Vormacht erkennen lassen und daher nach FURTAK & LANGGUTH als "normal erdalkalische Wässer, überwiegend hydrogenkarbonatisch" klassifiziert werden können, weist ein Teil der aus Brunnen geförderten, relativ gering mineralisierten Wässer hydrogenkarbonatisch-sulfatische bzw. überwiegend sulfatische Betonung auf.

Entsprechend zur Gesamtmineralisation verhalten sich die Hydrogenkarbonatgehalte (12-~200 mg/l) bzw. die Karbonathärten (0,5-9,5°dH). Die Sulfatwerte überschreiten nur selten 20 mg/l. Chlorid- und Nitratgehalte schwanken in Quellwässern zwischen <5 und knapp 35 mg/l, in den aus Brunnen geförderten Wässern zwischen <1 und ca. 10 mg/l. Die Erdalkalien treten in der Regel stark in den Hintergrund.

Bei einigen Kreidewässern werden z. T. deutlich erhöhte Eisen- und Mangangehalte beobachtet (so z. B. in einem Quellwasser von Eichenstruth [TK 25 Nr. 6334 Betzenstein] oder in einem Versuchsbrunnen zur Grundwassererkundung bei Vilseck 6.02; APEL [1975], LfW [1990]). Diese Wässer entstammen dem reduzierenden Milieu und bedürfen im Falle der Trinkwassernutzung einer Aufbereitung durch Belüftung und Filtration. — Die pH-Werte schwanken von schwach sauer (5,8) bis leicht alkalisch (8,5); dabei weisen die Quellwässer eine geringere Streubreite (6,5-7,4) als die aus Brunnen geförderten Wässer auf.

5.5 Quartär

Lediglich fluviatile Sande und Kiese des Wiesent- und Pegnitztales sowie Kiese und Flugsande am SW Rand der Alb (Blattgebiete 6533 Röthenbach und 6534 Happurg) stellen im Untersuchungsgebiet eigenständige Grundwasserleiter dar. Die übrigen quartären Lockersedimente können als Deckschichten den Chemismus der Sickerwässer bei der Bodenpassage beeinflussen. Derartige Vorgänge sind bei der Abhandlung der einzelnen Grundwasserleiter berücksichtigt. Wässer aus den quartären Ablagerungen werden durch verschiedenste Faktoren beeinflusst, so z. B. durch die Lithologie des Aquifers und die Verweildauer in ihm, durch Grundwässer, die aus dem Festgesteinsrahmen in das Quartär übertreten, durch Infiltrat von Flußwasser (sog. Uferfiltrat) und durch anthropogene Einwirkungen aus den vielfältigen Nutzungen des jeweiligen Einzugsgebietes.

Von Wässern aus fluviatilen Sanden und Kiesen lagen 10 Vollanalysen vor, nämlich vier aus dem Pegnitztal bei Hersbruck (APEL 1979) und sechs von der Grundwassererkundung "4.05 Unteres Wiesenttal". Die wichtigsten chemischen und physikalischen Parameter dieser Wässer sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Die Lokalitäten im Pegnitz- und Wiesenttal zeichnen sich durch ähnliche hydrochemische Charakteristika aus. So handelt es sich jeweils um "normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Wässer" (im Sinne von FURTAK & LANGGUTH). Die Wässer im Wiesenttal können als "hart" bezeichnet werden, die aus dem Raum Hersbruck schwanken zwischen "ziemlich hart" und "hart". In beiden Lokalitäten treten die Erdalkalien stark zurück; die Calcium-Gehalte sind deutlich höher als die des Magnesiums. — Die Wässer weisen mehrheitlich große Sauerstoffdefizite auf; verbunden hiermit sind häufig erhöhte Eisen- und Mangangehalte, die bei der Trinkwassernutzung eine Aufbereitung notwendig machen.

Tabelle 12: Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Quartär (zusammengestellt aus: APEL 1979 sowie aus unveröffentlichten Unterlagen des LfW)

Grundwasserleiter	Quartär	
Anzahl	10	
chemische und physikalische Angaben	Wertespanne	Mittelwert
elektr. Leitfähigkeit $\mu\text{S/cm}$	290 - 670	540
pH	7,1 - 7,45	7,25
KH °d	10,5 - 19	15,5
GH °d	13,5 - 25,5	19,5
	Angaben in mg/l	
Ca^{2+}	86 - 153	110
Mg^{2+}	1 - 25	18
Na^+	2 - 7	5
K^+	0,3 - 2,3	1,5
$\text{Fe}^{2+/3+}$	<0,01-2,4	0,85
Mn^{2+}	0 - 0,3	0,1
HCO_3^-	230 - 410	340
SO_4^{2-}	26 - 100	47
Cl^-	8 - 21	16
NO_3^-	<1 - 42	8
NO_2^-	0	0

6 Gefährdung der Grundwasserleiter

6.1 Allgemeine Grundlagen

Die Gefährdung der Grundwasserleiter geht von vielen, unterschiedlichen Schadstoffquellen aus; so z. B. von diffus verteilten Schmutz- und Sickerwässern im Bereich von Siedlungs- und Gewerbegebieten, von Eluaten aus ungedichteten Deponien bzw. aus Altlastdeponien, von der Art und Weise der Bodennutzung (Überdüngung, Reste von Pflanzenschutzmitteln u. ä.), von punktuellen Abwassereinleitungen, von mehr oder weniger hoch belasteten Straßenabwässern, von Schadstoffen aus der Luft, die der Niederschlag in den Boden verfrachtet u. dgl. Die Abschätzung des Schadstoffeintrages setzt die Kenntnis der jeweiligen Grundwasserneubildungsrate sowie der Mächtigkeiten und Beschaffenheiten der Deckschichten voraus. In der Regel ist ein Grundwasserleiter um so besser geschützt, je tiefer er liegt; hangende Grundwasservorkommen können den Hauptgrundwasserleiter vor Kontamination schützen.

Ausgangsgestein, Morphologie, Deckschichten und Bodennutzung stehen dabei häufig in engem Zusammenhang: So verursachen unterschiedlich verwitterungsresistente Ausgangsgesteine verschiedenartige Landschaftsformen, die eine ackerbauliche Nutzung begünstigen oder auch unmöglich machen können.

An flachen Hängen und in Muldenbereichen sowie am Hangfuß sind die Deckschichten mächtiger als auf flächigen Erhebungen und Steilhängen, wobei sie auf Kuppen und an Hängen mitunter völlig fehlen können.

Der Schadstofftransport im Boden setzt sich aus einer Vielzahl komplizierter Vorgänge zusammen, auf deren Darstellung hier bewußt verzichtet wird, da sie den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. So spielen u. a. der pH-Wert, Huminsäuren, der Ton- bzw. Schluffanteil (Adsorptionsvermögen) sowie die Kornsortierung der jeweiligen Deckschicht ebenso eine Rolle, wie die eigentlichen Sickervorgänge von der ungesättigten zur gesättigten Zone.

6.2 Gefährdung des Grundwassers im Rhätolias und im Dogger

Im Ausstrich der Rhätolias-Übergangsschichten sind die Sandstein-Höhenrücken großflächig waldbestanden, was sich günstig auf die Grundwasserbeschaffenheit auswirkt. Die dem Lias zugehörigen tonigen Feinsedimente bilden bei entsprechend großer, zusammenhängender Verbreitung eine Grundwasserdeckschicht, die einerseits das Rhät-Grundwasser abschirmt, andererseits jedoch die Menge der Grundwasserneubildung reduziert.

Der Ausstrich des Doggers ist im Untersuchungsgebiet mit wenigen Ausnahmen auf einen schmalen Streifen entlang der Jura-Steilstufe beschränkt. Nur dieser Saum wäre anthropogenen Einflüssen unmittelbar ausgesetzt. Jedoch ist der Doggerausstrich aus morphologisch-lithologischen Gründen über weite Bereiche bewaldet, so daß das Dogger-Grundwasser nicht erkennbar anthropogen beeinflusst wird.

6.3 Bewertung der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers

Der Malmkarst ist mit Ausnahme der großen Muldenstrukturen weitgehend nicht mit Kreidesedimenten bedeckt; die weitflächige Verebnung der Albhochfläche dient überwiegend der Landwirtschaft. Eine Gefährdung des Karstgrundwassers besteht jedoch nicht allein durch die landwirtschaftliche Nutzung, sondern auch durch Abwassereinleitungen einzelner, auf der Hochfläche gelegener Orte. Im Malmkarst ist, verglichen mit anderen Grundwasserlandschaften, aufgrund der stark wechselnden Grundwassermächtigkeiten der jeweilige Verdünnungsfaktor mitausschlaggebend für die Beschaffenheit des Grundwassers. Zur Abschätzung der potentiellen Gefährdung des Malmkarstes wurde ein Bewertungsschema entworfen (vgl. Diagramm 1).

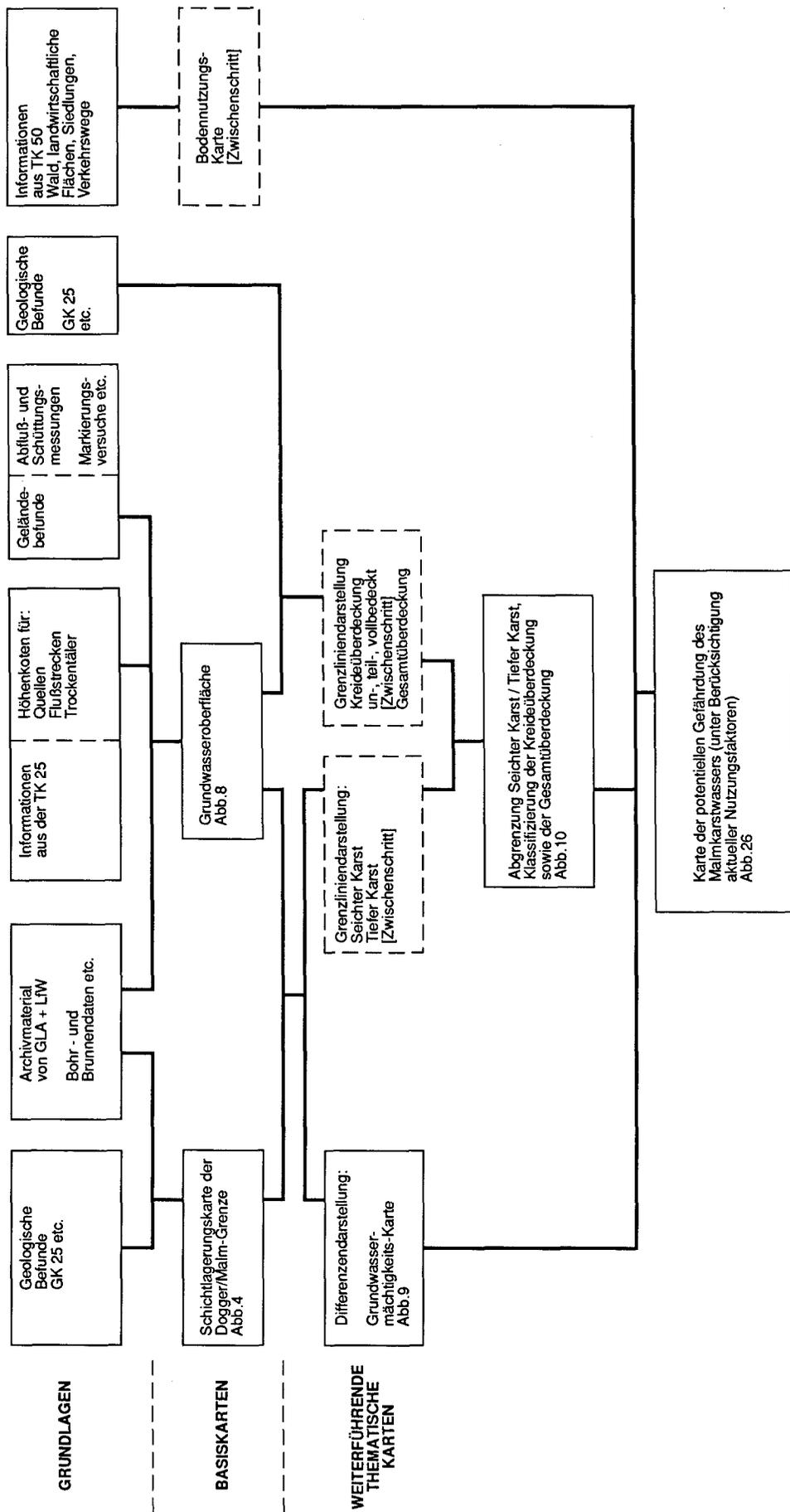


Diagramm 1: Entwicklungsschritte des Schemas zur Bewertung der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers

6.3.1 Beurteilungskriterien

Die Beurteilung erfolgte nach folgenden Kriterien :

- Mächtigkeiten des Grundwasserleiters und des Karstwassers (→ Verdünnung)
- Unterscheidung von Flächen im Einzugsbereich von Seichtem und Tiefem Karst (→ Umsatzgeschwindigkeit)
- Ausdehnung und Klassifizierung der Überdeckung (→ Schutzfunktion)
- aktuelle Nutzungsfaktoren (→ Eintragspotential).

6.3.1.1 Bewertung der Grundwassermächtigkeit

Eine wichtige Rolle bei einem eventuellen Schadstoffeintrag spielt die Grundwassermächtigkeit. In Gebieten mit hoher Grundwassermächtigkeit können die Schadstoffe relativ schnell zu weniger gefährlichen oder ungefährlichen Konzentrationen verdünnt werden, während in Gebieten mit geringer Grundwassermächtigkeit diese Verdünnung nicht gewährleistet ist. Hier wurden vier Mächtigkeitsklassen unterschieden und zwar jeweils für Seichten und Tiefen Karst getrennt (vgl. Abb. 26 c).

6.3.1.2 Unterscheidung Seichter Karst/Tiefer Karst

Die Untergliederung Seichter Karst — Tiefer Karst wurde gewählt, da im Tiefen Karst aufgrund des ausgedehnten Grundwasserkörpers eventuelle Schadstoff-Einflüsse besser verteilt und verdünnt werden können. Demgegenüber weisen Teilbereiche des Seichten Karstes, so z. B. die Lange Meile im NW des Untersuchungsgebietes räumlich begrenzte Grundwasservorkommen auf, in denen Schadstoff-Einträge sich relativ schnell und kaum verdünnt durchpausen. Weiterhin sind im Tiefen Karst meist längere Verweilzeiten als im Seichten festzustellen; organische Beeinflussungen können somit dort leichter abgebaut werden.

6.3.1.3 Bewertung der Kreideüberdeckung

Die Kreidebedeckung wirkt meist filtrierend für eventuell eindringende Schadstoffe, so daß sie den Malmkarst-Grundwasserleiter in begrenztem Umfang vor Verunreinigungen zu schützen vermag. Ein wirksamer Schutz des Grundwasserleiters ist jedoch erst durch eine große zusammenhängende Kreidedeckschicht gewährleistet. Deshalb wurden Gebiete, in denen nur kleinräumige Kreidesedimente ausstreichen als unbedeckt klassifiziert. Es wurde unterschieden zwischen:

- | | | |
|--|---------|-----------------|
| - Karst ohne Kreideüberdeckung: | <70 % | Kreidebedeckung |
| - Karst teilweise mit Kreideüberdeckung: | 70-95 % | Kreidebedeckung |
| - Karst mit Kreideüberdeckung: | >95 % | Kreidebedeckung |

Ein relativ weitflächiger Kreideausstrich läßt auch eine gewisse Mindestmächtigkeit dieser Sedimente und somit eine entsprechende Filterfunktion erwarten.

6.3.1.4 Bewertung der Gesamtüberdeckung (einschließlich quartärer und tertiärer Deckschichten)

Lehmig-schluffige Deckschichten des Quartärs und Tertiärs verzögern ebenfalls die Bodenpassage des Sickerwassers. Ablehme und Lößüberdeckung weisen allerdings, in Abhängigkeit von der morphologischen Lage größere Mächtigkeitsschwankungen auf. Weiterhin verzahnen bereichsweise diese jungen Deckschichten mit Kreidesedimenten. Daher wurde bei der Bewertung der Deckschichten die Kreideüberdeckung mit den tertiären und quartären Deckschichten zur Gesamtüberdeckung zusammengefaßt und nach ihrer flächenhaften Ausdehnung beurteilt (vgl. Kap. 4.2.5.2). Folgende Klassen der Gesamtüberdeckung wurden unterschieden:

<30 %, 30-50 %, 50-80 %, >80 %.

6.3.1.5 Berücksichtigung der aktuellen Nutzung

Darüberhinaus galt es, die aktuelle Nutzung mit in die Betrachtungen einzubeziehen, da von einer Siedlung (z. B. durch Abwassereinleitung, Abwasserverlusten im Kanalsystem) oder einer stark befahrenen Autobahn (Versickerung von Straßenabwasser, Unfallgefahr) eine größere potentielle Gefährdung zu erwarten ist, als von einer Waldfläche. Daher wurde der Klassifizierung des Waldbestandes große Bedeutung zugemessen. Allerdings schien es sinnvoll, nur größere Gebiete mit zusammenhängendem Waldbestand zu berücksichtigen, da nur sie ausreichenden Schutz für das Grundwasser bieten können. Dabei war man sich durchaus bewußt, daß auch die Bäume über den Luftpfad Stickstoff aufnehmen und über die Wurzeln Nitrat in den Untergrund abgeben. Allerdings dürfte dieser Eintrag deutlich geringer sein, als eine intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung, wie sie derzeit in weiten Teilen der Albhochfläche betrieben wird. — Eine Ausweisung bzw. Abgrenzung von Wiesen war nicht möglich, weil hierüber kein aktuelles, flächendeckendes Datenmaterial zur Verfügung stand. In Anlehnung an die Bewertung der Kreideüberdeckung wurde unterschieden zwischen Gebieten mit:

- 95 - 100 % Waldbestand: "bewaldet"
- 70 - 95 % Waldbestand: "teilbewaldet"
- <70 % Waldbestand: "unbewaldet" bzw. landwirtschaftlich genutzt

sowie zwischen Sonderflächen mit:

- frequentierten Verkehrswegen (Autobahnen, Bundesstraßen) und Siedlungsflächen
- Wasserflächen und Flüssen.

Oberflächengewässer üben im Malmkarst überwiegend Vorflutfunktion aus und kommen somit nicht bzw. nur untergeordnet für einen potentiellen Schadstoffeintrag in Frage. Entsprechend wurden Exfiltrationsstrecken wie Flächen mit 95-100 % Waldbestand, Infiltrationsstrecken wie teilbewaldete Flächen gewertet. — Zur Darstellung der Nutzungsfaktoren wurde als Zwischenschritt eine Arbeitskarte erstellt und am GLA archiviert. Ihre Ergebnisse werden im folgenden kurz erläutert:

Nordteil des Untersuchungsgebietes: Etwa 75 % der Gesamtfläche weisen keinen, für den Grundwasserschutz relevanten Waldbestand auf. Von den 20-25 % mit schützendem Waldbestand können nur etwa 6-7 % als bewaldet bezeichnet werden. Die Siedlungen, meist Dörfer oder Marktgemeinden, sind relativ gleichmäßig im Arbeitsgebiet verstreut. Zwei größere Siedlungsflächen stellen die Kleinstädte Hollfeld und Waischenfeld dar. Die BAB A 70 (Bamberg-Bayreuth) durchquert in W-E-Richtung das Gebiet zwischen Würgau und Thurnau.

Südteil des Untersuchungsgebietes: Hier sind etwa 35-40 % der Gesamtfläche den für den Grundwasserschutz relevanten Waldflächen zuzurechnen. Etwa 15 % davon stellen bewaldete Gebiete dar. Die größten zusammenhängenden Areale bilden der Veldensteiner Forst sowie der Herzogs- und Wellucker Wald. Die Siedlungen liegen, abgesehen von den großen Waldgebieten und dem Truppenübungsplatz Grafenwöhr, relativ gleichmäßig im Arbeitsgebiet verteilt. Größere Städte sind Pegnitz, Auerbach, Vilseck, Sulzbach-Rosenberg und Amberg. Die B 85 (Pegnitz-Auerbach- Amberg) und die A 9 (Nürnberg-Berlin) durchqueren das Untersuchungsgebiet in NNE- bzw. NNW-Richtung, die A 6 verläuft südlich von Alfeld und Amberg in W-E-Richtung.

6.3.2 Karte zur potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers

Die Karte zur potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers ist zunächst im Maßstab 1:50 000 erstellt und anschließend verkleinert worden (Abb. 26 a,b). Alle Arbeitskarten und Zwischenschritte wurden im Maßstab 1:50 000 erstellt. Die geologisch-hydrogeologischen Informationen lieferten entsprechende Arbeitskarten (vgl. Abb. 9,10). Zur Ermittlung der Nutzungsfaktoren wurde mit Hilfe der Topographischen Karte (TK 50) eine generalisierte Übersichtskarte der aktuellen Nutzung entworfen. Anschließend sind all diese Karteninhalte miteinander verschnitten worden. Mit Hilfe des Bewertungsschemas (Abb. 26 c) konnte man 156 möglichen Kombinationen fünf Gefährdungsklassen zuordnen und zwar von "gering" über "relativ gering", "mittelmäßig", "stark" nach "sehr stark" gefährdet.

6.3.2.1 Beschreibung der Ergebnisse

Nordteil des Untersuchungsraumes (Abb. 26 a)

Am Alb nord- und -westrand (Seichter Karst) ist das Grundwasser fast ausnahmslos "stark" bis "sehr stark" durch potentielle Schadstoffeinträge gefährdet, da hier Kreideüberdeckungen fehlen und nur geringe Grundwassermächtigkeiten vorhanden sind.

Die Hollfelder Mulde ist überwiegend "relativ gering" bis "gering" durch potentielle Verunreinigungen gefährdet. "Mittelmäßige" bis "starke" Gefährdungen sind vor allem im Bereich von Ortschaften sowie entlang von Teilstrecken der Bundesautobahn A 70 zu erwarten. Die Hollfelder Mulde wird im N und W von einem schmalen Saum umrahmt, der größtenteils dem nicht kreideüberdeckten, Tiefen Karst, mit Grundwassermächtigkeiten zwischen <10 und 50 m zuzurechnen ist; hier ist mit "mittelmäßigen", z.T. auch "starken" potentiellen Gefährdungen zu rechnen.

Südteil des Untersuchungsraumes (Abb. 26 b)

Gut geschützte Grundwasservorkommen treten hauptsächlich in der Frankenalbmulde und Vilsecker Mulde auf. In der Veldensteiner Mulde, in welcher die Frankenalbmulde die größte Vertiefung erfährt, ist das Grundwasser "gering" gefährdet. Nur im Bereich von Ortschaften und Hauptverkehrswegen ist hier eine stärkere potentielle Gefahr durch Schadstoffeinträge in das Grundwasser gegeben. Im Veldensteiner Forst und Herzogswald besteht in einem fast 100 km² umfassenden Areal eine "geringe" Grundwassergefährdung, da hier neben dem geschlossenen Waldbestand in weiten Bereichen noch eine Kreideüberdeckung vorhanden ist. Im Umfeld des Eschenfelden-Königsteiner Gewölbes setzt sich, der Flexur von Krottensee und Welluck folgend, ein Streifen mit überwiegend "mittelmäßiger", bereichsweise aber auch stark wechselnder Grundwassergefährdung nach NE fort.

In einem unterschiedlich breiten Band, das sich westlich bzw. südwestlich der Frankenalbmulde anschließt, besteht eine überwiegend "mittelmäßige", z.T. auch "starke" Gefahr durch potentielle Grundwasserverunreinigungen. Diese Gebiete weisen gegenüber der Frankenalbmulde eine deutlich geringere Grundwassermächtigkeit auf, gehören jedoch noch dem Tiefen Karst an.

In der Vilsecker Mulde ist das Grundwasser sehr gut geschützt (vorwiegend "geringe" Gefährdung). Dies ist auf die beinahe geschlossene Kreideüberdeckung, einen bereichsweise vorhandenen Waldbestand sowie relativ hohe Grundwassermächtigkeiten zurückzuführen.

Im äußersten S des Untersuchungsgebietes wechseln sich westlich der Frankenalbmulde sowohl im Seichten, als auch im Tiefen Karst relativ engräumig unterschiedliche Gefährdungsklassen miteinander ab. Dieser Wechsel wird mit lückenhafter Kreideüberdeckung und rasch sich ändernder Verbreitung von Lehmauflagen bei geringen bis mittleren Grundwassermächtigkeiten (i. d. R. um 50 m) erklärt. Im Seichten Karst überwiegen generell "starke" bis "sehr starke" Grundwassergefährdungen.

6.3.2.2 Kritische Würdigung

Eine Gegenüberstellung der potentiellen Gefährdung mit der aktuellen anthropogenen Beeinflussung läßt relativ gute Übereinstimmungen erkennen. Es können deutlich die gering beeinflussten Bereiche des Tiefen Karstes (mit zumeist hohen Grundwassermächtigkeiten) von den stärker beeinflussten Randbereichen unterschieden werden. Die tatsächlichen Beeinflussungen in den Gebieten geringer Grundwassermächtigkeit sind in der Regel etwas günstiger, als es die Karte der potentiellen Gefährdung erwarten läßt. Wahrscheinlich sind die geringeren Beeinflussungen in solchen Teilgebieten auf das Pufferungsvermögen durch stoffliche Umsetzungen in der Bodenzone zurückzuführen.

In der Frankenalb verzahnen allerdings — aufgrund wechselnder morphologischer Positionen, verschiedener Substrate und Mächtigkeitsschwankungen von Deckschichten oder Vergrusungszonen — engräumig unterschiedliche Bodentypen. Einen schematischen Überblick der Bodengesellschaften im Untersuchungsraum vermittelt Abb. 24. — Liegen innerhalb einer Fläche besser und schlechter

durchlässige Areale nebeneinander, so muß gerade im Karst der Fläche mit dem höheren potentiellen Gefährdungspotential die größere Bedeutung zugewiesen werden. Dies bedeutet jedoch, daß zumindest von den landwirtschaftlich genutzten Flächen des Untersuchungsraumes kleinmaßstäbliche bodenkundliche Bearbeitungen vorliegen müßten, um die Abschirmungsfunktion der Böden in die Beurteilung mit einbeziehen zu können. Vom gesamten Untersuchungsgebiet liegt allerdings nur die BK 25 Blatt Hersbruck (DIETZ 1973) vor. Aus diesem Grunde konnte die Abschirmungsfunktion durch die Bodenzone bei der Abschätzung der potentiellen Gefährdung nicht berücksichtigt werden. Die Karte der potentiellen Gefährdung stellt somit, insbesondere für die Gebiete geringer Grundwassermächtigkeit, einen unter ungünstigen Bedingungen zu erwartenden Belastungszustand dar.

Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungsansätze läßt sich die Karte der "potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers" nicht direkt mit dem Kartenwerk der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (z. B. Bl. L 6534 Hersbruck, DIEPOLDER 1994) in Beziehung setzen. — Die Klassen der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (= Boden und tiefere ungesättigte Zone) wurden mit Hilfe der petrographischen Ausbildung und Mächtigkeit der ungesättigten Zone sowie der durch die Bodeneigenschaften bedingten Sickerwassermenge bestimmt. Demgegenüber wurden in die Beurteilung der Klassen der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers neben den Deckschichten auch die Grundwassermächtigkeit und die aktuelle (generalisierte) Landnutzung mit einbezogen.

Die fünf Klassen in Abbildung 26 beziehen sich lediglich auf das Malmkarstwasser. Ihre Abstufung und Wertung ist nicht mit der Klassifizierung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung gleichzusetzen. — Ein Vergleich der Schutzfunktions-Darstellung mit der Bewertung potentieller Gefährdung zeigt für den Ausschnitt des Blattgebietes L 6534 Hersbruck folgendes Ergebnis: In Gebieten mit geringer Grundwassermächtigkeit lassen sich tendenziell gute Übereinstimmungen beobachten; dies ist vorwiegend in dem für diese Teilgebiete ähnlichen Bewertungsmodus begründet. Demgegenüber ergeben sich in Bereichen mit hoher Grundwassermächtigkeit (>50 m) und/oder weitflächigem Waldbestand bei der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers optimistischere Bewertungen als bei der Klassifizierung der Schutzfunktion.

Auf tektonischen Zerrüttungsbahnen, Klüften und Spalten pausen sich auf die Geländeoberfläche Einbruchstrichter, sogenannte Dolinen durch, die über das Kluftsystem direkten hydraulischen Kontakt zwischen der Geländeoberfläche und dem Grundwasserleiter herstellen. Schadstoffeinträge können auf diese Weise punktuell in das Karstwasser gelangen und sich dort entsprechend der Strömung ausbreiten. Die Geschwindigkeit der Stoffverlagerung wird wesentlich von den Durchlässigkeiten an den Dolinenwänden bzw. am Dolinenboden bestimmt. Zahlreiche Dolinen sind mit Kreidesedimenten und/oder Lehmen plombiert, so daß potentielle Einträge verzögert bzw. zurückgehalten werden. Verfügt eine Doline nicht über ein entsprechend großes oberirdisches Einzugsgebiet (fehlende "Vorfluter-Funktion"), so ist unter natürlichen Gegebenheiten ein Eintrag relativ unwahrscheinlich.

Weiterhin bestimmt die Nutzung im Einzugsgebiet von Dolinen wesentlich das Gefährdungspotential. Insbesondere in größeren, geschlossenen Waldgebieten (Waldbestand >70 %) geht von Dolinen keine besondere Gefährdung aus. Dagegen können Dolinen, mit gut durchlässigen Wänden bzw. Böden und entsprechenden Einzugsgebieten in vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebieten, vor allem jedoch in Siedlungsräumen Schadstoffeinträge deutlich beschleunigen. Derartige Vorgänge wurden pauschal bei der Wertung der aktuellen Nutzungsfaktoren berücksichtigt; auf eine gesonderte Wertung der Dolinen wurde verzichtet. Ergänzend ist ihre Verbreitung in Abbildung 29 dargestellt.

7 Bilanzierung der Grundwasservorkommen

7.1 Ermittlung des Grundwasserdargebotes

7.1.1 Methodik

7.1.1.1 Definitionen

Den Ausführungen über die Verfahrensweise bei der Ermittlung des Grundwasserdargebotes seien einige Begriffserklärungen vorangestellt. Sie entsprechen den in DIN 4049 TEIL 1 (1979), DIN 4049 TEIL 1 (1992) sowie DIN 4049-3 (1994) bzw. – soweit dort nicht enthalten – den vom ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977) und von ARMBRUSTER (1982) gegebenen Vorschlägen.

Bei zeitvariablen Größen wird im folgenden, soweit nichts anderes vermerkt ist, ein mittlerer und langjährig gültiger Wert verstanden.

- **Grundwasserneubildung** (Grundwasserneubildungsrate) [mm/a , $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$]:
Wasservolumen pro Zeiteinheit, welches durch Infiltration von Niederschlags- oder Oberflächenwasser räumlich und zeitlich ungleichmäßig das Grundwasser ergänzt.
- **Grundwasserdargebot** (eines Teilgebietes) [m^3/s , l/s]:
Grundwasserneubildung, vermehrt durch den (unterirdischen) Grundwasserzustrom.
- **Grundwasserabfluß** [m^3/s , l/s]:
Der Teil des Abflusses der dem Vorfluter aus dem Grundwasser zufließt.
- **Einzugsgebiet** [km^2]:
Gebiet, aus dem Wasser einem bestimmten Ort zuströmt.

Es werden unterschieden:

- Oberirdisches Einzugsgebiet (A_{EO})
- Unterirdisches Einzugsgebiet (A_{EU})

In der Wasserwirtschaft wird der Begriff Grundwasserdargebot durch Zusätze wie "nutzbares", "verbrauchbares", "verfügbares", "natürliches", "gewinnbares" etc. weiter spezifiziert bzw. eingeschränkt. Dabei geht es vor allem um die Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher, ökonomischer, ökologischer oder fassungstechnischer Belange. Stets muß jedoch das Grundwasserdargebot nach obiger Definition zugrunde gelegt werden. Wie bereits im Wasserwirtschaftlichen Rahmenplan Isar (GLA 1978), wird das so definierte Dargebot als hydrologisches (Grundwasser-) Dargebot bzw. als natürliches Grundwasserdargebot bezeichnet, damit bei der Grundwasserförderung in Flußtälern die ("künstlichen") Anteile von Uferfiltrat ausgrenzt werden können.

7.1.1.2 Methoden

Da grundsätzlich Angaben benötigt werden, die für eine definierte Fläche Gültigkeit haben, handelt es sich in der Regel um statistische Mittelwerte, nicht nur bezogen auf eine Zeitreihe, sondern auch auf die betrachtete Fläche. Dies muß bei der weiteren Verarbeitung der Werte berücksichtigt werden. In erster Annäherung können diese Angaben jedoch bei der Betrachtung ergiebiger Fassungsräume angenommen werden (ergiebigere Fassungsräume = höhere Höffigkeit = höhere Neubildung). — Voraussetzung für die Ermittlung des Grundwasserdargebotes ist die Kenntnis der mittleren Grundwasserneubildung über einen längeren Zeitraum. Für die mitteleuropäischen Klimabedingungen gibt es verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserneubildung. Sie sind in ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977) erstmals zusammengestellt, erläutert und kritisch gewürdigt. Von den zahlreichen Verfahren kommen jedoch nur wenige bei wasserwirtschaftlichen Aufgabenstellungen häufiger zur Anwendung bzw. sind prinzipiell dafür geeignet, so die Bestimmung

- aus dem Abfluß in Vorflutern:
 - MoMNQ- und MoMNQ_r-Verfahren (WUNDT 1953, KILLE 1970),
 - $\frac{1}{n} \sum$ 6-MoMNQ-Verfahren (niedrigster Mittelwert der kleinsten Tagesabflüsse von 6 zusammenhängenden Monaten) nach KÖPF & ROTHASCHER (1980),
 - Linien-Verfahren nach NATERMANN (1951),
 - Statistik der Trockenwetterabflüsse nach SCHROEDER (1955);
- aus der Wasserhaushaltsgleichung;
- über den unterirdischen Grundwasserabstrom;
- mit Hilfe von Grundwassermodellen.

Verfahren, die über den **Chemismus** von Niederschlag, Grundwasser und Oberflächenwasser die Grundwasserneubildung oder den Grundwasserabfluß bestimmen, sind entweder in ihrer Anwendbarkeit auf anthropogen nicht beeinflusste Gebiete beschränkt oder wissenschaftlich noch nicht ausdiskutiert.

Die direkte Erfassung der Grundwasserneubildungsrate mit **Lysimetern** oder über den Bodenwasserhaushalt ist meist entweder nur für kleine einheitliche Gebiete oder für einen begrenzten Beobachtungszeitraum möglich. Die Grundwasserneubildung uneinheitlich aufgebaute Einzugsgebiete oder die mittlere Grundwasserneubildung ist, wenn überhaupt, nur mit sehr großem Aufwand zu ermitteln.

Grundwassermodelle sind zwar sehr aufwendig, haben aber den Vorteil, daß praktisch alle Einflußgrößen berücksichtigt werden können. Voraussetzung für die Erstellung eines Grundwassermodells ist jedoch, daß das zu behandelnde Gebiet hydrogeologisch gut untersucht ist (Aquiferdaten, Grundwasser Oberfläche) und eine mehrfache Eichung an bekannten Zuständen erfolgen kann.

Bei einfachen Verfahren, die nur Aquiferdaten (Durchlässigkeit, Transmissivität) verarbeiten — etwa die Berechnung des Grundwasserabstromes — muß häufig mit größeren Fehlerspannen gerechnet werden als dies unter optimalen Bedingungen bei den Abflußverfahren oder bei der Wasserhaushaltsgleichung der Fall wäre. Diese Methode ist für Kluftgrundwasserleiter nur in Ausnahmefällen gut anwendbar.

Auch die Wasserhaushaltsgleichung stellt nur in Gebieten ohne oberirdische Entwässerung ein eigenständiges Verfahren dar. Es verbleiben demnach für eine routinemäßige Anwendung nur die hydrologisch-stochastischen Verfahren.

Hydrologisch-analytische Verfahren wie Messungen des Niedrigwasserabflusses am Ende längerer Trockenperioden — vor allem Reihenabflußmessungen — können dort, wo nicht in ausreichendem Maße langjährig beobachtete Abflußmeßstellen vorhanden sind, gute Werte für das Mindestmaß der Grundwasserneubildung liefern. Durch Vergleich mit langjährig beobachteten Meßstellen ist es u. U. möglich, auch für andere Abflußjahre die Grundwasserneubildung anzugeben bzw. einen Durchschnittswert zu erhalten. Dies gilt v. a. für kleinere Einzugsgebiete am Albrand. Grundsätzlich sollte bei der Ermittlung der Grundwasserneubildung stets die Anwendung mehrerer, mit ihren Eingangsdaten voneinander unabhängiger Verfahren angestrebt werden.

Für den vorliegenden hydrogeologischen Fachbeitrag wurden die Verfahren, die auf der Auswertung der monatlichen Niedrigwasserabflüsse basieren, für eine erste Grundausswertung herangezogen. Eine weitere Bestätigung bzw. Präzisierung der so erhaltenen Werte konnte über zusätzliche Auswertungen, etwa von Niedrigwasserabflüssen, dort gemacht werden, wo ergiebige (auch derzeit stark genutzte) Fassungsräume vorliegen bzw. wo die angewandten Verfahren sichtlich falsche Ergebnisse liefern.

Als notwendige Voraussetzungen für die großflächige Anwendung eines Berechnungsverfahrens sind zu benennen:

- langjährige Beobachtungsdaten,
- standardisierbare, einfache Berechnungsverfahren,
- eine ausreichende Anzahl von gleichmäßig verteilten Meßstellen im Gesamtgebiet.

Die Ausgangswerte für die weitere Ermittlung des Grundwasserdargebotes der hydrogeologischen Einheiten lieferten die monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Von ihnen wird angenommen, daß sie nur Grundwasserabfluß enthalten.

Dieser mittlere, langjährige Grundwasserabfluß wird gleichgesetzt der mittleren, langjährigen Grundwasserneubildung. Die dafür vorgeschlagenen verschiedenen Berechnungsverfahren nehmen auf die klimatischen Bedingungen unterschiedlicher Landschaftsräume Bezug.

Das Verfahren nach KILLE (1970) berücksichtigt die in Hessen gewonnenen Erfahrungen, daß besonders im Mittelgebirge und Gebirgsvorland im Winterhalbjahr die MoMnQ-Werte Anteile von reinem Oberflächenwasserabfluß, zumindest aber sogenannten Interflow (Zwischenabfluß in Deckschichten bzw. Abfluß oberhalb des ersten Grundwasserstockwerkes) und Subsurface-Abfluß (im Bereich der Verwitterungsdecke) enthalten. Zur Abtrennung dieser Fremdanteile wurde das der Größe nach geordnete Kollektiv der MoMnQ-Werte betrachtet. Die graphische Darstellung ergibt ein Bild ähnlich einer Dauerlinie. Die verlängerte Ausgleichsgerade kann als Trennlinie zwischen den Oberflächen- bzw. oberflächennahen Abflüssen und dem reinen Grundwasserabfluß angesehen werden. Aus der Fläche unter der Ausgleichsgeraden kann der mittlere Grundwasserabfluß berechnet werden. Er entspricht der Mittelordinate der Ausgleichsgeraden.

Nach dem vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) vorgeschlagenen Verfahren (KÖPF & ROTHASCHER 1980; ROTHASCHER 1987) wurde der niedrigste Mittelwert der kleinsten Tagesabflüsse von 6 zusammenhängenden Monaten als Grundwasserneubildung $MQ_6 = \frac{1}{n} \sum 6\text{-MoMnQ}$ bezeichnet. Dabei wird angenommen, "daß damit das Verfahren auch für Südbayern anwendbar ist, weil der Einfluß der Schneeschmelze in den Alpen automatisch eliminiert wird: Die niedrigsten Sechsmonatskombinationen treten hier nämlich in den Herbst- und Wintermonaten auf, in denen der Niederschlag gering ist, bzw. in Form von Schnee festliegt und daher keinen Beitrag zum Abfluß leisten kann". — Unterschiedliche Zeitreihen für eine Auswertung der Niedrigwasserabflüsse über die Ermittlung von Reduktionsfaktoren o. ä. vergleichbar zu machen, ist sehr aufwendig. Es wurde daher so verfahren, wie von ROTHASCHER (1987) vorgeschlagen:

"Die Erfahrung zeigt, daß Niedrigabflüsse nach den hier definierten Mittelwerten von unterschiedlichen Jahresreihen weit weniger abhängig sind als Extremwertstatistiken z. B. für seltene Hochwasserabflüsse. Die Verwendung von Werten unterschiedlich langer Jahresreihen ist daher generell im Rahmen der hier erforderlichen Genauigkeit zulässig, wobei selbstverständlich gewisse Grenzen nach unten bei der Bewertung der Aussagekraft der Berechnungen zu beachten sind; eine Mindestbeobachtungsdauer von fünf Jahren sollte in der Regel nicht unterschritten werden."

In Gebieten, wo eine Versickerung von Oberflächenabflüssen stattfindet (z. B. im mittleren Wiesent- oder im oberen Pegnitztal), ist die aus den Abflußwerten ermittelte Grundwasserneubildung zu gering. Andererseits ist sie im jeweiligen Unterlauf, wo das Wasser wieder zu Tage tritt, entsprechend zu hoch. Um diese Vorgänge auszugleichen wurden zur Bilanzierung größere Bezugsgebiete gewählt. Wasserausleitungen aus Teilgebieten, so z. B. die Wassergewinnung Ranna-Mosenberg wurden bei der Bilanzierung mitberücksichtigt.

7.2 Gliederung nach geologisch-hydrogeologischen Gesichtspunkten

Um die aktuellen Fördermengen mit den Grundwasserneubildungsraten des Untersuchungsgebietes vergleichen und somit Grundwasservorkommen abgrenzen bzw. quantifizieren zu können, wird der Untersuchungsraum in drei geologisch-hydrogeologische Einheiten unterteilt, nämlich in:

- das Albvorland, das überwiegend aus Rhätolias, Lias und Dogger aufgebaut wird,
- den Malmkarst einschließlich der Vilsecker Kreide-Mulde,
- quartäre Grundwasservorkommen in Talbereichen und am Albrand.

7.2.1 Albvorland

7.2.1.1 Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate

Im Albvorland wechseln Ton- und Sandsteinpakete des Rhätolias, Lias und Dogger miteinander ab. Die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen der Jahresreihe 1931/60 schwanken hier recht einheitlich zwischen 650 und 850 mm. Verschiedenartige Grundwasserneubildungsraten lassen sich daher weitgehend mit lithologischen Unterschieden erklären. Zur Beurteilung der Grundwasserneubildungsraten standen nur in Teilgebieten, vor allem im NE und SW des Arbeitsgebietes Abflußmeßstellen zur Verfügung. Die so erhaltenen Ergebnisse müssen daher auf das übrige Albvorland übertragen werden.

Wie Tabelle 13 zeigt, schwanken die nach den Methoden von KILLE und ROTHASCHER berechneten Grundwasserneubildungsraten im Albvorland zwischen 1,3 und 4,45 l/(s*km²). Dabei lassen Teilgebiete in denen weitflächig der Doggersandstein ausstreicht (z. B. Püttlach/Oberhauenstein) leicht erhöhte Tendenzen gegenüber solchen mit Zutagetreten von vorwiegend tonigen Sedimenten erkennen (z. B. Ailsbach/Schweinsmühle). Entsprechend dürfte die Verbreitung toniger Gesteine hier durch Grundwasserneubildungsraten $\leq 1,5$ l/(s*km²), der Ausstrich von Sandsteinen (im Dogger und Rhätolias) durch solche zwischen 3 und 5 l/(s*km²) charakterisiert sein.

Am Westrand der Malmtafel, wo der Dogger unter den Malm abtaucht, findet nur noch eine sehr geringe Grundwasserneubildung statt. Das Karstgrundwasserstockwerk gibt hier über Klüfte und Störungen, im Raum Heiligenstadt lokal auch über Basaltgänge, geringe Wassermengen an den Doggersandstein ab ("leaky-aquifer"). Die Neubildungsrate sinkt auf < 1 l/(s*km²).

Dennoch werden in relativ geringer Entfernung zum Albrand und bei nur mäßiger Malmüberdeckung im Doggersandstein örtlich bis regional bedeutsame Grundwasservorkommen angetroffen. Die Grundwasserneubildung vollzieht sich für diese Vorkommen in Gebieten, in denen der Doggersandstein unbedeckt ausstreicht. Ein Teil dieses Wassers tritt am Albrand in Quellen zu Tage, ein anderer strömt, bei einem entsprechenden Kluftvolumen der Schichtneigung folgend in den überdeckten Sandstein.

7.2.1.2 Aktuelle Nutzung der Grundwasserleiter

Die Grundwasserführung der Sandsteinhorizonte wird von der lokalen lithologischen Ausbildung, vor allem aber vom Kluftvolumen bestimmt (vgl. Kapitel 3). Insbesondere der Rhätolias-Sandstein weist dabei stark wechselnde Grundwasser-Höffigkeiten auf. Grundwasservorkommen aus dieser Gesteinsfolge sind weitgehend nur lokal von Bedeutung; allerdings können sie bei entsprechendem Kluftvolumen auch regionale Bedeutung erlangen (z. B. Brunnen der Eggolsheimer-Gruppe).

Als Grundwasserleiter ist der Doggersandstein lokal bis regional (z. B. Leinleitertal) bedeutsam. Zahlreichen Ortschaften dienen perennierende Quellen, die meist nur wenige l/s spenden, zur Trinkwasserversorgung. Daneben existieren einige Brunnen, die im Verbreitungsgebiet des Seichten Karstes angesetzt sind und das Doggergrundwasser-Stockwerk erschlossen haben. Doggerwasser fördern beispielsweise die im mittleren Leinleitertal gelegenen Brunnen der Heiligenstädter-Gruppe. Im oberen Leinleitertal befinden sich die Brunnen der Poxdorfer-Gruppe, die Mischwasser aus dem Malm- und dem Doggergrundwasserstockwerk der Versorgung zuführen.

Tabelle 13: Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate im Albvorland

Gewässer	Meßstelle	Größe des oberirdischen Einzugsgebiets (km ²)	Geologie	Beobachtungszeitraum	Grundwasserneubildungsrate (l/(s*km ²)) nach den Verfahren von		
					WUNDT	KILLE	ROTHASCHER
Ailsbach	Schweinsmühle	34,1	Lias u. Dogger	1957-1980	2,0	1,55	--
				1957-1984	--	--	1,3
Püttlach	Oberhauenstein	30,2	Dogger	1971-1980	4,7	4,25	--
				1971-1984	--	--	3,8
Roter Main	Creussen	34,9	Lias, Dogger, Feuerletten, (Sandsteinkeuper)	1970-1980	2,35	1,95	--
				1970-1984	--	--	1,6
Schwabach	Büg	79,4	Dogger, Lias, Malm	1951-1980	4,5	3,85	--
				1950-1984	--	--	2,95
Schwarzach	Rasch	209	Dogger, Lias, (Malm)	1951-1980	4,9	4,45	--
				1951-1984	--	--	3,95
Truppach	Plankenfels	105	Dogger, (Lias, Malm)	1971-1980	4,05	3,55	--
				1971-1984	--	--	3,0

Die Wässer aus dem Rhätolias- bzw. Doggersandstein weisen zwar große Streubreiten bezüglich anthropogener Einflußmöglichkeiten auf, der aktuelle Grad der Beeinflussung ist jedoch im Mittel relativ gering, was wahrscheinlich mit der weitgehend forstwirtschaftlichen Nutzung der Sandsteinausstriche erklärt werden kann (vgl. Kap. 5.1, 5.2).

7.2.1.3 Prognose über mögliche Steigerungen der Trinkwasserförderung

Die Grundwasserneubildungsrate im Albvorland ist im allgemeinen relativ gering; sie wird nur dort erhöht, wo Sandsteinschichten unbedeckt zu Tage treten. In solchen Bereichen besteht aber gleichzeitig die Gefahr potentieller Schadstoffeinträge. Die Sandsteinhorizonte treten im allgemeinen, insbesondere aber am Albwestrand nur in einem schmalen Band zu Tage. Gleichzeitig befinden sich hier bereits zahlreiche genutzte Quellen und einige Brunnen. Eine Entnahmesteigerung (im Sinne einer regionalen Grundwasserentnahme) ist daher nicht zu erwarten.

7.2.2 Malmkarst einschließlich der Vilsecker Kreidemulde

7.2.2.1 Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate

Die mittleren jährlichen Niederschläge der Jahresreihe 1931/60 betragen in diesem Teilgebiet zwischen 750 und 1050 mm. Dabei werden im Südtail höhere Niederschläge als im N festgestellt. Weitflächig stellen Kalk- und Dolomitgesteine des Malm den Grundwasserleiter dar; lediglich in der Vilsecker Mulde fungieren Kreidesedimente teils zusammen mit dem Malm, teils mit dem Dogger als Grundwasserleiter. Im übrigen Teilgebiet gehören die reliktiertig erhaltenen Kreidesedimente zu den Deckschichten.

Die Grundwasserneubildung wird in dieser hydrogeologischen Einheit von unterschiedlichen Faktoren gesteuert, so z. B.:

- von der Lithologie der Malmgesteine (Dolmit oder Kalkstein), ihrer faziellen Ausbildung (Riff-, Bank-, Massenfazies etc.), ihrem Kluffvolumen und Verkarstungsgrad
- von der Mächtigkeit des Karstwasserkörpers sowie seiner Zugehörigkeit zum Seichten oder Tiefen Karst (Ausgleichs- und Rückhaltevermögen)
- von der Ausbildung und Mächtigkeit von Deckschichten
- von der jährlichen Niederschlagsmenge und seiner Verteilung im Jahresverlauf
- von der Bodennutzung (von der Bodenverdichtung oder -versiegelung).

Abflußmeßstellen können, selbst wenn sie langfristig beobachtet wurden, im Malmkarst nur tendenzielle Hinweise über die tatsächlichen Grundwasserneubildungsraten liefern.

Eine Schwierigkeit besteht darin, daß sich die Grundwasserneubildungsraten auf zugehörige Flächen, in der Regel oberirdische Einzugsgebiete, beziehen. Die Grundwasserneubildung findet in vergleichbaren Teilgebieten relativ gleichmäßig über Flächen verteilt statt; das Anströmen zur Vorflut vollzieht sich allerdings über durch die Verkarstung und die Tektonik vorgeprägte Richtungen, mit Abschnitten verstärkter Exfiltration und solcher geringer Exfiltration. Bereits die ungleichmäßige Verteilung der auf die Flußkilometer bezogenen Grundwasserspends (Exfiltrationsraten) weist auf diese Problematik hin (vgl. Kap. 4.2.1.1, Abb. 13). Da der Grundwasserleiter nicht gleichmäßig verkarstet bzw. geklüftet ist, wechseln sich besser und schlechter durchlässige Bereiche miteinander ab. Vergleicht man daher Abflußspenden von Pegelmeßstellen innerhalb des Karstes, so liegen "Bilanzierungsräume" mit sehr hohen Spenden (z. B. auf dem Wiesentabschnitt Schottersmühlmuggendorf) neben solchen mit sehr niedrigen, obwohl weitflächig die gleiche Malmschichtenfolge ausstreicht, die Überdeckung vergleichbare Charakteristika aufweist und ähnliche Niederschlagsverhältnisse vorliegen. Derartige Erkenntnisse erhielten bereits das LfU, bei Vergleichen von Trockenwetterabflüssen der Jahre 1964 und 1965 (LfU 1974) oder KANZ, SCHNITZER & TÜRK (1978) bei Detailuntersuchungen im Umfeld der Stempfermühlquelle.

Daneben werden in einigen Teilgebieten auf längeren Flußstrecken (z. B. im mittleren Wiesent- und im oberen Pegnitztal) Versickerungen festgestellt oder Umströmungen (z. B. im Umfeld des Pegels Wiesent/Hollfeld) vermutet. Meßstellen unterhalb von Versickerungsstrecken bzw. an Umströmungen können nur Hinweise auf die Größenordnung der Versickerung bzw. Umströmung, nicht aber auf Grundwasserneubildungsraten liefern. Unterhalb der Versickerungen exfiltrieren überdurchschnittlich hohe Wassermengen in die Vorflut. So gibt z. B. das LfU (1974) für Trockenwetterabflußmessungen in den Jahren 1964 und 1965 auf dem Pegnitzabschnitt Neuhaus-Günterstal eine Abflußspende von ca. $50 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ an. Solche Werte repräsentieren nicht die eigentliche Grundwasserneubildungsrate des entsprechenden Teilraumes, sie verdeutlichen vielmehr, daß hier eine Zusammenfassung von Teilgebieten zu größeren Einheiten unumgänglich wird.

Einen weiteren Faktor stellt die Einzugsgebietsgröße dar. Wie umfangreiche Karstwassermarkierungsversuche gezeigt haben, differiert gerade im Karst das oberirdische Einzugsgebiet deutlich vom unterirdischen. Extremwerte von über $30 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$, wie sie z. B. KANZ, SCHNITZER & TÜRK (1978) für das nähere Umfeld der Stempfermühlquelle angeben, beziehen sich auf das zugehörige oberirdische Einzugsgebiet. Markierungsversuche des GLA belegen allerdings, daß das unterirdische Einzugsgebiet dieser Quelle um ein Vielfaches größer ist als das oberirdische.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, auf Grundlage der Abflußmessungen an amtlichen Meßstellen und unterstützender Messungen (vgl. Kap. 4.2.1.1) sowie der Kenntnis der allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse eine Übersicht der Grundwasserneubildungsraten zu erstellen (Abb. 25).

Als Abgrenzung von Einzugsgebieten fanden bei der Bilanzierung die Hauptgrundwasserscheiden (ermittelt aus der Grundwasserhöhengleichenkarte, Abb. 8) Berücksichtigung. Wichtige hydrogeologische Einheiten, benachbarte Gebiete, die aufgrund der tektonischen Situation, der verbreiteten Gesteine und des Niederschlags vergleichbare Grundwasserneubildungsraten erwarten ließen, wurden für die Bilanzierung zusammengefaßt. Auf diese Weise konnten Kenntnisse über Versickerungsstrecken von Oberflächengewässern oder Hinweise auf Umläufigkeiten bei Pegelmeßstellen berücksichtigt werden (Ausweitung von Teilflächen).

Die Grundwassermächtigkeit bzw. die Zugehörigkeit eines Teilgebietes zum Seichten bzw. Tiefen Karst beeinflußt das Ausgleichsvermögen des Abflußverhaltens. So zeichnen sich die Quellen und Exfiltrationsstrecken im Tiefen Karst gerade in langen trockenen Sommern dadurch aus, daß sie ihr Schüttungs- bzw. Exfiltrationsverhalten kaum verändern, während die Quellen im Seichten Karst rasche Schüttungsänderungen erkennen lassen. Daher wurden die Zugehörigkeit eines Teilgebietes zum Seichten bzw. Tiefen Karst sowie die Klassifizierung der Grundwassermächtigkeiten ebenfalls mit eingearbeitet.

Nicht von allen Teilgebieten lagen amtliche Abflußmeßdaten vor; insbesondere die Randbereiche des Seichten Karstes wurden durch eigene Untersuchungen verdichtet. Folglich mußten unterschiedlich qualifizierte Daten miteinander verknüpft werden. Daher erschien es sinnvoll, für die Abbildung 25 keine exakten Werte oder Wertepaare (wie z. B. in GLA 1993), sondern Größenordnungen anzugeben. So wurden zwischen 0 und $10 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ Intervalle von jeweils $2 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ sowie über $10 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ die Klasse $10\text{-}15 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ gewählt.

Werte von über $15 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ ergaben sich nur im Pegnitzabschnitt zwischen Neuhaus und Rupprechtstegen. Es handelt sich dabei allerdings nicht um die tatsächliche Grundwasserneubildung dieses Teilraumes, sondern vielmehr um das Zutagetreten von Wasser, das entweder weiter nördlich im Pegnitzlauf versickert, oder das ebenfalls weiter im N neugebildet wird, aber erst in diesem Flußabschnitt der Vorflut zuströmt. Die eigentliche Grundwasserneubildungsrate der Veldensteiner Mulde im N sowie des Raumes zwischen Neuhaus und Rupprechtstegen liegt im Intervall zwischen 10 und $15 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$. Um diese spezielle Problematik auch in der Kartendarstellung (25a, 25b) zu verdeutlichen, wurde das Einzugsgebiet der Pegnitz mit einer von rechts oben nach links unten verlaufenden Schraffur versehen ("Verzahnung infolge Pegnitzversickerung"). Verzahnungen an Bilanzierungsgrenzen wurden durch ein von links oben nach rechts unten verlaufendes Raster markiert.

Die Übersicht der Grundwasserneubildungsraten (Abb. 25a, 25b) weist aufgrund der oben beschriebenen Vorgehensweise in der Regel nicht die scharfen Intervallsprünge bei der Abgrenzung einzelner Pegeleinzugsgebiete auf, wie eine auf herkömmliche Weise erarbeitete Grenzlinien-Darstellung:

Es lassen sich deutlich Gebiete mit relativ hohen Grundwasserneubildungsraten ($>8 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$); Tiefer Karst, (insbesondere Muldenzonen) von solchen mit geringen ($<4 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$); Seichter Karst, (insbesondere Gebiete mit geringer Grundwassermächtigkeit und Ailsbach Sattel) unterscheiden. Dazwischen liegen bereichsweise Teilflächen mittlerer Grundwasserneubildungsraten (zwischen 4 und $8 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$), so z. B. am Ostrand der Ziegenfelder Bucht, im Umfeld des oberen Leinleitertales, im Ausstrich der Kreidesedimente der östlichen Vilsecker Mulde sowie NW Sulzbach-Rosenberg.

Für den Ailsbach ergibt sich zwischen den Abflußmeßstellen Schweinsmühle und Hungenberg keine merkliche Grundwasserzunahme. Dieses Gebiet unterscheidet sich allerdings lithologisch und vom Niederschlagsverhalten nicht von seinem Umfeld. Es wird daher angenommen, daß das hier neugebildete Wasser (aufgrund der Sattelstruktur) nicht dem Ailsbach sondern Püttlach und/oder Wiesent zuströmt. Deshalb wurde für diesen Bereich nicht die Klasse $<2 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$, sondern das Intervall 2-4 $\text{l/(s}\cdot\text{km}^2)$ gewählt.

7.2.2.2 Aktuelle Grundwasserförderung aus dem Malmkarst und Möglichkeiten weiterer Grundwassererschließungen

Die Übersicht der Grundwasserneubildungsraten diene ihrerseits als Grundlage für die Bilanzierung der aus dem Malmkarst bereits geförderten und möglicherweise noch förderbaren Wassermengen. In diese Darstellung wurde neben der Bedeutung des jeweiligen Vorkommens auch sein aktueller Status (bereits genutzt, erkundet oder neu vorgeschlagen) sowie die Klasse der potentiellen Gefährdung mit eingearbeitet (Abb. 27 a, Abb. 27 b, Tab. 14).

Die derart erhaltenen Säulen spiegeln nicht exakt die Lage der Fassungen bzw. möglicher Bohrpunkte wider, sie sollen nur informieren in welchem Raum Grundwasser gewonnen wird bzw. potentielle Reserven zu erwarten sind.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefaßt:

Am Albrand, im Seichten Karst, liegt eine Vielzahl örtlicher Versorgungen, mit zumeist jährlichen Entnahmemengen zwischen $\leq 10\,000$ und $100\,000 \text{ m}^3$. Nur wenige Anlagen fördern zwischen $100\,000$ und $1\,000\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ und können daher lokal als sehr bedeutend bis regional bedeutend eingestuft werden. Hierzu zählen beispielsweise die Versorgungen Lichtenfels, Heilstätte Schwabthal, Gräfenberg sowie einige Versorgungen im Raum Hersbruck. Aufgrund meist lückenhafter Überdeckung, geringer Grundwassermächtigkeiten und weitflächiger landwirtschaftlicher Nutzung sind diese Versorgungen meist potentiell stark gefährdet, wenngleich nur bei wenigen Anlagen über längere Zeit Grenzwertüberschreitungen auftreten (vgl. Kap. 5.3, 6.1).

Weitere, ebenfalls meist lokale Versorgungen mit jährlichen Entnahmemengen zwischen $10\,000$ und $100\,000 \text{ m}^3$ befinden sich in bzw. nahe den Tälern der größeren Bäche und Flüsse, meist im Tiefen Karst. Diese Erschließungen sind in der Regel "mittelmäßig" bis "gering" gefährdet. Die aktuelle Beeinflussung ist zumeist gering, allerdings kann es gelegentlich auch dort im Nahbereich von Quelfassungen und Brunnen zu schädlichen Einflüssen kommen.

In der Hollfelder Mulde befinden sich derzeit nur zwei Versorgungen von regionaler Bedeutung. Es handelt sich dabei um die Brunnen der Sanspareil-Gruppe und der Jura-Gruppe. Die Sanspareil-Gruppe entnimmt jährlich zwischen $0,1$ und $0,5 \text{ Mio. m}^3$, die Jura-Gruppe um $0,5 \text{ Mio. m}^3$ Karstwasser. Nördlich und westlich des Brunnens der Jura-Gruppe hat das LfW ein Grundwasservorkommen von regionaler bis überregionaler Bedeutung erkundet. Hier wären (einschließlich des Brunnens der Jura-Gruppe) ca. $6 \text{ Mio. m}^3/\text{Jahr}$ förderbar (LfW 1990). Die bereits erkundeten Vorkommen sind im Zentrum der Hollfelder Mulde vorwiegend "gering", an ihrer W-Flanke "mittelmäßig" bis "gering" gefährdet.

In Ergänzung zu den bereits erkundeten Vorkommen schlägt das GLA im N der Hollfelder Mulde (Ziegenfelder Bucht) drei zusätzliche Erschließungsgebiete von regionaler bis überregionaler Bedeutung, mit rechnerisch möglichen Entnahmemengen zwischen 6 und 7 Mio. m³/a in den Räumen Steinfeld-Großziegenfeld, nördlich Freienfels und zwischen Großziegenfeld und Schirradorf vor. Für diese Gebiete wird eine Grundwasserneubildungsrate zwischen 10 und 15 l/(s*km²) angenommen, die aus den hohen Abflüssen (MNQ) im oberen Weismain- und Wiesental sowie entlang der Kainach abgeleitet wurde. Wegen der speziellen tektonischen Situation steigt hier die Grundwassermächtigkeit z. T. auf >100 m an. Bislang erfolgen größere Grundwasserentnahmen nur durch die Sanspareilgruppe im E. Die Erschließungen sollten möglichst in größeren zusammenhängenden Waldgebieten, nicht unmittelbar in den Flußtäälern liegen, um qualitativ gutes Karstwasser gewinnen zu können. Die Ziegenfelder Bucht ist in dem Zusammenhang auch günstig für die Wassererschließung.

Daneben wären mengenmäßig ergiebige Erschließungen (jeweils um 1 Mio. m³/Jahr, Brunnen mit max. Förderleistung von 75 - 100 l/s) auch an der W-Flanke der Muldenstruktur, zwischen dem nördlichen Kainach- und dem Weismaintal sowie im S der Hollfelder Mulde denkbar. Dort muß allerdings mit einer potentiell größeren Beeinträchtigung der Wasserqualität gerechnet werden.

Im Gegensatz zur Hollfelder Mulde werden die Grundwasservorkommen in der Veldensteiner Mulde bereits durch zahlreiche Versorgungsunternehmen genutzt. Die größten Wassermengen entnimmt die EWAG bei Ranna (mehrere Mio. m³/Jahr, bzw. bis zu ≥520 l/s), die das Wasser zur Versorgung der Stadt Nürnberg aus dem Untersuchungsraum ausleitet (überregional sehr bedeutsames Vorkommen). Bilanzierungen haben gezeigt, daß im Einzugsgebiet der Erschließungen der EWAG eine bedeutsame Steigerung der Fördermenge nicht möglich ist.

In der westlichen Veldensteiner Mulde fördern außerdem noch die Jura-, die Betzenstein- und die Riegelstein-Gruppe Trinkwasser. Deren Fassungen können als regional bedeutsam klassifiziert werden; die jährlichen Entnahmemengen betragen je Versorgungsträger zwischen ~0,5 und 1 Mio. m³. Der Grad der potentiellen Gefährdung dieser Vorkommen nimmt vom Muldentiefsten zu ihren Rändern zu, wenngleich (wahrscheinlich aufgrund der hohen Verdünnung) entsprechende Beeinflussungen noch nicht festgestellt wurden. Örtlich bedeutend sind neben diesen Gruppenversorgungen die am SE-Rand der Veldensteiner Mulde gelegenen Quelfassungen zwischen Neuhaus und Engenthal (Gmde. Hartenstein).

Nördlich Obersees hat das LfW ein mit einer Entnahmemenge von 5 Mio. m³/Jahr regional bis überregional bedeutendes Grundwasservorkommen erkundet (LfW 1990), das bisher nur durch einen Brunnen der Jura-Gruppe genutzt wird. Daher ist hier noch eine Steigerung um etwa das Siebenfache der augenblicklichen Entnahmemenge möglich. Der Ermittlung der Einzugsgebietsgröße und somit auch der maximalen Förderleistung wurde die kleinste bisher in diesem Gebiet beobachtete Grundwasserneubildungsrate (knapp 9 l/(s*km²)) zu Grunde gelegt. Aufgrund dieser Berechnungen ließ sich eine "kleinste mögliche Dauerentnahme" von >10 Mio. m³/Jahr, eine "mittlere mögliche Dauerentnahme" von ca. 15 Mio. m³/Jahr feststellen (LfW 1979). Die Reduzierung der letztendlich vorgeschlagenen Entnahmemenge auf ca. 5 Mio. m³/Jahr wurde aus Gründen der Schützbarkeit gewählt. Da die eigentliche (mittlere) Grundwasserneubildung dieses Gebietes etwas höher ist als (minimal) vom LfW angenommen, sieht das GLA insbesondere im nördlichen und südlichen Umfeld dieser Erkundungsmaßnahme noch Erweiterungsmöglichkeiten (insgesamt 2-3 Mio. m³/Jahr). Allerdings muß an den Rändern der Muldenstruktur mit qualitativen Einschränkungen gerechnet werden.

Einen weiteren, bislang nicht untersuchten Schwerpunkt schlägt das GLA im S der Veldensteiner Mulde beidseitig des Pegnitztales, im Flußabschnitt Neuhaus-Rupprechtstegen, vor; zumal sich für diesen Abschnitt rechnerisch die höchsten Grundwasserneubildungsraten ergeben (vgl. Kap. 7.2.2.1). Entlang der Pegnitz tritt hier eine Vielzahl stark schüttender Quellen aus, deren Wasser überwiegend ungenutzt in den Vorfluter strömt. Wenngleich hier z. T. mittelmäßige potentielle Gefährdungsgrade vorliegen, lassen die Quellaustritte häufig nur geringe Beeinflussungen erkennen. Gerade ihre Lage im Nahbereich von Ortschaften und Straßen weist dabei zusätzlich auf erst nahe des jeweiligen Quellaustrittes aufgesattelte Verunreinigungen hin. Daher sollten spätere Erkundungen in einiger Entfernung zum Hauptvorfluter niedergebracht werden. Beiderseits der Pegnitz könnten hier insgesamt rund 4 Mio. m³/Jahr erschlossen werden.

Die Grundwasserneubildung vollzieht sich in der Vilsecker Mulde vor allem in den Gebieten, in denen der Malm zutage tritt, also im W. Demgegenüber sinken die Neubildungsraten im Kreideausstrich auf 4-6 l/(s*km²) ab. Die Grundwasservorkommen des westlichen Muldenflügels werden nur z. T. durch die Wasserversorgungen Königstein, Hannesreuth und Sigras-Sigl-Gruppe sowie durch Entnahmen für den Truppenübungsplatz Grafenwöhr genutzt; die Entnahmemengen betragen jeweils zwischen 0,1 und <1 Mio. m³/Jahr. Diese Versorgungen zählen somit zu den örtlich sehr bedeutenden.

Daneben befindet sich im Zentrum der Muldenstruktur ein vom LfW erkundetes Vorkommen von regionaler bis überregionaler Bedeutung. Hier sind — zusätzlich zu den aktuellen Entnahmen im Westflügel der Muldenstruktur — rund 7 Mio. m³/Jahr förderbar (LfW 1990). Bislang wird nur ein Teil dieser Menge zur Versorgung der Stadt Vilseck herangezogen. Insbesondere die Erschließungen im Zentrum der Vilsecker Mulde zeichnen sich durch geringe potentielle Gefährdung aus, während in den südlichen Randbereichen z. T. mit mittleren bis starken Gefährdungen gerechnet werden muß.

Zwischen der Veldensteiner Mulde und der Sulzbacher Delle liegt ein Gebiet mit mittleren bis hohen Grundwasserneubildungsraten. In diesem Teilgebiet fördern bereits zahlreiche örtlich bedeutende bis regional bedeutsame Versorgungsträger Trinkwasser (Entnahmen zwischen 10 000 und 1 Mio. m³/Jahr). Hierzu zählen: Die Schmidstadt-Gruppe, die Wasserversorgung Neukirchen, die Bachetsfeld-Gruppe, die Schwend-Popperg-Gruppe und die Wasserversorgung Alfeld. Aufgrund der nur mäßigen Grundwassermächtigkeiten und engräumig wechselnder Überdeckung unterliegen die potentiellen Gefährdungsklassen hier starken Schwankungen (meist um den mittleren Bereich). Zwischen den vorhandenen Erschließungen könnten weitere Brunnen, insbesondere NE der Bachetsfelder-Gruppe und SW Alfeld Grundwasservorkommen von insgesamt ca. 2 Mio. m³/Jahr erschließen. Allerdings wären derartige Erschließungen in ähnlicher Weise potentiell gefährdet, wie die bereits bestehenden.

In der Sulzbacher Delle sind wichtige Grundwasservorkommen anzutreffen. Neben der regional bedeutenden Trinkwasserversorgung der Stadt Sulzbach-Rosenberg erschließen hier die Illschwang-Gruppe, die Ammerthaler-Gruppe, die Hohenkernather-Gruppe und die Stadt Amberg in zahlreichen Brunnen Trinkwasser (Entnahmemengen meist zwischen 10 000 und 100 000 m³/Jahr). Da nur ein Teil der Muldenstruktur von Kreideschichten abgeschirmt ist und der übrige Bereich weniger wirksame Deckschichten aufweist, muß auch die Grundwassergefährdung entsprechend differenziert betrachtet werden (i. d. R. "mittelmäßig" bis "gering" gefährdet). — Die Versorgungsträger im S der Muldenstruktur schöpfen nur einen gewissen Teil des nutzbaren Wassers ab; daher sind nach Auffassung des GLA im S und W der Muldenstruktur noch gewisse Grundwasservorkommen (ca. 2-3 Mio. m³/Jahr) erschließbar. Allerdings muß hier z. T. mit einer "starken" bis "mittelmäßigen" potentiellen Gefährdung in ca. 50 % der jeweiligen Einzugsgebiete gerechnet werden.

Anmerkungen zu Tabelle 14 (S. 81-83):

Bezeichnung:

WV: Wasserversorgung
 GW-Erkundung: Grundwassererkundung

Nutzungs-Art:

- 1: vorhandene Erschließung, genutzt für die öffentliche Wasserversorgung
- 2: vorhandene Erschließung, genutzt für den Truppenübungsplatz Grafenwöhr
- 3: erkundete Vorkommen
- 4: vom GLA vorgeschlagenes (potentielles) Vorkommen
- 5: erkundetes Vorkommen / teilweise genutzt

Bedeutung:

- A: (über-)regional sehr bedeutend
- B: regional bedeutend bis überregional bedeutend
- C: örtlich sehr bedeutend bis regional bedeutend

Tabelle 14: Größere Grundwasservorkommen und (potentielle) Erkundungsgebiete im Malmkarst des Untersuchungsraums

Nr.	Bezeichnung	Nutzungs-Art	Bedeutung	Anmerkung
1	WV Heilstätte Schwabthal	1	C	Seichter Karst
2	WV Lichtenfels	1	C	Seichter Karst
3	potentielles Erkundungsgebiet Nordwestflanke der Hollfelder Mulde	4	B	—
4	potentielles Erkundungsgebiet Ziegenfelder Bucht; zwischen Kainach- und Weismaintal	4	B	—
5	potentielles Erkundungsgebiet Ziegenfelder Bucht; zwischen Schirradorf und Großziegenfeld	4	B	—
6	potentielles Erkundungsgebiet Hollfelder Mulde; nördlich Freienfels	4	B	—
7	potentielles Erkundungsgebiet Ziegenfelder Bucht; östlich des Kainachtals	4	C	—
8	WV Sanspareil-Gruppe	1	C	—
9	potentielles Erkundungsgebiet Hollfelder Mulde, Westflanke; südlich Königsfeld	4	B	—
10	GW-Erkundung 5.04 Oberes Wiesenttal	3	B	—
11	potentielles Erkundungsgebiet südliche Hollfelder Mulde	4	C	—
12	WV Jura-Gruppe, Brunnen Scherleiten	1	C	—
13	potentielles Erkundungsgebiet südliche Hollfelder Mulde	4	B	—
14	WV Köttweinsdorf	1	C	—
15	WV Wiesent-Gruppe	1	C	—
16	potentielles Erkundungsgebiet Veldensteiner Mulde, Nordwestrand	4	C	—
17	potentielles Erkundungsgebiet Veldensteiner Mulde, Nordrand	4	C	—
18	WV Tüchersfeld	1	C	—
19, 20	potentielles Erkundungsgebiet nördliche Veldensteiner Mulde; nördlich der GW-Erkundung 5.03 Weidensees	4	C, C	—
21	potentielles Erkundungsgebiet Veldensteiner Mulde, Nordostrand; zwischen Püttlach- und Pegnitztal	4	C	—
22, 23	GW-Erkundung 5.03 Weidensees	3	C, B	—
24	WV Jura-Gruppe, Brunnen Bronn	1	C	—

Nr.	Bezeichnung	Nutzungs-Art	Bedeutung	Anmerkung
25, 26	potentielles Erkundungsgebiet Veldensteiner Mulde; südlich der GW-Erkundung 5.03 Weidensees	4	B, C	—
27	WV Betzenstein-Gruppe	1	C	—
28	WV Gräfenberg	1	C	Seichter Karst
29	potentielles Erkundungsgebiet Veldensteiner Mulde, Südwestrand	4	C	—
30	WV Riegelstein-Gruppe	1	C	—
31-33	potentieller Erkundungsschwerpunkt beidseitig des Pegnitztals zwischen Neuhaus und Rupprechtstegen	4	B, B, B	—
34, 35	WV EWAG Fassungen Haselhof, Seizer und Kohlmesser sowie Ranna-Mosenberg	1	A, C	—
36	WV Neuhaus	1	C	—
37	WV Engenthal/Hartenstein	1	C	—
38	WV Schnaittach	1	C	—
39, 40	WV Altensittenbach, Kersbach, Oberkrumbach, Weißenbach	1	C, C	Seichter Karst
41	WV Vorra	1	C	Seichter Karst
42	WV Königsstein	1	C	—
43	WV Hannesreuth und Entnahme Truppenübungsplatz Grafenwöhr	2, (1)	C	—
44, 45	WV Sigras-Sigl-Gruppe	1	C, C	—
46-48	Entnahme Truppenübungsplatz Grafenwöhr	2	C, C, C	—
49	WV Vilseck und GW-Erkundung 6.01/6.02 Vilsecker Mulde	5	B	—
50	GW-Erkundung 6.01/6.02 Vilsecker Mulde	3	B	—
51	potentielles Erkundungsgebiet zwischen Veldensteiner Mulde und Sulzbacher Delle	4	B	—
52	WV Grünreuth	1	C	—
53	WV Schmidtstadt-Gruppe	1	C	—
54	potentielles Erkundungsgebiet Sulzbacher Delle, Nordwestfanke	4	B	—
55	WV Bachetsfeld-Gruppe	1	B	—
56	WV Schwend-Popperg-Gruppe	1	B	—
57-59	WV Sulzbach-Rosenberg	1	B, B, B	—
60	WV Ilswang-Gruppe	1	C	—
61	potentielles Erkundungsgebiet im Zentrum der Sulzfelder Delle	4	C	—

Nr.	Bezeichnung	Nutzungs-Art	Bedeutung	Anmerkung
62	potentielles Erkundungsgebiet am Westrand der Sulzfelder Delle	4	B	—
63	WV Hammachtal-Gruppe	1	C	Seichter Karst
64	WV Alfeld	1	C	—
65-67	potentielles Erkundungsgebiet am Südwestrand der Sulzfelder Delle	4	B, B, C	—
68	WV Hohenkemnather Gruppe	1	C	—

7.2.2.3 Zusammenfassende Bilanzierung

Der Malmkarst, einschließlich der Vilsecker (Kreide-)Mulde stellt ein Grundwasserüberschußgebiet dar, das noch zahlreiche nutzbare Reserven aufweist. Insbesondere in den großen Muldenzonen sind neben den bereits vom LfW erkundeten Vorkommen weitere Entnahmen möglich. In Tabelle 15 wurden die oben geschilderten Erkenntnisse zusammengefaßt.

Tabelle 15: Zusammenstellung der erkundeten Grundwassermengen und der potentiellen Entnahmemengen der vom GLA vorgeschlagenen Erschließungen (Entnahmemengen in Mio. m³/Jahr)

Status	vom LfW erkundet	davon genutzt	zur Zeit nicht genutzt	zusätzliche vom GLA vorgeschlagene Vorkommen
Teilgebiet				
Hollfelder Mulde	6	<1	>5	Ziegenfelder Bucht: 6-7 Ergänzungen: 2-3
Veldensteiner Mulde	5	<1	>4	im S beiderseits der Pegnitz: ~ 4 Ergänzungen: 2-3
Vilsecker Mulde	7	1,5	5,5	—
Übergang Veldensteiner Mulde / Sulzbacher Delle	—	—	—	Ergänzungen: ~ 2
Sulzbacher Delle	—	—	—	Ergänzungen (westl. u. südl. Muldenflügel): 2-3
Σ	18	~3	~ 15	~20

Wie aus Tabelle 15 ersichtlich, werden im Untersuchungsraum bislang erkundete Grundwasserreserven von etwa 15 Mio. m³/Jahr nicht genutzt. Weitere etwa 20 Mio. m³/Jahr könnten bei optimaler Ausnutzung der Gebiete mit relativ hohen Grundwasserneubildungsraten zusätzlich gefördert werden. Hieraus ergibt sich eine Entnahmemenge von ca. 35 Mio. m³/Jahr bzw. maximale Förderleistungen in Abhängigkeit von der Anzahl ergiebiger Brunnen zwischen 1,7 und 2,5 m³/s.

Eine jährliche zusätzliche Entnahme von ca. 35 Mio. m³ würde allerdings nur einer gleichmäßigen Entnahme von etwa 1,1 m³/s entsprechen. Setzt man diesen Wert in Korrelation mit den Niedrigwasserabflüssen (NQ) und den mittleren Abflüssen (MQ) der wichtigsten Oberflächengewässer (Vils/Vilseck, Rosenbach/Obersdorf, Pegnitz/Hohenstadt, Högenbach/Pommelsbrunn, Wiesent/Muggendorf [abzügl. des Doggeranteils], Trubach/Bärental und Weismain/Weismain), so erhält man für NQ ca. 6,4

m³/s, für MQ ca. 16 m³/s [Daten zusammengestellt aus LfW 1987]. In diesen Zahlen sind die Abflüsse aus dem Seichten Karst nicht enthalten. Die Gegenüberstellung zeigt, daß eine zusätzliche Entnahmemenge von 35 Mio. m³/Jahr sehr vorsichtig kalkuliert wurde und, daß ein entsprechender Mindestabfluß (mehr als das Fünffache der vorgeschlagenen Entnahmemenge) auch bei einem langanhaltenden Trockenwetter gewährleistet bleiben würde.

Abschließend ist anzumerken, daß selbst im Tiefen Karst die Trinkwasserqualität bei derart hohen Fördermengen nur zu erreichen bzw. zu erhalten ist, wenn in den Einzugsgebieten entsprechende Vorsorgemaßnahmen getroffen werden. Hierzu zählen sachgemäße Klärung und/oder Ableitung von Abwasser, intakte Kanalsysteme, Schutzmaßnahmen im Nahbereich stark frequentierter Fernstraßen und längerfristig möglicherweise auch die Extensivierung der Landwirtschaft.

7.2.3 Quartäre Grundwasservorkommen in Talbereichen und am Albrand

Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, wird nur an wenigen Stellen im Untersuchungsraum aus quartären Ablagerungen Grundwasser gefördert bzw. es wurden entsprechende Erschließungen erkundet. Dies ist insbesondere dort der Fall, wo das Quartär größere Mächtigkeiten (>5 m) und/oder weitflächige Ausdehnung erreicht. Die quartären Sedimente kleiden allerdings ein Paläorelief aus, so daß ihre Mächtigkeiten und laterale Ausdehnung in der Regel starken Schwankungen unterliegen.

Für die Beurteilung einer Grundwasser-Entnahmemöglichkeit aus quartären Lockersedimenten sind im wesentlichen die räumliche Ausdehnung des Grundwasserleiters, die Speicherkapazität sowie das Grundwassergefälle entscheidend.

Größere zusammenhängende Quartär-Ausstriche sind im Untersuchungsraum im Wiesenttal, zwischen Ebermannstadt und Kirchehrenbach, im Pegnitztal, zwischen Pommelsbrunn und Lauf sowie am Albwestrand, N Altdorf, anzutreffen. Die betrachteten Talabschnitte sind 8 bzw. 14 km lang und jeweils ca. 1 km breit. Das Vorkommen N Altdorf erstreckt sich etwa auf einer Fläche von ca. 13 km². Zumeist stehen unter wechselnd mächtigen lehmig-sandigen Deckschichten im Regelfall ≥ 10 m mächtige Kiese und Sande an. N Altdorf erreichen fluviatile Sande und Kiese (in pleistozänen Rinnen) Mächtigkeiten von mehreren Zehner Meter; diese Kiese werden von Flugsanden überdeckt. Die hier berücksichtigten quartären Grundwasserleiter weisen im Regelfall relativ gute spezifische Ergiebigkeiten und hohe Durchlässigkeitsbeiwerte auf (vgl. Kap. 3.2.2).

Den präquartären Rahmen bilden überwiegend Tonsteine des Dogger (Opalinuston) oder des Lias (Amaltheenton), teilweise aber auch Rhätolias-Sandsteine. Hydrologisch vermitteln die Sande und Kiese des Quartärs zwischen den Vorflutern und grundwasserleitenden Schichten (Sandsteine) des Festgesteinsuntergrundes.

Das Grundwassergefälle kann in den Lockersedimenten in weiten Grenzen schwanken. In flußnahen Bereichen ist es bei ca. 0,15-0,5 % anzusetzen; es steigt gegen den Talhang häufig an und erreicht örtlich bis über 3 %. Dies findet seine Ursache in den wenig permeablen Hanglehmen und Schwemmfächern, die sich von der Talflanke her mit den Kiesen und Sanden verzahnen und vermischen und so den Grundwasserstrom bremsen.

Die mittleren Jahresniederschläge schwanken in den berücksichtigten Abschnitten des Wiesent- und Pegnitztales sowie am Albwestrand N Altdorf zwischen 750 und 800 mm. In Anlehnung an die für das Maintalquartär ermittelten Grundwasserneubildungsraten (GLA 1993) können für den Albrand N Altdorf, das Wiesenttal sowie das Pegnitztal W Ottensoos Neubildungsraten zwischen 8 und 10 l/(s*km²), für das Pegnitztal zwischen Ottensoos und Pommelsbrunn Neubildungsraten zwischen 10 und 12 l/(s*km²) angenommen werden.

Auf weiten Abschnitten strömt über die Talflanken bzw. den Albrand Grundwasser dem Quartär zu. Dies setzt eine gewisse Grundwasserwegsamkeit des Festgesteinsrahmens bzw. der ihm auflagernden Verwitterungsbildungen und Lockersedimente voraus. Da das Kluftnetz im Bereich der Talflanken bzw. des Albrandes durch die lithostatische Druckentlastung geweitet ist, findet das Wasser im

dortigen Festgesteinsuntergrund bevorzugte Wege in die Talsohle. Des Weiteren kann von dichten Hängen zutretendes Oberflächenwasser bei der Passage durchlässiger Areale der quartären Auflage in diese infiltrieren. Eine quantitative Abschätzung der von den Flanken in das Quartär einspeisenden Grund- und Oberflächenwässer ist kaum möglich, da sich dieser Zufluß weitflächig verteilt.

Darüberhinaus wird aus flußnahen Brunnen bei entsprechender Grundwasserabsenkung meist auch ein gewisser Anteil an Uferfiltrat gefördert. Die Größenordnung läßt sich praktisch nur abschätzen, weil zur exakten Mengenermittlung zu viele Faktoren unbekannt sind. Generell nimmt der Anteil des Uferfiltrates mit Annäherung der Brunnen an den Fluß zu. Bei wenig Zufluß vom Hang und Festgesteinsuntergrund kann der Einfluß des Uferfiltrates so weit ansteigen, daß es den Brunnen nicht nur flußseitig zuströmt, sondern auch die Brunnen umfließt und diesen allseitig zuströmt (KANZ 1977).

Die Förderung von Uferfiltrat ist normalerweise (bezogen auf die derzeitige qualitative und quantitative Verschmutzung der Flüsse) unproblematisch, solange die Verweilzeiten im Untergrund ausreichen. Eine zweite wichtige Voraussetzung sind die Filtereigenschaften des anzutreffenden Porengrundwasserleiters. Allerdings verringert sich im Laufe der Zeit das Filtervermögen, vom Vorfluter ausgehend, in Richtung auf die fördernden Brunnen zu. Der Förderung von Uferfiltrat sind daher in den relativ engen Tälern natürliche, zeitliche Grenzen gesetzt.

Vergleicht man die aktuellen bzw. geplanten Fördermengen mit der durch den Niederschlag neugebildeten Grundwassermenge, so wird deutlich, daß einige Erschließungen bzw. Erkundungen in quartären Kiesen und Sanden gewisse Anteile an Uferfiltrat und z. T. auch von den Talflanken zutretendes Wasser fördern.

So weisen die im Pegnitztal gelegenen Brunnen der Wasserversorgung von Happurg relativ geringe Fördermengen von 5 bzw. 6 l/s auf (APEL 1977) auf. Diese Fördermengen entsprechen dort lediglich einem Einzugsgebiet von 1-2 km². Im Vergleich dazu verdeutlicht eine mögliche Dauerentnahme von ca. 150 l/s im Erkundungsgebiet "4.05 Unteres Wiesenttal" (LfW 1977), daß nur ein gewisser Anteil dieser Wassermenge aus der Grundwasserneubildung in der Talaue selbst stammen kann. Das nutzbare Wasser stammt dort weitgehend aus dem Uferfiltrat. Das LfW prognostiziert für dieses regional bedeutsame Vorkommen eine jährliche Entnahmemenge von 4,7 Mio. m³ (LfW 1990).

Nördlich Altdorf erschließt die EWAG (Fassung Ursprung) quartäre Grundwasservorkommen in pleistozänen Rinnen. Mit einer jährlichen Fördermenge von ca. 3,5 Mio. m³ ist das Vorkommen als örtlich sehr bedeutend anzusehen. Der Umgriff der weiteren Schutzzone, der weitgehend das oberirdische Einzugsgebiet umfaßt, macht deutlich, daß hier neben der flächigen Grundwasserneubildung auch Einflüsse von in die Lockersedimente infiltrierendem Oberflächenwasser bzw. von Hangwasser berücksichtigt werden.

Die starke Besiedelungsdichte, insbesondere im Pegnitztal, die Beanspruchung von Flächen durch Verkehr und Industrie sowie in einigen Bereichen durch Kiesgewinnung und Landwirtschaft, erschweren die Möglichkeiten von zusätzlichen Trinkwassererschließungen in den quartären Lockersedimenten des Untersuchungsraumes. Untersuchungen zur Erkundung von Trinkwassergewinnungsgebieten dürften dort kaum noch erfolgversprechend sein.

8 Mineral- und Thermalwässer

Der folgende Textteil wurde bewußt kurz gehalten, zumal die Mineral- und Thermalwässer diesen Themenkreis nur berühren. Die Tabellen sind vor allem mit Hilfe der Arbeiten von BIRZER (1960), QUENTIN (1970), GLA (1973), GUDDEN (1980) sowie GUDDEN & SCHMID (1985) erstellt und durch unveröffentlichte Archivdaten des LfW und GLA ergänzt worden.

Definitionsgemäß sind all diejenigen Wässer "Mineralwässer", die in 1 Kilogramm Wasser mindestens 1 g bzw. 1 000 mg gelöste Salze bzw. Mineralstoffe oder 250 Milligramm freies gelöstes Kohlendioxid (CO₂) enthalten. Als Sole wird ein natürliches salzreiches Wasser mit einer Mindestkonzentration von 14 g/kg Salzen (hauptsächlich Natriumchlorid) bezeichnet, was einem 1,4 %-igen Kochsalzgehalt (mehr als 5,5 g Na + 8,5 g Cl) entspricht.

Daneben kann einem Wasser, das weniger als 1 000 Milligramm gelöste Mineralstoffe oder weniger als 250 mg freies gelöstes CO₂ in einem Liter enthält, eine ernährungsphysiologische Wirkung zugesprochen werden, wenn es mindestens 150 mg/l Calcium, 50 mg/l Magnesium oder 1 mg/l Fluorid aufweist. Allerdings muß die Beschaffenheit eines natürlichen Mineralwassers am Quellaustritt oder Brunnenkopf so konstant bleiben, daß seine Eigenart sowie seine ursprüngliche Reinheit erhalten bleiben (BMJFG 1984).

Wässer mit Mineralstoffgehalten über 1 000 mg/l gelten als "mineralstoffreich", solche mit weniger als 1 000 mg/l als "mineralstoffarm". Wässer mit einer Austrittstemperatur von ≥ 20 °C werden als "Thermalwässer" bezeichnet. Thermalwässer sind in der Regel stark mineralisiert; es handelt sich häufig um Thermal-Mineralwässer bzw. um Thermalsolen. — Die Eignung eines Mineral- bzw. Thermalwassers als "Heilwasser" muß erst durch ein balneologisches Gutachten festgestellt werden.

Zur Zeit werden keine Wässer aus der Jura- und Kreide-Schichtenfolge des Untersuchungsgebietes zur Mineral- bzw. Thermalwassergewinnung herangezogen. Allerdings liegen im Arbeitsgebiet einige Lokalitäten, die in historischer Zeit als Heilwässer genutzt wurden (Tab. 15). Hierzu zählen:

- Relativ hoch mineralisierte (nahe 1 000 mg/l und darüber) Sulfat- und Hydrogenkarbonat-betonte Wässer mit z. T. hohen Eisen- und Schwefelwasserstoffgehalten aus dem Opalinuston. Der hohe Sulfatanteil sowie die Schwefelwasserstoff- und Eisengehalte dieser Wässer können mit der Zersetzung von Pyrit erklärt werden, der im Opalinuston stellenweise diffus verteilt ist.
- Gering mineralisierte Wässer des Opalinustons, deren Gesamtlösungsinhalte vorwiegend aus Calcium, Magnesium, Chlorid und Hydrogenkarbonat bestehen, die zudem noch durch leicht erhöhte Eisengehalte gekennzeichnet sind.

Alle aufgeführten Quellen fließen derzeit entweder ungenutzt in die Vorflut oder ihre ehemaligen Austritte sind überbaut bzw. verfüllt. Die Lage der Quellen kann lediglich als Anhaltspunkt für den hier erschließbaren Mineral- bzw. Tafelwassertyp dienen. In der Spalte "Charakteristika" der Tabelle 16 sind die wichtigsten Ionen, jeweils getrennt nach Anionen und Kationen, in Millival-Prozent angegeben, um eine Typisierung der Wässer zu erleichtern.

Tabelle 16: Ehemalige Heil- und Mineralwässer aus Gesteinen der Jura-Schichtenfolge des Untersuchungsraumes und seines unmittelbaren Umfeldes —
zusammengestellt aus: BIRZER (1960) und QUENTIN (1970)

TK 25	Lokalität	Name	Grundwasser- leiter	Charakteristika: Kationen / Anionen in mval %	freies CO ₂ mg/l	Gesamt- mineralisation Σ mg/l	Schüttung (l/s)	Besonderheiten
"Mineralstoffreiche" Wasser (>1 000 mg/l)								
6134 Waischenfeld	Glashütten	Faallbrun- nen	Opalinuston (Dogger Alpha)	Ca(61,5), Mg(34,5) / SO ₄ (64,5), HCO ₃ (33,5)	69,3	1 688,4	0,2	5,5 mg/l Fe ²⁺
6436 Sulzbach- Rosenberg Nord	Großalbers- hof	Sauer- Quelle	Opalinuston (Dogger Alpha)	Ca(50), Mg(48,5) / SO ₄ (61), HCO ₃ (38)	24,2	1 402,2	0,15	0,6 mg/l Fe ²⁺ , H ₂ S: Spuren
6734 Neumarkt	Neumarkt	Trinkquelle	Opalinuston (Dogger Alpha)	Ca(54,5), Mg(42) / SO ₄ (78), HCO ₃ (21,5)	182,4	2 603	(verfüllt)	7,4 mg/l Fe ²⁺ , 5 mg/l H ₂ S
"Mineralstoffarme" Wasser (<1 000 mg/l)								
5934 Thurnau	Menchau	Aubrunnen	Malm	Ca(86) / HCO ₃ (80)	23,0	441,9	>7	
6034 Mistelgau	Obernsees	Rupperts- quelle	Opalinuston (Dogger Alpha)	Ca(48), Mg(33) / Cl(46), HCO ₃ (31), SO ₄ (29)	74,8	187,6	<0,01	0,14 mg/l Fe ²⁺
6333 Gräfenberg	Gräfenberg	Paizen- brunnen	Malm	Ca(70,5), Mg(27,5) / HCO ₃ (84,6)	20,5	522,3	1,5	
6534 Happurg	Happurg	Gesund- brunnen	Dogger Alpha	Ca(71), Mg(26,5) / HCO ₃ (51), SO ₄ (47)	50,6	982,7	0,04	0,77 mg/l Fe ²⁺
6734 Neumarkt	Neumarkt	Wildbad	Opalinuston (Dogger Alpha)	Mg(62,5), Ca(28) / SO ₄ (48), HCO ₃ (28), Cl (24)	48,6	970	(verfüllt)	6,5 mg/l "kohlen- saurer Eisen", 10 mg/l H ₂ S

Neben diesen Quellen erschließen einige im bzw. am unmittelbaren Rand des Untersuchungsraumes gelegene Bohrungen Mineral- und Thermalwässer des tieferen Untergrunds. Da diese Gesteinsabfolgen nicht direkt zum hier behandelten Themenkreis "Nördliche Frankenalb" zählen, sind die entsprechenden Bohrungen im folgenden nur tabellarisch erwähnt:

TK 25	Ort	Bezeichnung der Bohrung	Grundwasserleiter	Charakteristik	Bezeichnung des Wassers
5831	Staffelstein	Therme I/1975	Buntsandstein	Na(85), Cl(90)	Thermalsole
5831	Staffelstein	Therme II/1993	Buntsandstein	Na(90), Cl(94)	Thermalsole
6034	Obersees	GLA 1983	Muschelkalk, Buntsandstein, Zechstein	Na(77), Ca(13) / Cl(75), HCO ₃ (14), SO ₄ (11)	stark mineralisiertes, CO ₂ -führendes Na-Cl-Thermalwasser
6232	Bammersdorf	TB	Keuper	Na(70), Ca(16) / Cl(68), SO ₄ (20)	Mineralwasser / "Na-Cl-Quelle"

9 Zusammenfassung

Das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU) hat das Bayerische Geologische Landesamt (GLA) beauftragt im Rahmen der Grundlagenermittlung zur Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung das Gebiet der Nördlichen Frankenalb hydrogeologisch detailliert zu untersuchen und die Ergebnisse in einem Bericht darzulegen.

Das Bearbeitungsgebiet "Nördliche Frankenalb" erstreckt sich von Lichtenfels im Norden bis zur Verbindungslinie Altdorf-Amberg im Süden, von Forchheim im Westen bis nach Vilseck bzw. Amberg im Osten. Die Längserstreckung beträgt ca. 100 km, die Breite schwankt zwischen 30 und 60 km. — Im Untersuchungsraum stehen mesozoische Gesteine an, die ein Schichtpaket vom Rhätolias bis zur Kreide umfassen. Diese werden gelegentlich von quartären Lockersedimenten überdeckt.

Dogger und Malm bilden im Untersuchungsgebiet zwei wasserwirtschaftlich bedeutsame Grundwasserstockwerke. Im Dogger-Grundwasserstockwerk wirken der Opalinuston als Grundwassersohle, der Eisensandstein (Dogger Beta) als Kluft/Poren-Grundwasserleiter und die höheren Doggerschichten, insbesondere der Ornatenton als Grundwasserdeckschicht. Wasserwirtschaftlich spielt der Dogger hauptsächlich im Randbereich der Alb sowie im Gebiet des Seichten Karstes eine wichtige Rolle, da dort die Erschließungstiefen sowie die Grundwasserneubildung günstige Voraussetzungen bieten.

Das Malmkarst-Grundwasserstockwerk hat den Ornatenton sowie die mergelige Ausbildung des Malm Alpha als Grundwassersohle. Diese Feinsedimente trennen das Karstwasser vom stratigraphisch tieferen Dogger-Grundwasser hydraulisch ab. Die nachfolgenden Kalk- und Dolomitgesteine in Schicht- oder Massenfazies bilden aufgrund der räumlich miteinander vernetzten Klüfte und Bankungsfugen einen einheitlichen Kluft-Grundwasserleiter, dessen Wasserleitvermögen in Verbindung mit der Verkarstung stetig zunimmt. Die Malmüberdeckung, im wesentlichen bestehend aus Kreidesedimenten oder Alblehmen, bildet die Grundwasserüberdeckung. Da die Malmüberdeckung bereichsweise große Lücken aufweist oder gänzlich fehlt, unterscheidet man hinsichtlich der Karstwasserabschirmung bedeckten, teilbedeckten oder unbedeckten bzw. nackten Karst.

Im Ausstrich des Malms, dem auf den Hochflächen weitgehend der oberirdische Abfluß fehlt, lassen sich im allgemeinen relativ hohe Grundwasserneubildungsraten erwarten; dies erklärt auch, weshalb der Malmkarst das Hauptziel dieser Detailuntersuchungen war.

Die Kalke bzw. Dolomite des Malms weisen ein ausgeprägtes Klüftungsgefüge und Bankungsstrukturen auf. Bereichsweise sind die Trennfugen durch Verkarstung erweitert, so daß Gerinne und Höhlen auftreten können. Der Malmkarst läßt sich somit als kombinierter Kluft-Karst-Grundwasserleiter bezeichnen. — Die Kalksteine bzw. die Dolomite des Malms treten, in Abhängigkeit von ihrer Entstehung, in unterschiedlichen Erscheinungsformen (Fazies) auf. So können beispielsweise schichtige Kalke, die z. T. mit Mergeln wechsellagern, neben bankigen Dolomiten, Schwammriffen und Riffschutt-Ablagerungen beobachtet werden. Diese Faziestypen weisen unterschiedliche hydraulische Eigenschaften auf. Teilweise verzahnen sie sich engräumig miteinander, was einen raschen Wechsel der hydraulischen Eigenschaften bedingt.

Das Schichtgebäude liegt in der Nördlichen Frankenalb nicht söhlig (eben), es wird vielmehr durch großräumige Mulden und Aufwölbungsstrukturen geprägt. In den Muldenstrukturen steigt die Mächtigkeit des Grundwasserleiters stark an; so beträgt sie im Zentrum der Hollfelder Mulde über 100, in der Veldensteiner Mulde sogar über 200 m. — Nur bereichsweise, bevorzugt in den Muldenzonen, wird der Malm von sandigen und/oder tonigen Kreideschichten überdeckt. Diese bilden z. T. hangende Grundwasservorkommen aus oder wirken filtrierend für das in den Malmkarst einsickernde Tagwasser.

Die freie Grundwasseroberfläche formt das Geländere relief in stark generalisierter Form nach. Als Hauptvorfluter des Untersuchungsgebietes erweisen sich die Pegnitz, die Wiesent und der Weismain. Streicht die Dogger/Malm-Grenze über dem Vorfluter-Niveau aus, so spricht man vom Seichten Karst, taucht sie so weit darunter ab, daß sich unter dem Vorfluter noch eine ausreichende Karstwasser-mächtigkeit befindet, die eine von der Vorflut unbeeinflusste Karstwasserbewegung erlaubt, so trifft die

Bezeichnung Tiefer Karst zu. In Muldenzonen kann teilweise unter mächtiger Kreideüberdeckung auch gespanntes Grundwasser beobachtet werden.

Auf der Grundlage von Archivdaten (Bohrungen) und einer Literaturlauswertung konnte eine Karte der Dogger/Malm-Grenze (Basis des Karstwasser-Stockwerks) neu erstellt werden. Zur Erkundung unterirdischer Grundwasserscheiden sowie hydraulischer Parameter führte das GLA zahlreiche Karstwassermarkierungsversuche durch. Die Wahl der Projektgebiete zielte bevorzugt auf wasserwirtschaftlich interessante Bereiche im Tiefen Karst ab, wobei häufig Nutzungskonflikte wie Abwasserleitungen in den Karst mit einbezogen wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in einer Übersicht zusammengefaßt.

Für die Erstellung der Grundwasseroberfläche (mittlerer Grundwasserstand) des Malm-Grundwasserstockwerks fanden neben Quellen, Bohrungen und Brunnen auch Flußläufe, die Höhenlage der Trockentäler sowie die Ergebnisse der Karstwassermarkierungsversuche Berücksichtigung. Aus der Verschneidung der Dogger/Malm-Grenze mit der Karstwasser-Oberfläche entstand eine Differenz-Darstellung der Grundwassermächtigkeit. In Verbindung mit den Flächen-Darstellungen vermittelt eine Serie von Profil-Darstellungen einen räumlichen Überblick über die Verteilung der Bank- und Riffazies, der Lagerungsverhältnisse (Mulden, Sättel, Verwerfungen) sowie über die Karstwassermächtigkeiten, die Morphologie der Karstwasseroberfläche, die Flurabstände und die Beziehung des Karstwassers zum oberirdischen Gewässernetz.

Für die hydrochemische Charakteristik der Wässer wurde nach umfangreichen Literaturstudien das Datennetz durch Eigenbeprobung an ca. 220 ausgewählten Probenahmestellen (Quellen und Brunnen) verdichtet. Neben den, im Gelände gemessenen chemischen und physikalischen Parametern sind im Labor die Hauptbestandteile, die Phosphatgehalte sowie Spurenstoffe, bestimmt worden. Weiterhin hat das GLA während eines Frühjahrs-Hochwassers an ausgewählten (großen) Quellen eine hydrochemische Stichtagsbeprobung durchgeführt.

Signifikante hydrochemische Parameter sind in thematischen Karten zusammengestellt, die Grundwassertypen in Piper-Diagrammen charakterisieren. Die aktuelle hydrochemische Bestandsaufnahme zeigt, daß die Wässer des Malmkarstes (vor allem des Tiefen Karstes) trotz z. T. verbreitetem anthropogenem Eintrag im allgemeinen noch relativ gering belastet sind.

Zur Bilanzierung der Grundwasserneubildungsrate hat das Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW), in Zusammenarbeit mit dem GLA zunächst das amtliche Gewässernetz durch den Neubau einiger Pegelmeßstellen ergänzt. Darüberhinaus sind, über mehrere Jahre hinweg, bei geeigneter Wetterlage detaillierte Abfluß- und Quellschüttungsmessungen durchgeführt worden. Bei diesen Messungen wurde das GLA von den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern bei einer Reihe von Abflußmeßstellen unterstützt. — Die erzielten Meßergebnisse beziehen sich jeweils auf die mittlere Niedrigwassersituation und kamen in thematischen Karten zur Darstellung. Eine Übersicht vermittelt z. B. die Quellschüttungen sowie die Exfiltrationsmengen in die Vorfluter (bezogen auf $l/[s \cdot km]$) und die Versickerungstrecken von Oberflächenwasser (Infiltration).

Die Darstellung flächenbezogener Grundwasserneubildungsrate ist im Karst, aufgrund der Inhomogenität der Exfiltrationsrate, durch Infiltration von Oberflächengewässern sowie Umströmung einzelner Abflußmeßstellen problematisch. Daher erschien es sinnvoll, Teilgebiete zusammenzufassen und die so erhaltenen Flächen mit den jeweiligen Grundwassermächtigkeiten bzw. mit der Zugehörigkeit der Areale zum Seichten bzw. Tiefen Karst in Beziehung zu setzen. Auf diese Weise konnte eine klassifizierte Übersicht der Grundwasserneubildungsrate erstellt werden.

Vergleicht man die aktuelle wasserwirtschaftliche Nutzung sowie die bereits erkundeten Erschließungsgebiete mit den jeweils ermittelten Grundwasserneubildungsrate, so werden die Gebiete einer potentiellen Grundwassergewinnung augenfällig. Diese Bilanzierung zeigte, daß im Malmkarst neben den vom LfW bislang bereits erkundeten, aber noch nicht genutzten Fördermengen von ca. 15 Mio. m^3 pro Jahr, weitere 20 Mio. m^3 /Jahr ein nicht gesichertes, aber mit guten Gründen anzunehmendes ("hydrologisch nachgewiesenes") Grundwasserdargebot darstellen. Eine Förderung dieser Wasser-

mengen ließe (aufgrund der vorsichtigen Bilanzierung) keine negative Einflüsse für den Naturhaushalt befürchten.

Desweiteren konnten Areale mit unterschiedlich klassifizierter Kreide- und Gesamtüberdeckung ausgewiesen werden. Mit Hilfe der Topographischen Karte ließ sich eine Übersicht über die aktuelle Nutzung, wie Acker-, Wiesen-, Wald-, Siedlungsflächen und Hauptverkehrswege, erarbeiten. Durch die Verschneidung dieser beiden Karteninhalte, in Verbindung mit der Grundwassermächtigkeit (Verdünnung von sporadischen Schadstoffeinträgen) und der Zugehörigkeit zum Seichten bzw. Tiefen Karst entstand die Abgrenzung von Gebieten mit unterschiedlichen potentiellen Grundwassergefährdungsabstufungen. Die Karte der Grundwassergefährdung wird als Entscheidungshilfe bei Neuerschließungen empfohlen.

10 Literaturverzeichnis

ANTONIADIS, P., FYTROLAKIS, N., HEGENBERGER, W. & STRASSNER-MUNK, C. (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6032 Scheßlitz: 204 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

APEL, R. (1972 a): Hydrogeologie.— In: ANTONIADIS, P., FYTROLAKIS, N., HEGENBERGER, W. & STRASSNER-MUNK, C.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6032 Scheßlitz: 109-132, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1972 b): Hydrogeologie.— In: MEYER, R. K. F., VIOHL, G. & ZORN, H.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5933 Weismain: 87-107, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1972 c): Hydrogeologie.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6033 Hollfeld: 65-80, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1974 a): Hydrogeologie.— In: SCHMIDT-KALER, H.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6634 Altdorf: 71-90, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1974 b): Hydrogeologie.— In: HÄNEL, R.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6433 Lauf a.d. Pegnitz: 52-70, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1975): Hydrogeologie.— In: GOETZE, F., MEYER, R. K. F. & TREIBS, W.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6334 Betzenstein: 98-111, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1977 a): Hydrogeologische Verhältnisse.— In: SCHMIDT-KALER, H.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6534 Happurg: 52-59, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1977 b): Hydrogeologie.— In: TREIBS, W., GOETZE, F. & MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6435 Pommelsbrunn: 91-101, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1979): Hydrogeologische Verhältnisse.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6132 Buttenheim: 101-110, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1983): Hydrogeologie.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6535 Alfeld: 90-100, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1984): Hydrogeologische Verhältnisse.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6635 Lauterhofen: 70-78, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG DER FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT (Hrsg.) (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate.— Geol. Jb., C 19: 3-98, Hannover.

ARMBRUSTER, J. (1982): Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebotes.— DVWK, 4. Fortbildungsgang Grundwasser, [unpag.], Bonn.

BADER, K. (1979): Magnetische Messungen.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6132 Buttenheim: 98-100, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA) (1973): Gutachten des Bayerischen Geologischen Landesamtes über die Möglichkeit zur Neuerschließung von Mineral- und Thermalwässern und sonstigen potentiellen Heilwässern in Bayern.— Nr. 318elV/2-1010: 143 S.— [Unveröff., 29.06.1973].

- (1978): Hydrogeologische Verhältnisse und Grundwasserdargebot im Isargebiet.— In: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (StMLU) (Hrsg.) (1979): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Isar - Band I: Planung, Gutachten: 195-232, München (Oldenbourg).
 - (1983 a): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch bei Engenthal/Pegnitz.— Bericht 408.4-IV/3b v. 29.12.1983, erstattet an die Gemeinde Hartenstein / Lkr. Nürnberger Land, 12 S., München, unveröffentlicht.
 - (1983 b): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch bei Ursensollen/Opf.— Bericht v. 25.07.1983, erstattet an die Gemeinde Ursensollen, 12 S., München, unveröffentlicht.
 - (1989): Gutachten zu den fachlichen Äußerungen bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse in der Vilsecker Mulde.— 13 S., 408.2-412, unveröffentlichtes Gutachten v. 01.08.1989, erstattet an: Landesanstalt Regensburg.
 - (1991): Geologische Regionalgliederung (Übersichtskarte: 1:500 000), Fassung vom 22.08.1991, unveröffentlicht.
 - (1992 a): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch im Umfeld des Brunnens "Scherleiten" (Hollfelder Mulde).— Bericht v. 25.03.1992, erstattet an den Zweckverband zur Wasserversorgung der Juragruppe, 13 S., München, unveröffentlicht.
 - (1992 b): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch in der Nördlichen Hollfelder Mulde.— Bericht v. 15.07.92, erstattet an das LfW, 22 S., München, unveröffentlicht.
 - (1992 c): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch im Raum Gräfenberg-Egloffstein-Betzenstein-Hüttenbach.— Bericht v. 26.08.1992, erstattet an das LfW, 20 S., München, unveröffentlicht.
 - (1992 d): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch im Raum Leutenbach-Egloffstein-Hundshaupten.— Bericht v. 26.08.1992, erstattet an das LfW, 13 S., München, unveröffentlicht.
 - (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main — Hydrogeologie.— 138 S., München.
 - (1994 a): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch im Raum Pegnitz-Schnaittach (Veldensteiner Mulde), durchgeführt in den Jahren 1993 und 1994.— Bericht v. 04.08.1994, erstattet an das LfW, 7 S., München, unveröffentlicht.
 - (1994 b): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch im Raum Scheßlitz-Weismain-Thurnau-Hollfeld-Königsfeld (nördliche Hollfelder Mulde), durchgeführt in den Jahren 1993 und 1994.— Bericht vom 04.08.1994, erstattet an das LfW, 8 S., München, unveröffentlicht.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (LfU) (1974): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Regnitz, Band I - Planung, Gutachten, Tabellen. — 247 S., München (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN [StMLU]).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (LfW) (1977 a): Schlußgutachten für das Erkundungsgebiet Kennziffer 5.04 Oberes Wiesenttal, Landkreis Bayreuth.
- (1977 b): Erläuterungen zum Bericht Grundwassererkundungsgebiet Unteres Wiesenttal Kennziffer 4.05, Landkreis Forchheim.

— (1979): Erläuterung zum Bericht über das Erkundungsgebiet Weidensees Kennziffer 5.03, Landkreis Bayreuth.

— (1987) siehe ROTHASCHER, A. (1987)

— (1990): Bericht zur Grundwassererkundung in Bayern, Teil C, Lagepläne und Listen der erkundeten Maßnahmen (Anhang zur Schriftenreihe Heft 23), München, unveröffentlicht.

BIRZER, F. (1939): Verwitterung und Landschaftsentwicklung in der südlichen Frankenalb.— Sonderdr. Z. Dtsch. Geol. Ges., **91**, H.1: 57 S., Erlangen.

— (1960): Einige ehemalige Wildbäder Nordbayerns. — In: Geol. B. NO-Bayern, Band **10**, Heft 4: 159-166, Erlangen.

BODECHTEL, J. (1969): Photogeologische Untersuchungen über die Bruchtektonik im Toskanisch-Umbrischen Apennin.— Geol. Rdsch., **59**: 265-278, Stuttgart.

BRUNNACKER, K. (1955): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6034 Mistelgau: 62 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

BÜTTNER, G. (1986): Hydrogeologie.— In: MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6636 Kastl: 69-83, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1989): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5928 Obertheres: 164 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1990): Entwässerte Nordfranken im Plio-Pleistozän nach Süden? — (Eine kritische Betrachtung der Flußgeschichte Frankens).— Naturw. Jb. Schweinfurt, **8**: 43-84, Schweinfurt.

BUNDESMINISTER FÜR JUGEND, FAMILIE UND GESUNDHEIT BMJFG (1984): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Verordnung über natürliches Mineralwasser, Quellwasser und Tafelwasser vom 26. November 1984. — Bundesanzeiger 225/84.

— (1986): Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung — TrinkwV). — BGLBl., I: 760.

— (1990): Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung v. 5. Dezember 1990 (Anlage 4.3 Grenzwerte). — BGLBl. 1990, Teil 1: 2612-2629, Bonn.

DIEPOLDER, G. W. (1994): Karten der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung 1:50 000, Blatt L6534 Hersbruck.— 2 Karten mit Kurzerläuterungen, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

DIETZ, T. (1973): Bodenkarte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6434 Hersbruck: 84 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

DIN 4049 BLATT 1 (1954): Gewässerkunde, Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen, Teil I: quantitativ.— 26 S., Berlin (Beuth).

DIN 4049 BLATT 2 (1960): Gewässerkunde, Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen, Teil II: qualitativ.— 10 S., Berlin (Beuth).

DIN 4049 TEIL 1 (1979): Hydrologie. Begriffe, quantitativ.— 54 S., Berlin (Beuth).

DIN 4049 TEIL 1 (1992): Hydrologie. Grundbegriffe 12 S., Berlin (Beuth).

DIN 4049 TEIL 2 (1990): Hydrologie. Begriffe der Grundwasserbeschaffenheit 25 S., Berlin (Beuth).

- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie. Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie 80 S., Berlin (Beuth).
- DOBEN, K. & HELLER, F. (1968): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6637 Rieden: 56 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- DORN, P. (1958): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6333 Gräfenberg: 84 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EXLER, H. J. (1957): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6234 Pottenstein: 44 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- EXLER, H. J., FREYBERG, B. V., LEUBE, A., STEINLEIN, H. (1961): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6235 Pegnitz: 207 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- FHKF (1975): Bericht über einen Karstwassermarkierungsversuch ESE Gößweinstein (Eingabestelle: Fellner Doline).— Forschungsgruppe Höhle und Karst (Franken), unveröffentlicht.
- (1990): Bericht über die Durchführung und das Ergebnis des Markierungsversuches im Franzosenloch b. Etzdorf Gmde. Gößweinstein, in der Zeit vom 28.04.1990 bis 01.05.1990.— Forschungsgruppe Höhle und Karst (Franken), Bericht v. 08.05.1990, 4 S., Neunkirchen/Brand (PREU, D.), unveröffentlicht.
- (1992): Ergebnisbericht über die Karstwassermarkierung in der Doline in Kanndorf.— Forschungsgruppe Höhle und Karst (Franken), Bericht v. 28.05.1992, 4 S., Neunkirchen/Brand (PREU, D.), unveröffentlicht.
- FRANK, H. (1977): Hydrogeologische Verhältnisse.— In: EMMERT, U.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6035 Bayreuth: 117-125, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1979): Hydrogeologische Verhältnisse.— In: BERGER, K.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6633 Feucht: 61-70, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- FREYBERG, B. V. (1969): Tektonische Karte der Fränkischen Alb und ihrer Umgebung.— Erlanger geol. Abh., 77: 81 S., Erlangen.
- FÜRST, M. (1956): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6135 Creußen: 52 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- FURTAK, H. & LANGGUTH, H. R. (1967): Zur Hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen.— Mem. Internat. Assoc. Hydrogeol. Congress, 1965, 7: 89-96, Hannover.
- GANGEL, L. (1977): Luftbildgeologische Untersuchungen im nördlichen Buntsandstein-Odenwald.— Geol. Jb. Hessen, 105: 155-167, Wiesbaden.
- GLA siehe BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT
- GOETZE, F., MEYER, R. K. F. & TREIBS, W. (1975): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6334 Betzenstein: 144 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- GOTTWALD, H. (1959): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6133 Muggendorf: 52 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- GUDDEN, H. (1980): Die Thermalsolequelle Staffelstein.— In: 850 Jahre Marktrecht der Stadt Staffelstein 1130-1980: 219-232, Staffelstein.

GUDDEN, H. & SCHMID, H. (1985): Die Forschungsbohrung Obernsees — Konzeption, Durchführung und Untersuchung der Metallführung.— In: *Geologica Bavarica* **88**: 5-21, München.

GUDDEN, H. & TREIBS, W. (1961): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6436 Sulzbach-Rosenberg Nord: 143 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1964): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6536 Sulzbach-Rosenberg Süd: 104 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

HAARLÄNDER, W., RUPPRECHT, K. H. (1961): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6434 Hersbruck: 76 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

HEGENBERGER, W. & SCHIRMER, W. (1967): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5932 Ützing: 156 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

HÖLL, K. (1968): Wasser — Untersuchung-Beurteilung-Aufbereitung-Chemie-Bakteriologie-Biologie.— 393 S., Berlin.

HÖLTING, B. (1984): Hydrogeologie.— 2. Aufl.: XI+370 S., Stuttgart (Ferdinand Enke).

HOHBERGER, K. (1977): Grundwasserbilanz, Chemismus und Stoffaustrag im Einzugsgebiet der Tauber oberhalb von Bad Mergentheim. — Diss. Univ. Tübingen, 188 S., Tübingen.

KANZ, W. (1977): Das Talgrundwasser des Maintals im Grenzbereich Muschelkalk — Buntsandstein, Hydrogeologie und Beschaffenheit.— Diss. Univ. Tübingen, 118 S., Tübingen.

KANZ, W., SCHNITZER, W. A. & TÜRK, H.-P. (1978): Karst und Grundwasser im Malm der Nördlichen Frankenalb.— In: *Schriftenreihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, **7**, Das Mainprojekt: 219-239, München.

KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren, langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse.— *Z. Dtsch. Geol. Ges., Sonderheft Hydrogeologie Hydrochemie*: 89-95, Hannover.

KLUT-OLSZEWSKI (1945): Untersuchung des Wassers an Ort und Stelle, seine Beurteilung und Aufbereitung.— 9. Aufl.: 281 S., Berlin (Springer).

KÖPF, E. & ROTHASCHER, A. (1980): Das natürliche Grundwasserdargebot in Bayern im Vergleich zu den Hauptkomponenten des Wasserkreislaufes.— *Schriftenreihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, **13**: X+14 S., München.

KRUMBECK, L. (1956): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6232 Forchheim: 80 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

LEHMANN, U. (1977): Paläontologisches Wörterbuch.— 2. Aufl., 440 S., Stuttgart.

LfU siehe BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ

LfW siehe BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT

MATTHESS, G. (1990): Lehrbuch der Hydrogeologie: Bd. 2, Die Beschaffenheit des Grundwassers. — 2. Aufl.: X+498, Berlin, Stuttgart (Borntraeger).

MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt.— In: MATTHESS, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie, **1**: XII+438 S.: Berlin, Stuttgart (Bornträger).

- MEYER, R. K. F. (1972 a): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits (Malm), 1. Teil, Nördliche Frankenalb.— Erlanger geol. Abh., 91: 28 S., Erlangen.
- (1972 b): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6033 Hollfeld: 107 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1979): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6132 Buttenheim: 136 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1981): Kreide nördlich der Alpen.— In: Erl. geol. Kt. Bayern 1:500 000: 68-78, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1983): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6535 Alfeld: 119 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1984): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6635 Lauterhofen: 96 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1986): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6636 Kastl: 100 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1981 a): Lias.— In: Erl. geol. Kt. Bayern 1:500 000: 55-57, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1981 b): Dogger.— In: Erl. geol. Kt. Bayern 1:500 000: 58-61, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm).— Geol. Jb., A 115: 3-77, Hannover.
- MEYER, R. K. F., VIOHL, G. & ZORN, H. (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 5933 Weismain: 160 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MEYNEN, E., SCHMITHÜSEN, J., GELLERT, J., NEEF, E., MÜLLER-MINY, H. & SCHULTZE, J. H. (Hrsg.) (1961): Naturräumliche Gliederung und Waldverbreitung 1:1 000 000.— Die Bundesrepublik Deutschland in Karten: Bl. 5111, Bad Godesberg (B.-Anst. Landeskd.).
- MÜLLER, K. W. (1959): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6233 Ebermannstadt: 58 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- MÜLLER, W. ET AL. (1974): Duden. Bd. 5: Fremdwörterbuch.— 3. Aufl.: 781 S., Mannheim, Wien, Zürich (Bibliographisches Institut AG).
- MURAWSKI, H. (1977): Geologisches Wörterbuch.— 7. Aufl.: XI+280 S., Stuttgart (Ferdinand Enke).
- NEEF, E. (1976): Das Gesicht der Erde, Taschenbuch der physischen Geographie.— 908 S., Zürich, Frankfurt a. Main.
- NEUPERT, E. (1959): Das Gebiet der Störungszonen von Kirchenthumbach und Stegenthumbach, Opf.— Erlanger geol. Abh., 32: 84 S., Erlangen.
- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflüsse (TWL).— Wasserwirtschaft, 41, Sonderheft, Vortr. Tagung gewässerk. Anst. 13./14.9.1950 in München: 12-14, Stuttgart.
- POHL, J. & SOFFEL, H. (1977): Paleomagnetic and Rock Magnetic Investigations of Tertiary Volcanics in Northern Bavaria.— J. Geophys., 42: 459-477, Berlin, Heidelberg, New York.

QUENTIN, K.-E. (1970): Die Heil- und Mineralquellen Nordbayerns.— *Geologica Bavarica*, **62**: 312 S., München.

RICHTER, D. (1989): Ingenieur- und Hydrogeologie.— XIX+607 S., Berlin, New York (Walter de Gruyter & Co).

REUL, K. (1953): Geologie des Kartenblattes Thurnau/Ofr. 1:25 000. Nebst Untersuchungen über den Mechanismus der tektonischen Erscheinungen.— *Erlanger geol. Abh.*, **6**: 72 S., Erlangen.

RÖMPP, H. & ÜHLEIN, E. (1966): Chemie Lexikon.— 1-7: 7859 S., Stuttgart (Franckh'sche Verlagsbuchhandlung W. Keller & Co).

ROTHASCHER, A. (1987): Die Grundwasserneubildung in Bayern. Berechnet aus den Niedrigwasserabflüssen der oberirdischen Gewässer.— *Informationsberichte Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, **1987** (3): 86 S., München.

SCHAUFUSS, W. (1989): Bodenkundliche Aufnahmen im Bereich der Nördlichen Frankenalb im Raum Hiltoplstein. Einschließlich einer Spezialuntersuchung zur Eignung ausgesuchter Böden für die Filterung kommunaler Abwässer.— *Diplomarbeit Inst. f. Geol. u. Miner. Univ. Erlangen-Nürnberg*, 200 S., Erlangen.

SCHMIDT-KALER, H. (1974): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6634 Altdorf: 152 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

— (1977): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6534 Happurg: 79 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).

SCHNITZER, W. A. (1967): Ergebnisse und Erfahrungen bei Markierungsversuchen im Karst der nördlichen Frankenalb.— *Jh. Karst- u. Höhlenkunde*, **H. 7**: 19-27, München.

SCHNITZER, W. A. & WAGNER, W. (1967): Markierungsversuche mit Geruchsstoffen in der Karsthydrologie.— *Geol. B. NO-Bayern* **17**: 179-194, Erlangen.

SCHROEDER, G. (1955): Die Grundwasserreserven der Flußgebiete.— *Bes. Mitt. Dtsch. Gewässerkundl. Jb.*, **13**: 26 S., Koblenz.

SCHWARZMEIER, J. (1981): Tektonik der Süddeutschen Großscholle.— In: *Erl. geol. Kt. Bayern 1:500 000*: 97-101, München (Bayer. Geol. L.-Amt).

SPÄTH, H. (1978): Naturräumliche Gliederung.— In: *Schriftenreihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft*, **7**, Das Mainprojekt: 3-5, München.

SPÖCKER, R. G. (1935): Der Karst des Oberen Pegnitzgebietes mit Übersichtskarte über das obere Pegnitz-Flußgebiet 1:100 000.— *Abh. Naturhist. Ges. Nürnberg*, **25**, H1.

— (1950): Das obere Pegnitzgebiet, die geologischen und hydrogeologischen Voraussetzungen für eine Wassererschließung im Fränkischen Karst.— *Sonderbeil. Mitt. dtsh. Ges. Karstforsch.*, **2 Bde.**: 228 S., Nürnberg.

STREIT, R. (1971): Karstwasservorräte in der Fränkischen Alb.— *Geologica Bavarica*, **64**: 254-267, München.

— (1977): Das Bruchschollenland der Nördlichen Frankenalb und ihrer Umgebung und des Gebietes zwischen den Haßbergen und der Rhön (Ergebnisse einer Luftbildauswertung).— *Geol. Jb.*, **A 37**: 3-32, Hannover.

- TILLMANN, H. (1958): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6337 Kaltenbrunn: 118 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- TILLMANN H. & TREIBS W. (1967): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6335 Auerbach: 219 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- TILLMANN, H., TREIBS, W. & ZIEHR, H. (1963): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6537 Amberg: 222 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- TREIBS, W. (1972): Verkarstungserscheinungen.— In: MEYER, R. F. K.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6033 Hollfeld: 9-14, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- TREIBS, W., GOETZE, F. & MEYER, R. K. F.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6435 Pommelsbrunn: 127 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WALAYATI, S. (1978): Karsthydrologische Untersuchungen im Gebiet zwischen Aufseß, Wiesent und Leinleiter (Nördliche Frankenalb).— Diss. Univ. Würzburg, 105 S., Würzburg.
- WIPPERN, J. (1955): Geologische Karte von Bayern 1:25 000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6134 Waischenfeld: 47 S., München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde.— 320 S., Berlin (Springer).

Anhang 1: Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Anhang 1a: Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1 Übersicht zur regionalen Gliederung
- Abb. 2 Geologische Übersichtskarte mit Abgrenzung des Bearbeitungsgebietes
- Abb. 3 Bezeichnung tektonischer Großstrukturen
- Abb. 4(a+b) Schichtlagerungskarte der Dogger/Malm-Grenze
- Abb. 5 Richtungsverteilung der Klüfte im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb
- Abb. 6 Vergleich von Kluft- und Talrichtungen (Summendarstellung)
- Abb. 7(a+b) Zusammenstellung von Ergebnissen von Grundwassermarkierungsversuchen (Farbstoffausbreitung)
- Abb. 8(a+b) Grundwasseroberfläche im Malm-Grundwasserstockwerk
- Abb. 9(a+b) Grundwassermächtigkeit des Malm-Grundwasserstockwerks
- Abb. 10(a+b) Abgrenzung Seichter Karst / Tiefer Karst, Klassifizierung der Kreideüberdeckung sowie der Gesamtüberdeckung
- Abb. 11 Hydrogeologische Schemaprofile durch die Nördliche Frankenalb
- Abb. 12(a+b) Geologisch-hydrogeologische Profilschnitte durch die Nördliche Frankenalb
- Abb. 13(a+b) Übersicht von Quellen, Brunnen, Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken im Malm-Grundwasserstockwerk
- Abb. 14 Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967)
- Abb. 15 Wässer aus dem Dogger
- Abb. 16 Wässer aus dem Malm (Seichter Karst)
- Abb. 17 Wässer aus dem Malm (Tiefer Karst)
- Abb. 18 Sulfatgehalte im Karstwasser
- Abb. 19 Chloridgehalte im Karstwasser
- Abb. 20 Nitratgehalte im Karstwasser
- Abb. 21 Phosphatgehalte im Karstwasser
- Abb. 22 Kaliumpermanganat-Verbrauch im Karstwasser
- Abb. 23 Elektrische Leitfähigkeit im Karstwasser
- Abb. 24 Schemaprofile zur Überdeckung des Karstgrundwasserleiters
- Abb. 25(a+b) Übersicht der Grundwasserneubildungsraten im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb
- Abb. 26(a+b) Karte der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers (unter Berücksichtigung aktueller Nutzungsfaktoren)
- Abb. 26 c Schema zur Ermittlung der Klassen der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers unter Berücksichtigung hydrogeologischer Faktoren sowie aktueller Nutzungsfaktoren
- Abb. 27 a Übersicht ergiebiger Grundwasservorkommen im Malmkarst (unter Berücksichtigung ihrer potentiellen Gefährdung)

- Abb. 27 b Übersicht ergiebiger Grundwasservorkommen im Malmkarst
- Abb. 28 Gewässerkundliche Meßstellen an oberirdischen Gewässern
- Abb. 29 Karte der Verteilung von Dolinen
- Abb. 30 Fazielle Entwicklung der Malmgesteine

Anhang 1b: Verzeichnis der Tabellen

Nummer	Bezeichnung	Seite
Tabelle 1	Naturräumlicher Überblick	9
Tabelle 2	Gefälleverhalten von Bächen und Flüssen in der Nördlichen Frankenalb	14
Tabelle 3 a	Schichtmächtigkeiten (zusammengestellt aus den Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000 - Nordteil)	20
Tabelle 3 b	Schichtmächtigkeiten (zusammengestellt aus den Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000 - Südteil)	21
Tabelle 4	Hydraulische Kennwerte ausgewählter Brunnen im Tiefen Karst	24
Tabelle 5	Stand der geologischen Bearbeitung im Untersuchungsraum	30
Tabelle 6	Auswahl von Kluftweiten-Messungen in nahe der Grundwasseroberfläche gelegenen Lokalitäten	33
Tabelle 7	Auflistung der vom GLA zwischen 1982 und 1993 im Untersuchungsgebiet durchgeführten Karstwassermarkierungsversuche	39
Tabelle 8	Auflistung der in Abbildung 7 berücksichtigten, von anderen Institutionen im Untersuchungsraum durchgeführten Karstwassermarkierungsversuche	40
Tabelle 9	Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Lias bzw. den Rhätlias-Schichten im Untersuchungsraum	52
Tabelle 10	Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Dogger	54
Tabelle 11	Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Malmkarst	56
Tabelle 12	Chemische und physikalische Parameter von Wässern aus dem Quartär	63
Tabelle 13	Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate im Albvorland	75
Tabelle 14	Größere Grundwasservorkommen und (potentielle) Erkundungsgebiete im Malmkarst des Untersuchungsraums	81-83
Tabelle 15	Zusammenstellung der erkundeten Grundwassermengen und der potentiellen Entnahmemengen der vom GLA vorgeschlagenen Erschließungen (Entnahmemengen in Mio. m ³ /Jahr)	83
Tabelle 16	Ehemalige Heil- und Mineralwässer aus Gesteinen der Jura-Schichtenfolge des Untersuchungsraumes und seines unmittelbaren Umfeldes	88

Anhang 2: Begriffserläuterungen

Abfluß	<p>allgemein: Unter dem Einfluß der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche sich bewegendes Wasser</p> <p>quantitativ: Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist (l/s, m³/s)</p>
Abflußjahr	einjährige, nach Gesichtspunkten des Wasserhaushalts festgesetzte Zeitspanne
Abflußspende	Quotient aus Abfluß und Fläche des zugeordneten Einzugsgebietes (l/(s*km ²))
Abschiebung	→ Verwerfung
Abstandsgeschwindigkeit	<p>Quotient aus der Länge eines Stromlinienschnittes und der vom Grundwasser beim Durchfließen dieses Abschnittes benötigten Zeit</p> <p>ANMERKUNG: Die durch Markierungsversuche bestimmbare Abstandsgeschwindigkeit ist in guter Näherung gleich dem Quotienten aus Filtergeschwindigkeit und durchflußwirksamen Hohraumanteil. Sie ist nicht identisch mit der Bahngeschwindigkeit eines Grundwasserteilchens entlang seines tatsächlichen Weges.</p>
Adsorption	Aufnahme und Verdichtung von Gasen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche fester Körper
aerob	Bezeichnung für Anwesenheit von freiem gelöstem Sauerstoff
aggressive Kohlensäure	über das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht hinausgehende freie Kohlensäure mit angreifenden Eigenschaften für Bau- und Werkstoffe
Akkumulation	Bezeichnung für Vorgang und Produkt der Ablagerung von Sedimenten (häufig verwendet bei verstärkter örtlicher Anhäufung in Gewässern oder durch den Wind)
Albrauf	Stufenstirn der Fränkischen Alb
Alkali(en)	die in wäßriger Lösung stark basischen Hydroxide von Kalium, Natrium, Lithium, Rubidium und Cäsium
alkalisch	basisch reagierend
Altfläche	→ Rumpffläche
Altlast	Belastung des Bodens, der ungesättigten Zone, des Grundwasserleiters bzw. des Grundwassers durch unsachgemäße Ablagerung und/oder Einleitung von Schadstoffen in der Vergangenheit
Amaltheenton	Schichtbezeichnung im Lias
Amplitude	hier: Höhendifferenz zwischen Sattel- und Muldenscheitel
Anionen	Ionen, die in wäßriger Lösung, unter dem Einfluß des elektrischen Stroms zur Anode (Plus-Pol) wandern, da sie negativ geladen sind
Anstehendes	Gesteinsuntergrund in weitgehend unverwitterter Form
antiherzynisch	SW-NE-verlaufend (v. a. für Verwerfungen verwendet)

Aquifer	grundwassererfüllter Teil eines Grundwasserleiters
artesisch	Bezeichnung für gespanntes Grundwasser, das beim Anbohren von selbst über Flur ausläuft bzw. dessen Grundwasserdruckfläche im betrachteten Bereich oberhalb der Erdoberfläche liegt
Aufschiebung	Erscheinungsbild und Vorgang einer tektonisch bedingten relativen Aufwärtsbewegung einer Gesteinsscholle gegen eine andere an einer steilen (>45°) Bewegungsfläche
Ausbiß	erdoberflächennaher Bereich einer Schicht, eines Ganges oder irgend eines anderen geologischen Körpers
Ausgleichsgerade	hier: Trennlinie für den reinen Grundwasserabfluß mathematisch: Graphisch zu ermittelnde Gerade aus einer sich ergebenden Punktfolge
Ausstrich	→ Ausbiß
Austauschwässer	Wässer, deren Chemismus durch Ionenaustausch verändert wurde
autochthon	an Ort und Stelle entstanden
Bankkalk	dickplattig absondernde Kalksteine
Bankungsfuge	Gesteinsfuge (→ Fuge) parallel zur Bankung
basal	die Basis bildend; auf, an der Basis befindlich
Basalt	dunkles Ergußgestein
Bilanzraum	durch naturräumliche und kommunale Grenzen festgelegtes Bezugsgebiet (innerhalb des Untersuchungsraumes)
Bindemittel	"Zement", der die Räume zwischen den Körnern eines klastischen Sedimentes ausfüllt
bindig	Begriff für die differenzierende Beurteilung des Bodens im halbfesten Konsistenzbereich
Bioherm	durch Organismen aufgebaute riff-, hügel-, linsenartige Struktur
Biostrom	geschichtete Gebilde, organischer Entstehung, nicht hügel förmig oder linsig anschwellend
Blockmeer	Anhäufung von Gesteinsblöcken
Bodenfließen	→ Fließerde
Bodenversiegelung	anthropogen bedingter Boden"verbrauch" (z. B. durch Bebauung)
Bodenwasserhaushalt	längerfristiges Verhalten des Wassers im Boden, in Abhängigkeit von Klima, Bodenart, Relief, Vegetation etc.
Brauchwasser	meist für gewerbliche Zwecke genutztes Wasser ohne Trinkwasserqualität
Brauneisenerz	→ Limonit
Bruchtektonik	Zerbrechungserscheinungen (Klüfte, Fugen, Spalten, Verwerfungen etc.) aufgrund tektonischer Bewegungen
Calcit	Kalkspat, Calciumkarbonat (CaCO ₃)
Calcium	→ erdalkalisches Element (Ca)
Cenoman	stratigraphische Bezeichnung; Stufe der Oberkreide

Chlorid	einwertiges Anion (Cl ⁻), → Chloride
Chloride	Verbindungen von Metallen, Nichtmetallen oder organischen Radikalen mit Chlor
Deckgebirge	Gebirgskomplex, der sich im tektonischen Aufbau und meist auch im Grad der Metamorphose von dem darunter liegenden Grundgebirge deutlich abhebt
Depression	negatives morphologisches Element der Landoberfläche
Diskordanz	ungleichsinnige Lagerung der Gesteinsschichten, winkliges Abstoßen der Schichtung
dissoziieren	zerfallen von Molekülen in einfachere Bestandteile (z. B. Ionen, Radikale, Elemente etc.)
Dogger	stratigraphische Bezeichnung (Abteilung im Jura; "Brauner Jura")
Doline	schlot-, trichter- oder schüsselartige Vertiefung der Karstoberfläche
Dolomit	1. gesteinsbildendes Mineral (CaMg[CO ₃] ₂) 2. Gestein, das dieses Mineral in überwiegendem Anteil enthält
Druckwasserspiegel	Grundwasserspiegel bei gespanntem Grundwasser (Syn.: Druckspiegel)
Durchlässigkeit	Eigenschaft eines Gesteins, für Wasser unter bestimmten Druckverhältnissen durchfließbar zu sein
Durchlässigkeitsbeiwert	Größe, welche den Widerstand (Reibung) eines vom Wasser durchflossenen Gesteins beschreibt (Syn.: k _r -Wert [m/s], Durchlässigkeitskoeffizient) — Quotient aus Filtergeschwindigkeit und zugehörigem Standrohrspiegelgefälle
eggisch	nach dem Streichen des Egge-Gebirges: NNW-SSE-verlaufend
Einzugsgebiet	Gebiet, aus dem Wasser einem bestimmten Ort zufließt
Eisen	metallisches Element mit unterschiedlichen Wertigkeiten (II- und IIIwertig, Fe ^{2+/3+}) der 8. Nebengruppe des Periodensystems
Eisensandstein	Schichtbezeichnung im Dogger (Dogger Beta); brauneisenhaltiger Sandstein
elektrische Leitfähigkeit	Kehrwert des elektrischen Widerstands; erlaubt Rückschluß auf den gelösten Feststoffinhalt eines Wassers
Eluat	durch Elution herausgelöster Stoff
Elution	Herauslösen von adsorbierten Stoffen aus festen Adsorptionsmitteln
Erdalkalien	Sammelbezeichnung für die in der 2. Hauptgruppe des Periodensystems stehenden, chemisch verwandten, fast ausschließlich zweiwertigen Metalle Barium, Beryllium, Calcium, Magnesium, Radium und Strontium
Erdgeschichte	umfassende Übersicht der Entwicklung der Erde und des Lebens mit Hilfe der in den Gesteinen überlieferten Zeugen
Ergiebigkeit	der durch eine Wasserfassung theoretisch mobilisierbare Wasserandrang im Aquifer (→ spezifische Ergiebigkeit)
Erosion	abtragende Tätigkeit von Wasser, Wind und Eis an der Erdoberfläche (Verb: erodieren)

Erzformation	stratigraphisch-lithologische Bezeichnung der nordbayerischen Kreide-Schichtenfolge
Exfiltration	Aus- bzw. Übertritt von Wasser aus dem Grundwasserleiter in den Vorfluter
Fallen	Neigung der Schichten (Syn.: Einfallen)
Fassung	Erschließungsmaßnahme zur Grundwassernutzung
Fazies	Bezeichnung für die Ausbildung eines Sedimentes bezüglich seines petrographischen Aufbaus oder seines durch bestimmte Fossilien charakterisierten Inhalts
Feldspat	gesteinsbildendes Mineral der Silikatgruppe
Festgestein	ein Gestein in dem nicht die Poren, sondern die Fugen hydraulisch wirksame Räume bilden
Feuerletten	Schichtbezeichnung im Mittleren Keuper
Filtergeschwindigkeit	Quotient aus Grundwasserdurchfluß und der dazugehörigen Fläche eines Grundwasserquerschnittes
Flexur	s-förmige Schichtenverbiegung, die durch gegenläufige relative Verschiebung zweier Schollen ohne Bildung größerer Bruchfugen erfolgt
Fließerde	infolge starker Durchnässung sich bildender Bodenbrei, der bereits bei geringen Gefällswinkeln hangabwärts fließt
Fließgeschwindigkeit	→ Abstandsgeschwindigkeit
Flöz	bergmännischer Ausdruck für eine Gesteinsschicht von größerer horizontaler Ausdehnung, die nutzbare Stoffe sedimentärer Entstehung enthält oder aus diesen besteht
Flußgebiet	Einzugsgebiet eines Flusses (→ Einzugsgebiet)
fluviatil	vom fließenden Wasser (abgetragen, abgelagert etc.)
Fossil	Versteinerung, Überreste von Pflanzen und Tieren der geologischen Vergangenheit
Frankenalb	Schichtstufe zwischen dem Fränkischen Keuper-Lias-Land und dem Obermain-Hügelland, die von Gesteinen des Jura aufgebaut wird
Frankenalbfurche	tektonische Haupteinheit (Muldenzone) in der Frankenalb
Genese	Entstehung, Entwicklung
Geochemie	Wissenschaftszweig, der sich mit der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung der Gesteine, Minerale, Böden, Wasser und Gase in den verschiedenen Teilen der festen Erde, der Hydrosphäre und der Atmosphäre befaßt
geogen	durch geologische Vorgänge bedingt
Geologie	Wissenschaft von der Zusammensetzung, vom Bau und von der Geschichte der Erdkruste und von den Kräften, unter deren Wirkung sich die Bildung der Erdkruste vollzieht
Geomorphologie	Wissenschaft von den Formen der Erdoberfläche sowie der sie gestaltend wirkenden physischen Vorgänge

Gerinne	hier: Durch Verkarstung geweitete Fuge
Gesamthärte	Summe der im Wasser vorhandenen Erdalkali-Ionen besonders des Calciums und des Magnesiums (1 mval Erdalkali-Ionen pro Liter = 2,8° Deutsche Härte)
Gips	gesteinsbildendes Mineral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$)
Glaukonit	marin entstandenes dunkelgrünes Mineral mit der Formel: $\text{K}_{2-3}(\text{Mg,Fe,Ca})_{1-3}(\text{Fe,Al})_{3-6}[(\text{OH})_8(\text{Al,Si})_{16} \text{O}_{40}]$
Graben	ein zwischen zwei stehengebliebenen oder gehobenen Schollen an mehr oder weniger parallelen Verwerfungen abgesunkener Streifen der Erdoberfläche (Syn.: Grabenbruch)
Grundgebirge	unter dem Deckgebirge befindlicher Gebirgskomplex
Grundwasser (Gw)	unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Erdrinde (Lithosphäre) zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird
gespanntes Grundwasser	Grundwasser, dessen GwOberfläche und GwDruckfläche im betrachteten Bereich nicht identisch sind
GwAndrang	zum Vorfluter, zu Quellen oder Brunnen strömendes Grundwasser (vgl. Exfiltration)
GwAnstrom	→ GwAndrang
GwAustritt	Natürliches Zutagetreten von Wasser, das dabei von Grundwasser zu oberirdischem Wasser wird
GwDargebot	Summe aller positiven Glieder der Wasserbilanz für einen GwAbschnitt [l/s, m ³ /s] ANMERKUNG: Positive Bilanzglieder sind z. B. GwNeubildung aus Niederschlag und Zusickerung aus oberirdischen Gewässern
GwDeckschichten	alle Gesteine (im weitesten Sinne) oberhalb der GwOberfläche
GwGleiche	Linien gleicher Höhen einer GwDruckfläche (Syn.: Grundwasserhöhengleiche)
GwIsohypse	→ GwGleiche
GwKörper	Abgegrenztes GwVorkommen oder abgrenzbarer Teil eines solchen
GwLeiter	Gesteinskörper, der geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten
GwMarkierungsversuch	Eingabe eines Markierungsstoffes (Tracers) in das Grundwasser um unterirdische Fließwege und hydraulische Kennwerte zu erkunden
GwMächtigkeit	lotrechter Abstand zwischen GwSohle und GwOberfläche
GwModell	Vereinfachte Vorstellung der realen hydrogeologischen Verhältnisse, die durch numerische Methoden simuliert werden können (Rechenmodell)
GwNeubildung	Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser; (Wasservolumen pro Zeiteinheit, welches durch Infiltration von Niederschlags- oder Oberflächenwasser räumlich und zeitlich ungleichmäßig das Grundwasser ergänzt) (Syn.: GwNeubildungsrate; [mm/a], [l/(s*km ²)])

GwOberfläche	obere Grenzfläche eines GwKörpers
GwScheide	Grenzlinie, von der aus Grundwasser nach verschiedenen Richtungen strömt (Syn.: GwSchwelle)
GwSpeicherkapazität	Fähigkeit eines Gesteinskörpers Grundwasser zu speichern
GwSpende	unterirdische Abflußspende, aus dem Grundwasser stammender Abfluß bezogen auf einen Quadratkilometer eines Einzugsgebiets [$l/(s \cdot km^2)$] → GwNeubildungsrate
GwSohle	untere Grenzfläche eines Gwkörpers
GwSohlschicht	stauende Schicht an der Basis eines GwKörpers
GwSpiegel	(theoretische) ausgeglichene Grenzfläche des Grundwassers gegen die Atmosphäre, z. B. in Brunnen und GwMeßstellen
GwStockwerk	GwLeiter einschließlich seiner oberen und unteren Begrenzung als Betrachtungseinheit innerhalb der lotrechten Gliederung der Lithosphäre
Grus (Gesteinsgrus)	eckiges Schuttmaterial von Sand- bis Feinkiesgröße, das sich bei der physikalischen Verwitterung aus körnigen Gesteinen bildet
Halbgraben	Graben, der auf einer Seite von einer Verwerfung begrenzt wird
Halbmulde	Mulde, die auf einer Seite von einer Verwerfung begrenzt wird
Hangendes	das eine Bezugsschicht überlagernde Gestein; die zu einer Bezugsschicht geologisch jüngere Einheit
Hauptwerksandstein	Schichtbezeichnung im Dogger Beta
herzynisch	SE-NW-verlaufend (v. a. für Verwerfungen verwendet)
Hohlraumvolumen	Quotient aus dem Volumen aller Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen (Syn.: Hohlraumanteil)
Holozän	stratigraphische Bezeichnung, jüngste Abteilung im Quartär
Höffigkeit	erwartetes nutzbares GwDargebot
Hornstein	knollige, dichte Kieselausscheidung, Quarzvarietät (Syn: Calcedon)
Hydraulik	Wissenschaft von den Strömungen der Flüssigkeiten
Hydro..., hydro...	in Zusammenhang mit Wasser stehend (z. B. Hydrochemie, Hydrogeologie etc.)
Hydrogenkarbonat	doppeltkohlensaures Salz mit Säurewasserstoffrest [HCO_3^-]
Hydrogeochemie	Teilgebiet der Chemie, das sich mit Grundwasserfragen beschäftigt
Hydrogeologie	Wissenschaft von den Erscheinungen des Wassers in den Hohlräumen der Lithosphäre und seinen Wechselwirkungen mit dem Gestein
Hydrologie	Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften auf und unter der Landoberfläche sowie in den Küstengewässern
Hydronium-Ion	H_3O^+
Indikation	hier: Nachweis
Infiltrat	→ Infiltration
Infiltration	Zugang von Wasser durch enge Hohlräume in die Lithosphäre

intermittierend	zeitweilig aussetzend
Intrusion	Eindringen von fließfähigem Gesteinsmaterial in andere Gesteinsverbände
Ionenbilanz	Bilanz der Äquivalentkonzentrationen der Anionen und Kationen einer chemischen Analyse
Isohypse	Linie gleicher Höhe über NN
Jahresreihe	Reihe aus Jahresmittelwerten
Jungtertiär	stratigraphische Bezeichnung, Unterteilung der Formation Tertiär (Syn.: Neogen)
Jura	stratigraphische Bezeichnung, System im Mesozoikum (Adjektiv: jurassisch)
Kalium	metallisches, stets einwertiges Element der 1. Hauptgruppe des Periodensystems (K^+)
Kaliumpermanganat	$KMnO_4$, Oxidationsmittel; liefert bei der Wasseranalytik Hinweise auf Anteil organischer Inhaltsstoffe aber auch auf andere reduzierbare Stoffe (z. B. Nitrit)
$KMnO_4$ -Verbrauch	Maßzahl für den Gehalt des Wassers an Stoffen, die durch $KMnO_4$ angreifbar sind
Kalkstein	vorwiegend aus Kalziumkarbonat bestehendes Sedimentgestein
Kaolin	weißlicher Ton, hauptsächlich bestehend aus Kaolinit
Kaolinit	Aluminiumhydroxilikat $Al_4[(OH)_8/SiO_4O_{10}]$, mit starrem Schichtgitter
Karbonate	1. Salze der Kohlensäure 2. Karbonatgesteine (z. B. Kalkstein, Dolomit etc.)
Karbonathärte	hydrogenkarbonatisch gebundener Anteil der Gesamthärte
Karst	Gesamtheit der durch die Wirkung von Wasser in löslichen Gesteinen (v. a. Kalk und Gips) entstandenen Formen
Karstgrundwasserleiter	Kluftgrundwasserleiter mit durch Verkarstung erweiterten Trennfugen, Gerinnen und/oder Höhlen
Karstwasser	Grundwasser in verkarstem Gestein
Karstwasserabstrom	→ GwAbstrom
Karstwasserstockwerk	→ GwStockwerk
Kastental	→ Sohlental
Kationen	Ionen, die in wäßriger Lösung unter dem Einfluß des elektrischen Stroms zur Kathode (Minus-Pol) wandern, da sie positiv geladen sind
Känozoikum	stratigraphische Bezeichnung, Zeitalter (Syn.: Neozoikum, "Erdneuzeit")
Kerbtal	→ V-Tal
Keuper	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung in der Trias
Kluft	eine das Gestein und die Schichtung meist ebenflächig durchsetzende, i. d. R. kaum geöffnete Fuge

Kluftgrundwasserleiter	GwLeiter dessen durchflußwirksamer Hohlraumanteil überwiegend aus Klüften und anderen Trennfugen gebildet wird
Kluftrose	prozentuale Darstellung einer beliebigen Anzahl gemessener Kluftrichtungen
Kluftvolumen	gesamter Hohlraum der Klüfte eines Gesteinskörpers
Kontamination	hier: Verunreinigung
Kote	Geländepunkt, dessen Höhenlage genau vermessen ist
Kreide	stratigraphische Bezeichnung, System im Mesozoikum (Adjektiv: kretazisch)
laminare Strömung	gleichförmig paralleler Strömungsverlauf, ohne Querbewegung oder Turbulenzen
Lias	stratigraphische Bezeichnung (Abteilung im Jura; "Schwarzer Jura")
Liegendes	eine Bezugsschicht unterlagerndes Gestein, geologisch älter als die Bezugsschicht (Syn.: Liegendschichten)
limnisch	Bezeichnung für Vorgänge, Produkte und Ablagerungen in Süßwasserseen
Limonit	Brauneisenstein, FeOOH
Limonitsandstein	brauneisenhaltiger Sandstein
Lineament	strukturell besonders markante und ausgedehnte Zone
Lithologie	Gesteinskunde
Löß	gelbes bis gelbbraunes, poröses, äolisches Staubsediment
Lößlehm	in den obersten Zonen entkalkter (=verlehmteter) Löß
Lydit	paläozoisches Kiesel sediment
Lysimeter	Vorrichtung zur Erfassung des Sickerwassers für Meß- und Untersuchungszwecke
Magma	Masse teilweise oder vollkommen geschmolzener Silikate mit gelösten Gasen, die aus der Tiefe empordringen
Magnesium	zweiwertiges metallisches Element der 2. Hauptgruppe des Periodensystems (Mg^{2+})
Malm	stratigraphische Bezeichnung (Abteilung im Jura; "Weißer Jura")
Malmtafel	Syn.: Jurahochfläche
Mangan	metallisches Element mit verschiedenen Wertigkeiten (meist II-, IV- und VII-wertig) der 7. Nebengruppe des Periodensystems (z. B. Mn^{2+})
Massenfazies	massige Ausbildung von Gesteinen
Mächtigkeit	Dicke eines Gesteinspaketes bzw. eines grundwassererfüllten Körpers etc.
Mergel	Sedimentgestein, Gemenge aus Ton und Kalk
Mesozoikum	stratigraphische Bezeichnung, Zeitalter (Adjektiv: Mesozoisch)
Mineralisation	Gehalt an gelösten Stoffen, → Lösungsfracht

Mineralwasser	natürlich reines, aus unterirdischen Wasservorkommen stammendes, natürlich zutretendes oder künstlich erschlossenes Grundwasser, das aufgrund seines Gehaltes an Mineralstoffen, Spurenelementen oder sonstigen Bestandteilen bestimmte ernährungsphysiologische Wirkungen aufweist
Mischwasser	hier: Wasser aus verschiedenen GwLeitern
MQ	Arithmetischer Mittelwert der Abflüsse einer Zeitspanne [l/s, m ³ /s]
MNQ	Arithmetischer Mittelwert der Abfluß-Niedrigstwerte verschiedener Abflußjahre eines bestimmten Meßzeitraums [l/s, m ³ /s]
Molassebecken	hier: Großes Sedimentationsbecken des Tertiärs nördlich der Alpen
MoMNQ	Arithmetischer Mittelwert der monatlichen Abfluß-Niedrigstwerte verschiedener Abflußjahre eines bestimmten Meßzeitraums [l/s, m ³ /s]
MoMNq	Arithmetischer Mittelwert der monatlichen niedrigsten Abflußspenden verschiedener Abflußjahre eines bestimmten Meßzeitraums [l/(s*km ²)]
MoNQ	monatlicher Niedrigstabfluß [l/s, m ³ /s]
Morphologie	hier im allgemeinen: Oberflächengestalt
Muldenachse	längs des Muldenscheitels verlaufende gedachte Linie, um welche die Krümmung erfolgt zu sein scheint
Muschelkalk	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung in der Trias
Natrium	einwertiges metallisches Element der 1. Hauptgruppe des Periodensystems, Alkalimetall (Na ⁺)
Naturräume	Gebiete mit gleichartigen ökologischen Ausstattungen
Niederschlag	aus der Atmosphäre in flüssiger oder fester Form ausgeschiedenes Wasser
Niedrigwasserabfluß (NQ)	niedrigster Wert der Abflüsse in einer Zeitspanne [l/s, m ³ /s]
Nitrat	einwertiges Anion (NO ₃ ⁻), → Nitrate
Nitrate	Salze der Salpetersäure
Nitrit	einwertiges Anion (NO ₂ ⁻), → Nitrite
Nitrite	Salze der Salpetrigen Säure
Numismalis-Schichten	Schichtbezeichnung im Lias
Oberkreide	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung in der Kreide
Oberflächenabfluß	Teil des Abflusses, der dem Vorfluter als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis (Niederschlag oder Schneeschmelze) über die Bodenoberfläche unmittelbar zugeflossen ist
Ocker	derbe und dichte, zellig-poröse, erdige Ausbildung von Limonit
Oligozän	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung im Tertiär
Ooid	kugelförmiger Körper (Ø ≤ 2mm), bei dem sich um ein Fremdteilchen konzentrische Schalen abgeschieden haben (Gestein: Oolith)
Oolith	aus Ooiden zusammengesetztes Gestein
Opalinuston	Schichtbezeichnung im Dogger

Ornatenton	Schichtbezeichnung im Dogger
Paläorelief	Relief eines Gebietes in geologisch vergangener Zeit
Pegel	Einrichtung zum Messen des Wasserstandes oberirdischer Gewässer
pelitisch	feinklastisch (feinkörniges Trümmergestein)
perennierend	ganzjährig schüttend
periglazial	eisfreie Gebiete, die sich in Nachbarschaft zu Inlandseismassen und Gletschern befinden
Permeabilität	Durchlässigkeit von Gesteinen für Flüssigkeiten oder Gase
Petrographie	Gesteinskunde
Phosphate	Salze der Orthophosphorsäure PO_4^{3-}
Phosphorit	Sammelbezeichnung für sedimentäre kryptokristalline Apatit-Varietäten in erdiger, zelliger, traubig-nieriger, kugelig-knolliger oder krustenartiger Ausbildung
pH-Wert	negativer dekadischer Logarithmus der H^+ -Konzentration, Maßzahl zur Kennzeichnung der Reaktion eines Wassers
Piper-Diagramm	Kombination von Dreieck- und Viereck-Diagrammen zur Charakterisierung und Typisierung von Wässern
Plattenkalk	Faziesbeschreibung eines Kalksteins (plattig-bankige Ausbildung)
Plattentektonik	Theorie zur Entstehung der Kontinente
Plausibilitäts-Test	Test zur Überprüfung der Glaubwürdigkeit von gesammelten Daten
Pleistozän	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung im Quartär
Pliozän	stratigraphische Bezeichnung, Abteilung im Tertiär
Posidonienschichten	hier: Schichtbezeichnung im Lias
Pufferungsvermögen	Fähigkeit auf die Zufuhr von Säuren oder Basen nur mit geringen pH-Wert-Änderungen zu reagieren
Pumpversuch	zeitlich begrenzte Entnahme von Grundwasser aus einem oder mehreren Brunnen, zur Bestimmung geohydraulischer Kenngrößen und entnahmebedingter Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit
Quartär	stratigraphische Bezeichnung, Formation im Känozoikum
Quarzsandstein	kieselig gebundener Sandstein
Quellfassung	Erschließungsmaßnahme, um Quellwasser einer Nutzung zuzuführen
Quellhorizont	horizontgebundenes Austreten von Quellen
Quelltopf	in eine topfartige Hohlform austretende Karstquelle
Quellweiher	in einen Weiher austretende Karstquelle (ähnlich Quelltopf)
radiometrisches Alter	mit physikalischen Methoden erstellte Altersbestimmung
Reduktion	Gegenprozeß der Oxidation; Zufuhr von Elektronen

Residual...	z. B. Residualschluff, Residualton; nicht verwitterbares oder auslaugbares Material (Syn.: Rückstands...)
resistente Gesteine	gegen Verwitterung widerstandsfähige Gesteine
Retention	hier: Abflußhemmung und -verzögerung (Syn.: Rückhalt)
rezent	Bezeichnung für Lebewesen oder Bildungen der Gegenwart
Rhät	stratigraphische Bezeichnung; Stufe in der Abteilung Keuper (Syn.: Oberer Keuper)
Rhätolias	Übergangsbereich vom Rhät zum Lias; stratigraphische Bezeichnung (Syn.: Rhätlias)
rheinisch	NNE-SSW-gerichtet; (nach dem Verlauf des Rheintales zwischen Basel und Mainz bezeichnet)
Riffazies	aus Riffen aufgebautes Gestein
Rotlehm	rotgefärbter, plastischer, tropischer Boden mit dichtem "Lehm"-gefüge; aus Silikatgesteinen in feuchtwarmen Klima entstanden
Ruhewasserspiegel	bei Brunnen: Unbeanspruchte GwOberfläche → GwSpiegel
Rumpffläche	durch Verwitterung und Abtragung in Zeiten tektonischer Ruhe entstandene, mehr oder weniger ausdruckslose wellige Ebene (Syn.: Fastebene)
Rückhaltevermögen	Fähigkeit zur Abflußhemmung; → Retention
Sandsteinkeuper	stratigraphische zusammenfassende Einheit von Schichten des Mittleren Keupers
Sattelkern	das Innere eines Sattels
Sauerstoffdefizit	Fehlbetrag zwischen Sauerstoffsättigungskonzentration und aktueller Sauerstoffmassenkonzentration für die bei der Messung herrschenden Bedingungen
Sauerstoffsättigung	Höchstmenge des gelösten Sauerstoffs, die im Wasser bei Gleichgewicht zwischen Luftsauerstoff und im Wasser gelösten Sauerstoff in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und gelösten Stoffen enthalten sein kann [mg/l]
Sauerstoffsättigungsindex	Anteil der aktuellen Sauerstoffmassenkonzentration an der Sauerstoffsättigungskonzentration für die bei der Messung herrschenden Bedingungen [%]
saxonisch	Bezeichnung für alle tektonischen Vorgänge, die im Bereich der deutschen Mittelgebirge im Mesozoikum und Känozoikum erfolgten
Schicht	tafel- oder plattenförmiger Gesteinskörper dessen Dicke gegenüber seiner horizontalen Ausdehnung gering ist
Schichtfazies	tafelige und plattenförmige Ausbildung der Gesteine
Schichtfuge	bei Sedimentgesteinen Trennfläche zwischen den Schichten
Schichtlagerungskarte	geologische Karte, in der die Lagerungsverhältnisse ausgewählter Schichten dargestellt sind
Schichtquelle	Quelle, die an der Grenze durchlässiger gegen unterlagernde, weniger durchlässige Schichten austritt

Schichtstufe	Landstufe; Ergebnis der abtragenden Kräfte in schwach geneigten Schichten verschiedener Widerständigkeit (gegen Erosion)
Schieferton	Tongestein mit "schiefriger Textur"
Schill	Anhäufung von vollständigen oder zerbrochenen Brachiopoden- und Molluskengehäusen bzw. isolierten Klappen
Schluff	Mineralkörnchen von 0,002-0,06 mm Durchmesser
Schmitze	geringmächtige, schnell auskeilende Zwischenschicht
Schotterfluren	von fließendem Wasser gebildete, weitflächige, grobe Geröllablagerungen
Schüttung	Abfluß (einer Quelle) [l/s, m³/s]
Schwammrasen	flächig wachsende Schwämme
Schwefelwasserstoff	farbloses, stark giftiges Gas, das ähnlich wie faule Eier riecht; H ₂ S
Sediment	Bezeichnung für die im Rahmen der Sedimentation abgelagerten oder ausgeschiedenen Gesteinsmassen
Seichter Karst	Ausstreichen der GwSohle über dem entsprechenden Talboden bzw. Erosionsniveau
Sickerwasser	unterirdisches Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft im Sickerraum (= Gesteinskörper, der zum Beobachtungszeitraum kein Wasser enthält) abwärts bewegt
Sinter	Mineralabsatz aus fließenden Gewässern, Überzüge oder Rinden bildend
Sohlental	Tal, bei dem die Talsohle deutlich gegen die Hänge abgesetzt ist
Sohlschicht	→ GwSohlschicht
Solifluktion	Syn.: Bodenfließen; → Fließerde
Spateisenerz	Syn.: Eisenspat, Siderit; FeCO ₃ , gesteinsbildendes Mineral
spezifische Ergiebigkeit	Verhältnis der Förderleistung zur Absenkung im Brunnen [l/(s*m)] (Syn.: spezifische Leistung)
Spurenelement	Elemente, die nur in Spuren vorkommen, aber im Naturhaushalt bereits in sehr geringen Konzentrationen eine wichtige Rolle spielen können
Stauquelle	Quellentyp, der auf schlecht durchlässige Einlagerungen im GwLeiter und/oder auf eine Verengung des Durchflußquerschnittes (Eintalung oder Verwerfung) zurückzuführen ist
Stichtagsbeprobung	Tag bzw. Zeitraum, an dem bzw. innerhalb dessen eine Beprobung durchgeführt wird
Störung	tektonischer Vorgang, der die ursprüngliche Lagerung verändert
Stratigraphie	Teilgebiet der Geologie, das sich mit der Aufeinanderfolge der Schichten und Formationen, ihrem Gesteins- und Fossilinhalt beschäftigt

Streichen	1. Richtung (Himmelsrichtung oder Gradangabe) der Horizontalen auf einer geneigten Fläche 2. im Text häufig "streicht aus"; → Ausstrich
Streichkurvenkarte	Isoliniendarstellung der Schichtlagerung eines Bezugshorizontes
Streichlinie	Linie die Punkte gleicher Höhenlage (m ü. NN) eines Bezugshorizontes verbindet
Subsurface-Abfluß	Abfluß im Bereich der Verwitterungsdecke
Sulfat	zweiwertiges Anion, SO_4^{2-}
Sulfate	Salze der Schwefelsäure, die entstehen, wenn eines oder beide H^+ -Ionen des H_2SO_4 -Moleküls durch Metallionen ersetzt werden
Sulfid	Verbindung aus Schwefel und stärker elektropositiven Stoffen (meist Metalle), die als Salze des Schwefelwasserstoffes aufgefaßt werden können
Tagesabfluß	Wassermenge, welche während eines Tages einen Abflußquerschnitt durchfließt
Tektonik	Lehre vom Bau der Erdkruste und den Bewegungen und Kräften, die sie erzeugt haben
Tertiär	stratigraphische Bezeichnung, Formation im Känozoikum
Tiefengrundwasser	Wasser tief gelegener GwLeiter, das in seiner Beschaffenheit in charakteristischer Weise (z. B. durch Ionenaustausch) verändert sowie sauerstoffarm und tritiumfrei ist und nur in geringem Maße am Wasserkreislauf teilnimmt (auch: "Tiefes Grundwasser" oder "Tiefenwasser")
Tiefenwasser	→ Tiefengrundwasser
Tiefer Karst	Abtauchen der GwSohle unter den entsprechenden Talboden bzw. Erosionsniveau
Ton	klastisches Lockergestein mit Korndurchmesser bis 0,02mm
Toneisenstein	Konkretionen und Lagen von Eisenkarbonat
Topographie	Beschreibung und Darstellung geographischer Örtlichkeiten
Tracer	Markierungsstoff
Tracer-Versuche	Versuch zur Ermittlung von GwFließrichtungen und -Geschwindigkeiten über eingegebene Tracer
Transmissivität	Integral des Durchlässigkeitsbeiwertes über die GwMächtigkeit [m^2/s]
Trockenwetterabfluß	Abfluß nach einer längeren Zeitspanne ohne Effektivniederschlag (= Teil des Gebietsniederschlags der als Direktabfluß wirksam wird), der nur aus grundwasserbürtigem Abfluß besteht (bzw. der den natürlichen ober- und unterirdischen Speicherräumen des Einzugsgebietes entstammt)
Tummler	episodisch schüttende Karstquelle, mit zeitweise sehr hoher Schüttung
Überschiebung	Erscheinungsbild und Vorgang einer tektonisch bedingten relativen Aufwärtsbewegung einer Gesteinsscholle über eine andere an einer flachen (<45°) Bewegungsbahn

Uferfiltrat	Wasser, das aus oberirdischen Gewässern unmittelbar in den Gw-Raum eingedrungen ist, ausgenommen durch Versickerung
ungesättigte Zone	Gestelnkörper der zum Beobachtungszeitpunkt nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist
Unterdükerung	hier: Unterströmung des Vorfluters
Unterkreide	Stratigraphische Bezeichnung, Abteilung in der Kreide
Varianz	1. Veränderlichkeit bei bestimmten Umformungen (hier: Zeitliche Veränderung der Lage) 2. math.: Die mittlere quadratische Abweichung einer zufälligen Veränderlichen von ihrem Mittelwert
variszisch	im Devon beginnender Gebirgsbildungsvorgang in Mitteleuropa
Verdriftung	hier: Transport des Tracers durch das Wasser im GwLeiter
Vergenz	Bezeichnung für die Kipprichtung geneigter Falten
Verkarstung	Vorgang der Entstehung von Karsterscheinungen
Verweildauer	Zeitspanne, in der sich ein bestimmtes Wasserteilchen in einem bestimmten Gewässerabschnitt befindet hier: Zeitspanne, die ein Wasser zwischen der Versickerung und der Förderung bzw. dem Zutagetreten im Untergrund verweilt (Syn.: Verweilzeit)
Verwerfung	Bruch, Sprung
Verwitterungsdecke	mehr oder weniger dicke Schicht aus verwittertem, noch nicht abtransportiertem Material
Vollanalyse	Bestimmung aller Hauptionen, so daß es möglich ist, eine Ionenbilanz zu erstellen
Vorflut	Möglichkeit des Wassers, mit natürlichem Gefälle oder durch künstliche Hebung abzufließen
Vorfluter	der Vorflut dienendes Gewässer
V-Tal	V-förmiges, durch Tiefenerosion entstandenes Tal ohne Talboden
Wasserhaushaltsgleichung	$N = A + V$ (Niederschlag = Abfluß + Verdunstung ; nur für längeren Zeitraum mit längeren Mittelwerten gültig) (Syn.: Wasserbilanz-Gleichung, hydrologische Grundgleichung)
Wasserscheide	Grenze zwischen Einzugsgebieten
Werkkalk	Schichtbezeichnung im unteren Malm: Wohlgeschichtete, dickbankige, weißgraue Kalkbänke, mit nur wenigen, geringmächtigen Mergellagen
Zeitreihe	Folge von Meßreihen über einen bestimmten Beobachtungszeitraum, (→ Jahresreihe)

Anhang 3: Stratigraphische Gliederung des Känozoikums und des Mesozoikums
(Alter in Mio. Jahren)

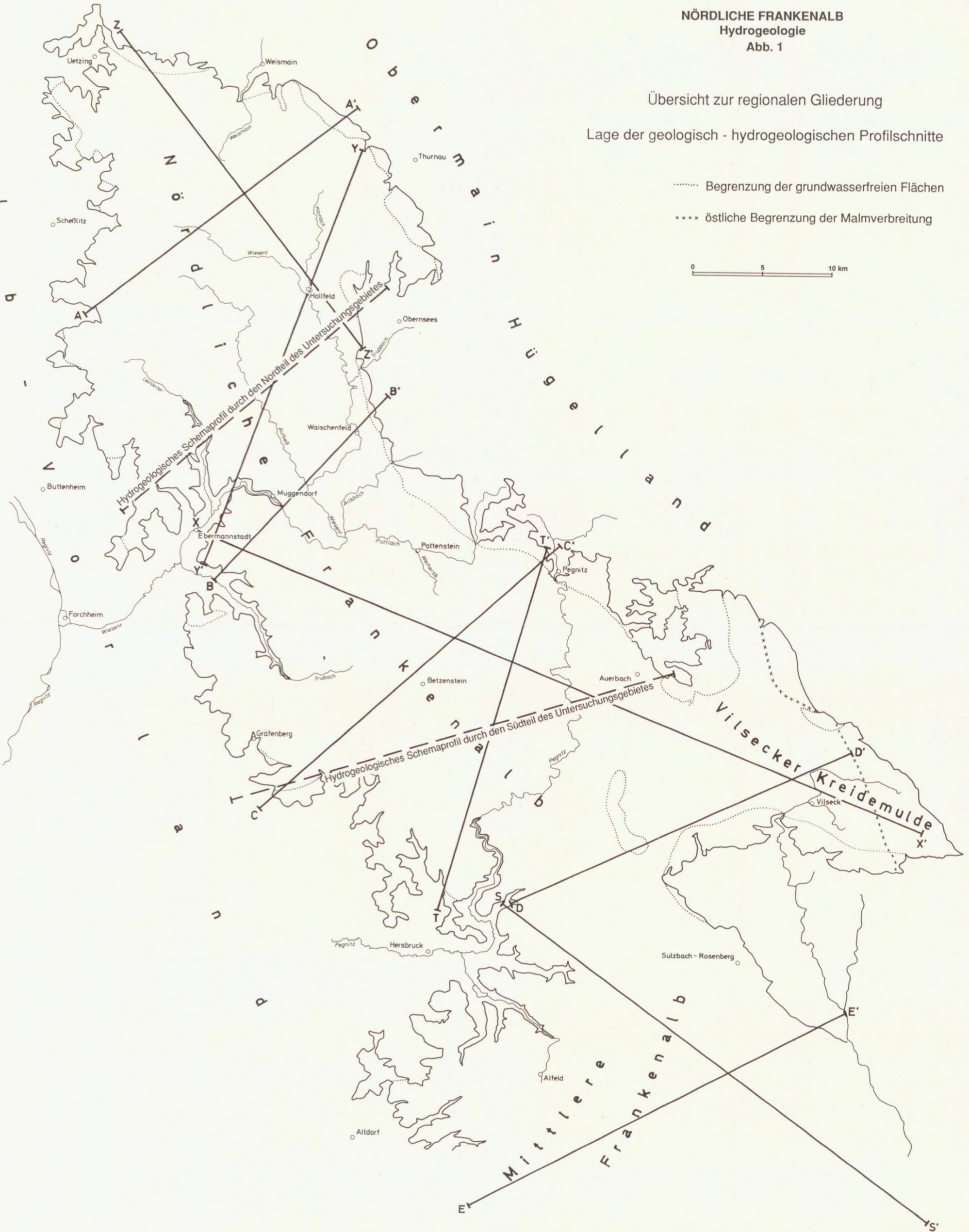
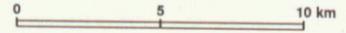
Zeitalter	System	Abteilung	Unterabteilungen und Stufen	erwähnte Schichtglieder	
Känozoikum	Quartär (0-1,7)		Holozän		
			Pleistozän		
	Tertiär (1,7-65)	Jungtertiär	Pliozän		
			Miozän		
		Alttertiär	Oligozän		
			Eozän		
	Paläozän				
Mesozoikum	Kreide (65-146)	Oberkreide	Maastricht	<p>Erzformation</p> <p>Schicht- u. Bankfazies Werkkalke</p> <p>Ornatenton</p> <p>Eisensandstein Opalinuston</p> <p>Posidonien-Schiefer Amaltheenton Numismalis-Schichten</p> <p>Rhätolias Feuerletten</p>	
			Campan		
			Santon		
			Coniac		
			Turon		
			Cenoman		
		Unterkreide	Berrias - Alb		
	Jura (146-208)	Malm	Zeta		Tithon
			Gamma-Epsilon		Kimmeridge
			Beta		
			Alpha		Oxford
		Dogger	Zeta		Callov
			Epsilon		Bathon
			Gamma-Delta		Bajoc
			Beta		Aalen
			Alpha		
		Lias	Zeta		Toarc
			Epsilon		
			Delta		
			Gamma		Pliensbach
Beta			Sinemur		
Alpha	Hettang				
Trias (208-245)	Keuper				
	Muschelkalk				
	Buntsandstein				

NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 1

Übersicht zur regionalen Gliederung

Lage der geologisch - hydrogeologischen Profilschnitte

- Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
- xxxx östliche Begrenzung der Malmverbreitung



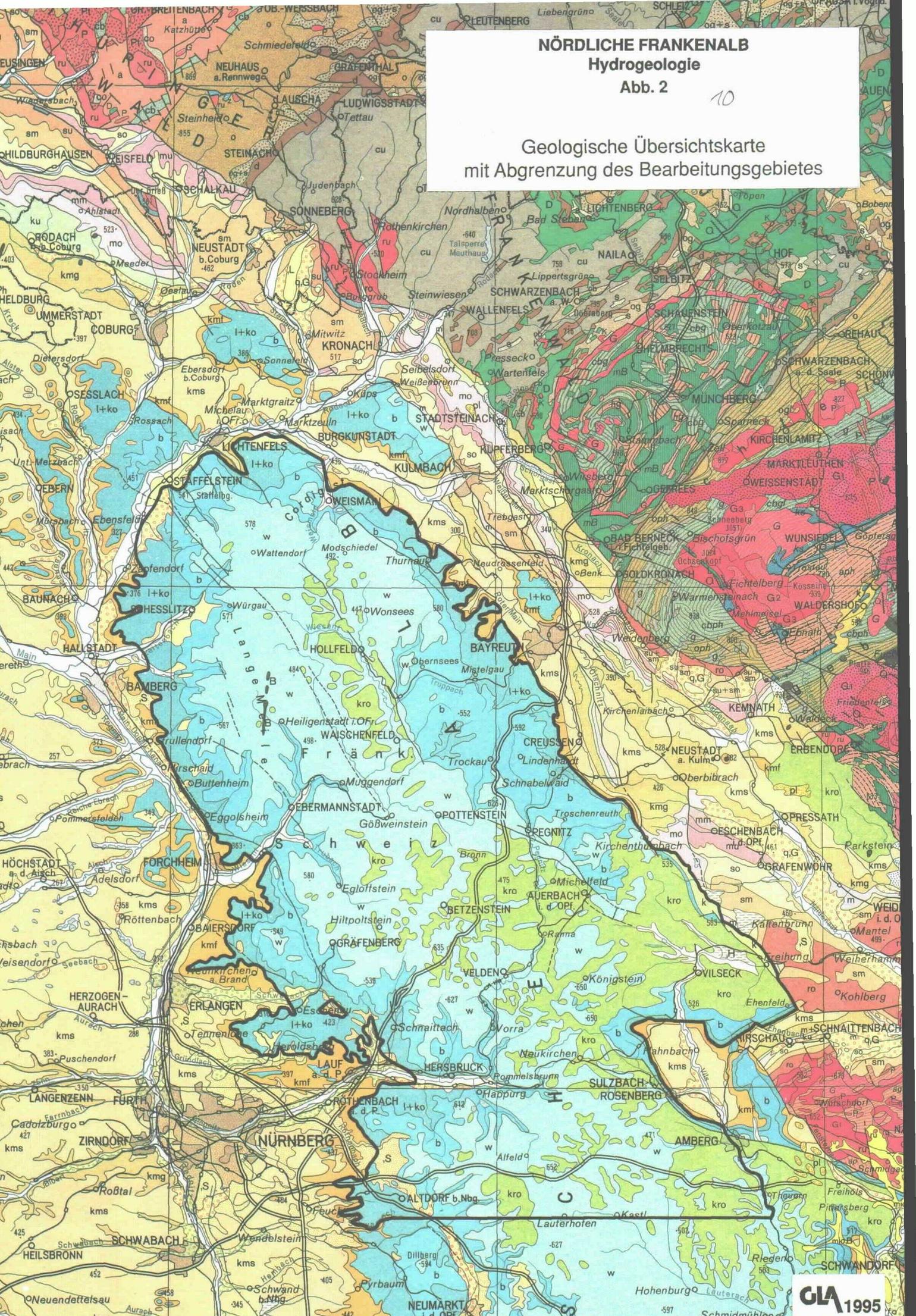
NÖRDLICHE FRANKENALB

Hydrogeologie

Abb. 2

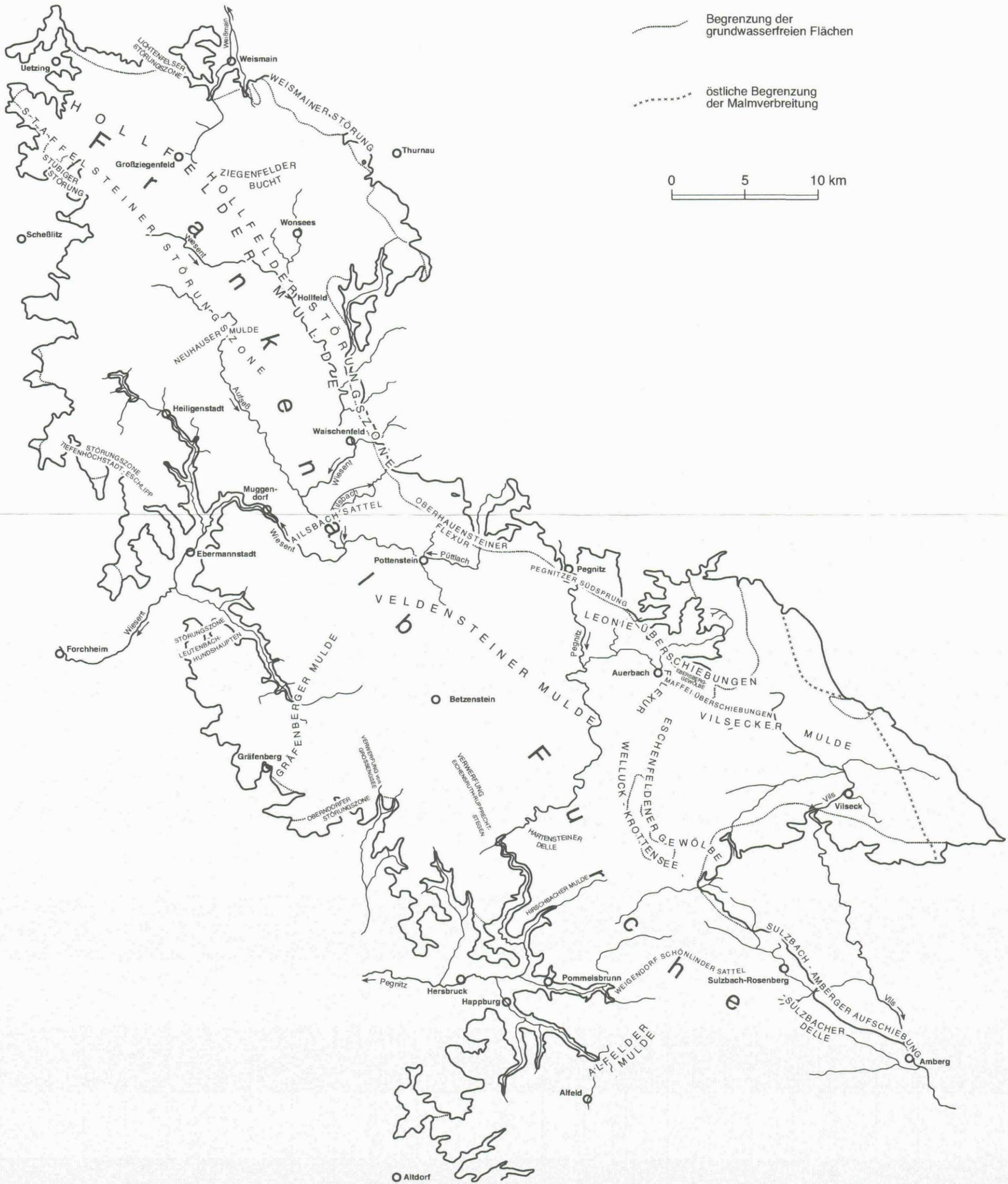
10

Geologische Übersichtskarte
mit Abgrenzung des Bearbeitungsgebietes



NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 3

Bezeichnung tektonischer Großstrukturen





Schichtlagerungskarte der Dogger/Malm-Grenze

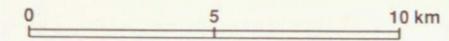
— Streichlinien, bezogen auf die Dogger/Malm - Grenze,
 in Meter über NN

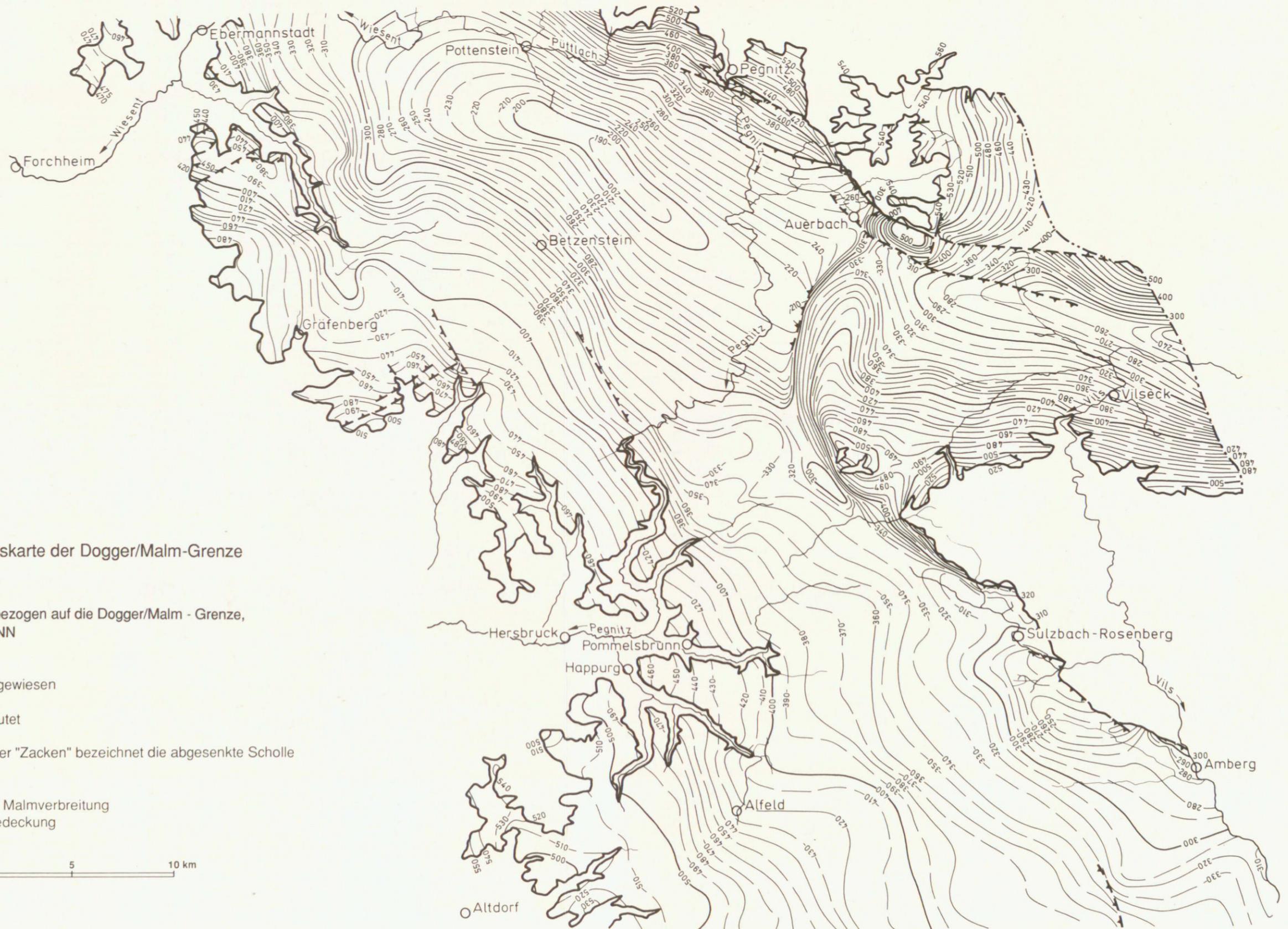
— Störung, nachgewiesen

- - - Störung, vermutet

die Richtung der "Zacken" bezeichnet die abgesenkte Scholle

- - - Ostgrenze der Malmverbreitung
 unter Kreidebedeckung





Schichtlagerungskarte der Dogger/Malm-Grenze

— Streichlinien, bezogen auf die Dogger/Malm - Grenze,
in Meter über NN

— Störung, nachgewiesen

— Störung, vermutet

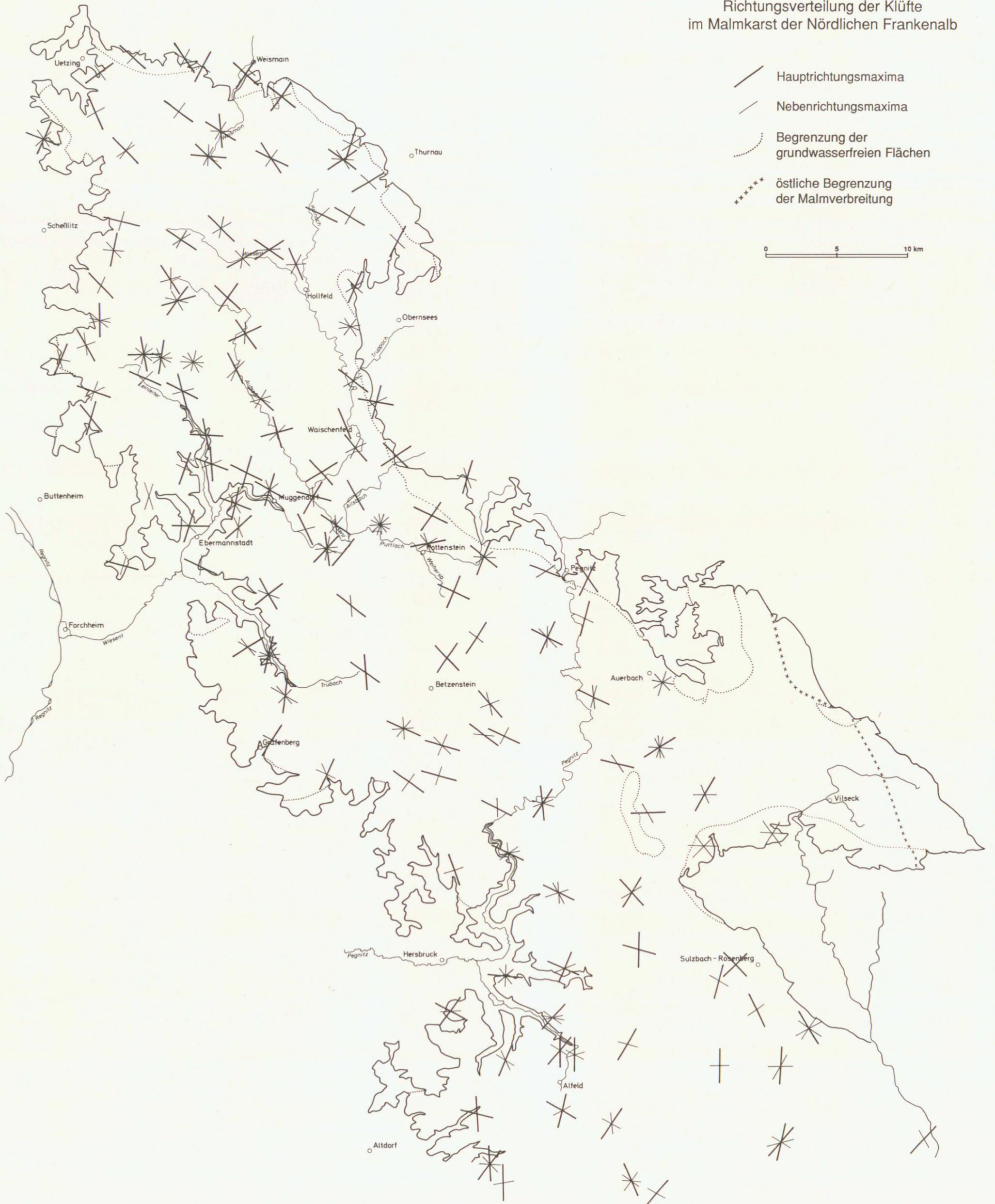
die Richtung der "Zacken" bezeichnet die abgesenkte Scholle

— Ostgrenze der Malmverbreitung
unter Kreidebedeckung

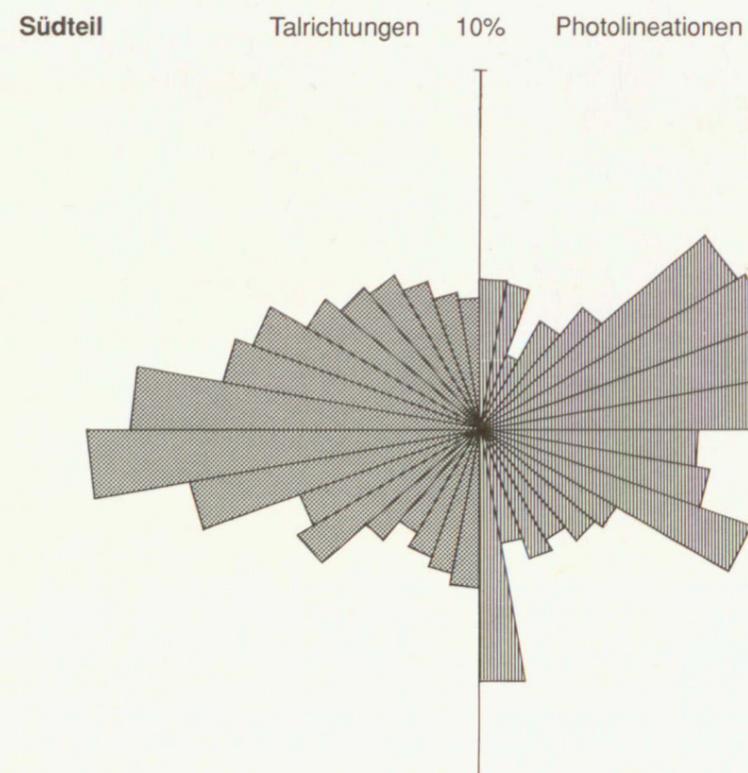
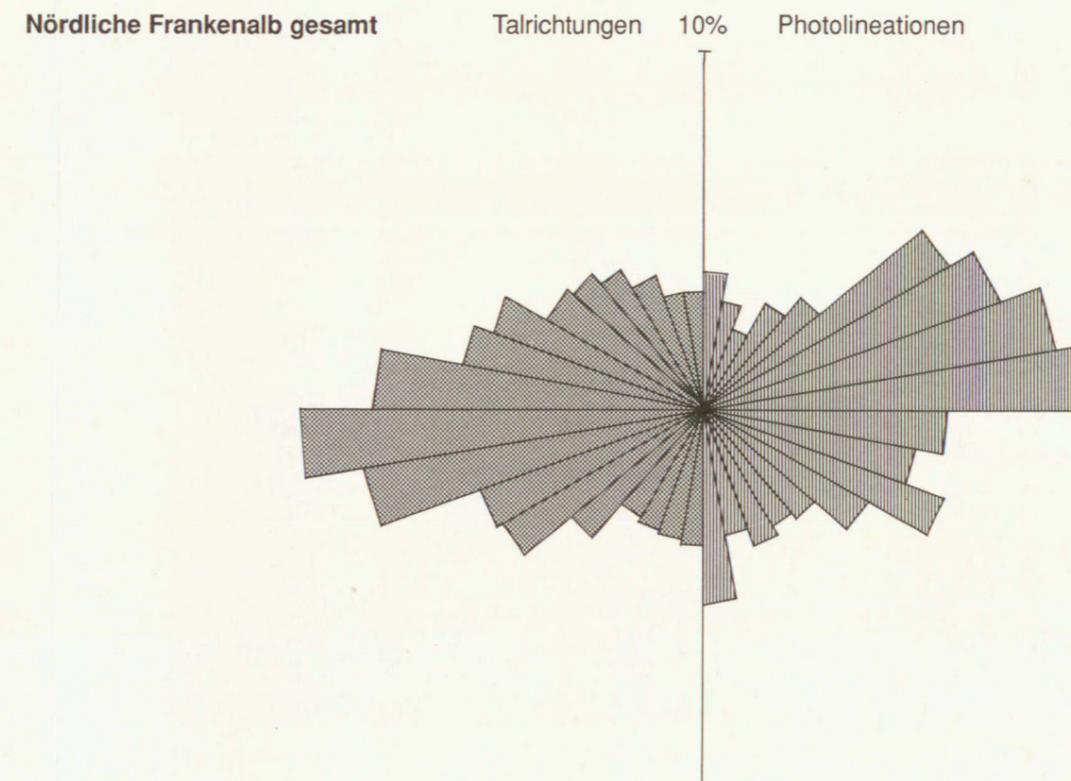
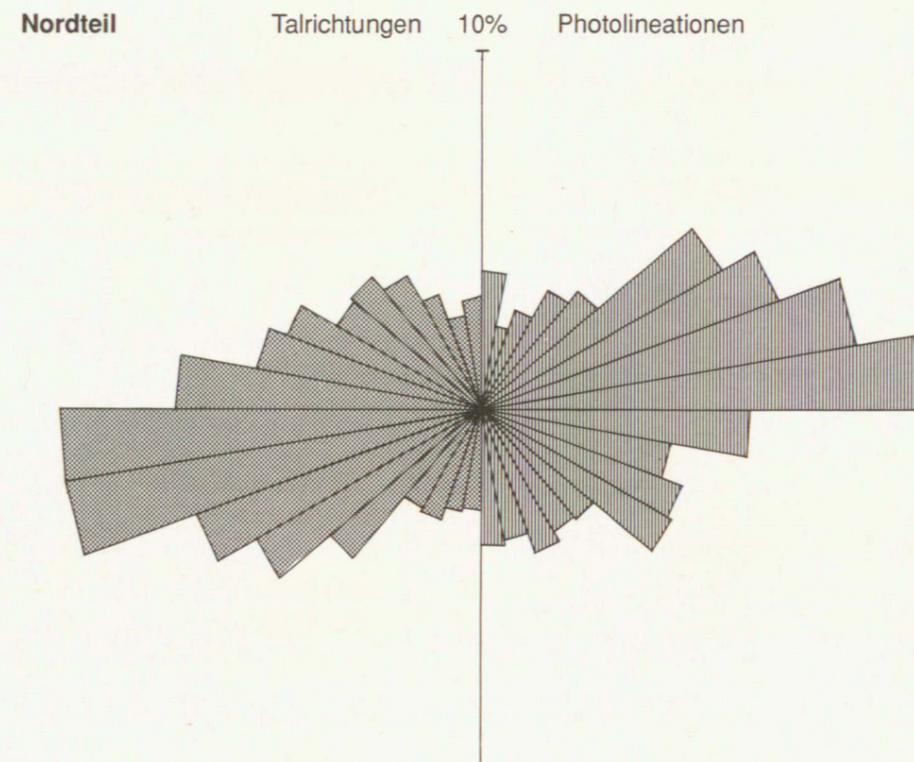
0 5 10 km

NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 5

Richtungsverteilung der Klüfte
im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb



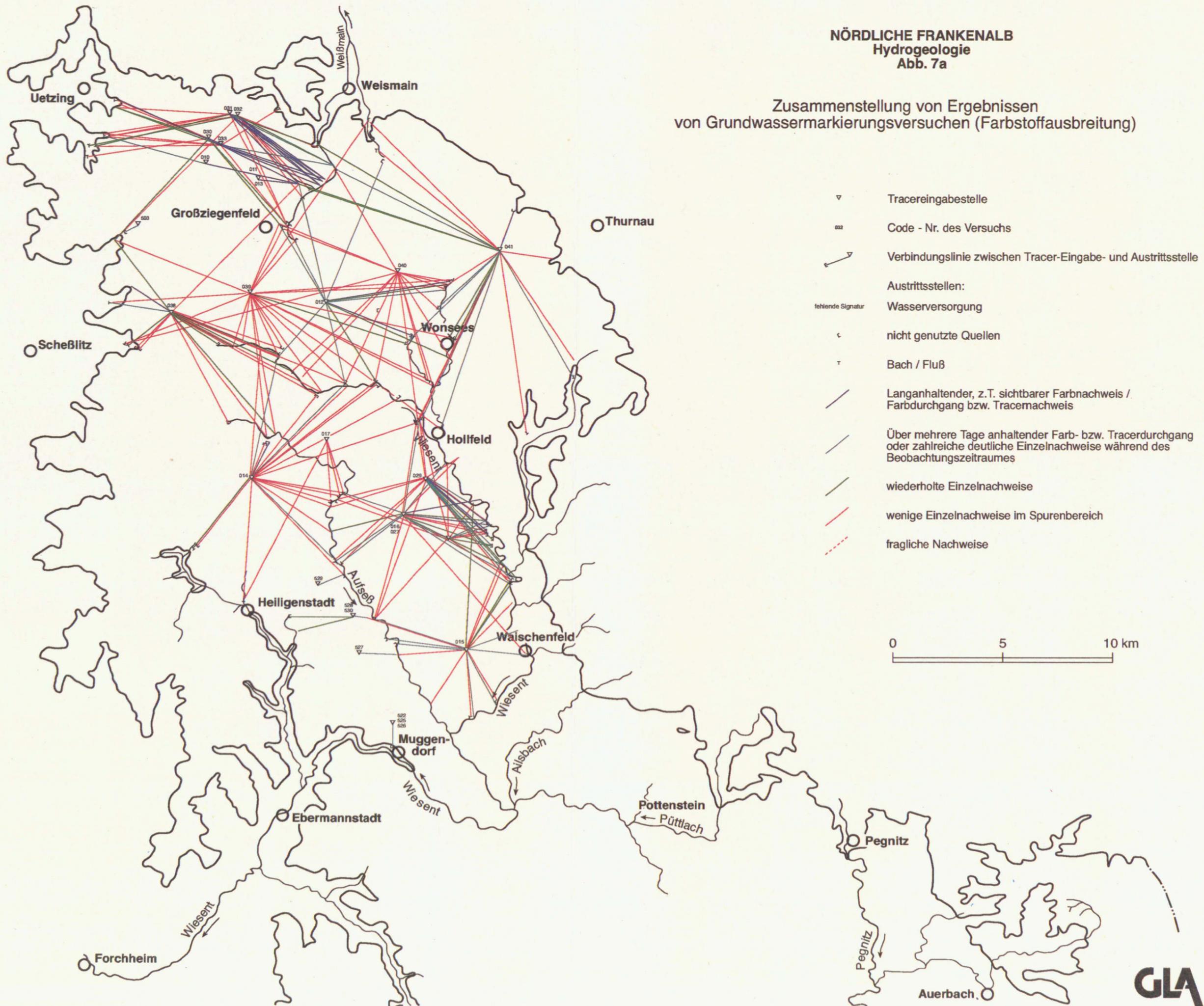
Vergleich von Kluft- und Talrichtungen (Summendarstellung)

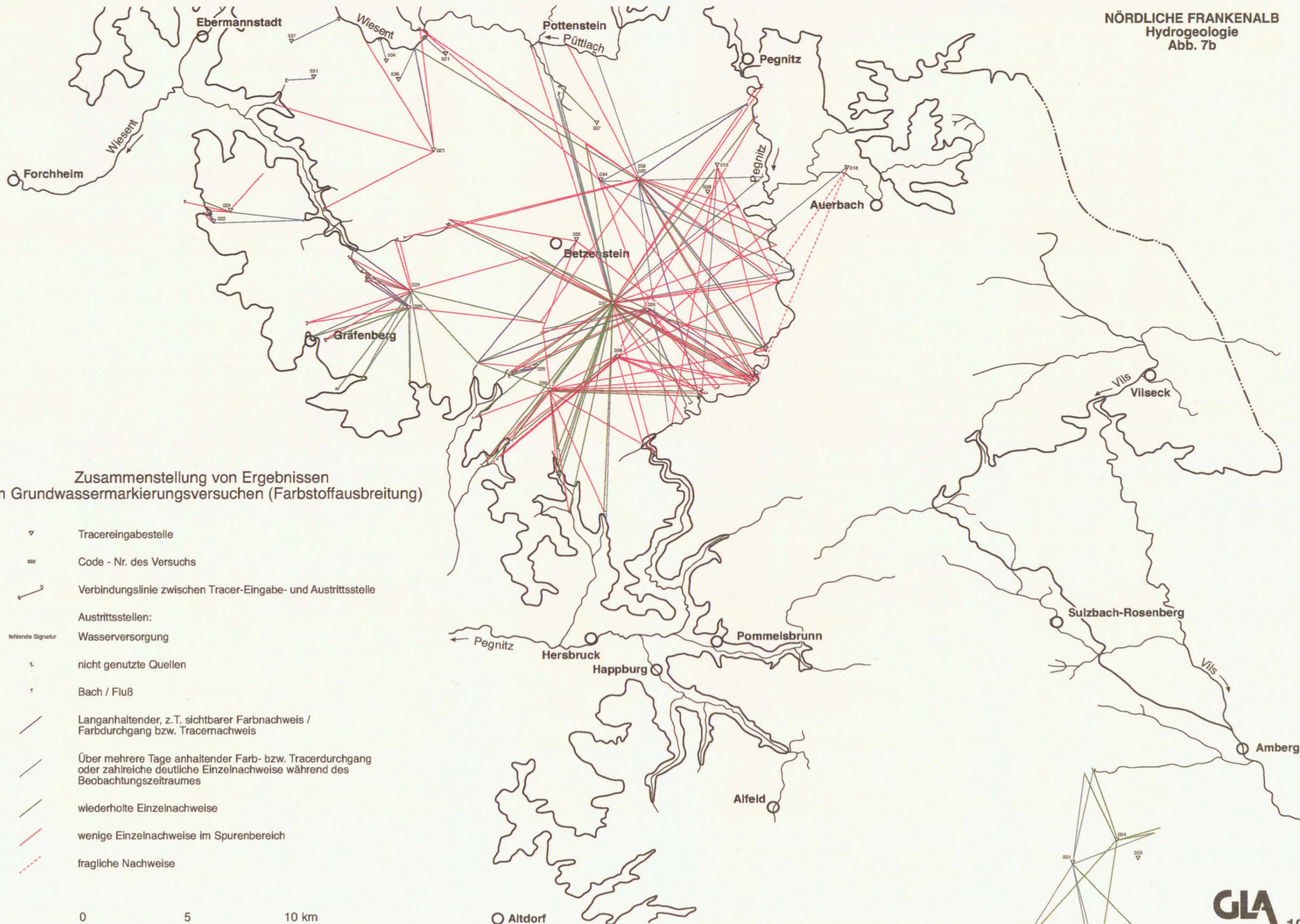


Gegenüberstellung in %								
Winkel (Grad)	Talrichtungen				Photolineationen			
	Nordteil	Südteil	Verhältnis Nordteil : Südteil (1 : 1)	bezogen auf die Gesamtlängen	Nordteil	Südteil	Verhältnis Nordteil : Südteil (1 : 1)	bezogen auf die Gesamtlängen
-10	3,0	4,4	3,7	3,8	3,6	4,2	3,9	3,9
-20	3,1	4,1	3,6	3,7	2,1	4,0	3,1	3,1
-30	3,5	3,8	3,7	3,6	2,6	2,2	2,4	2,4
-40	3,4	3,4	3,4	3,4	3,6	3,4	3,5	3,5
-50	5,5	4,1	4,8	4,7	4,1	4,3	4,2	4,2
-60	7,3	5,8	6,6	6,4	7,6	8,2	7,9	7,9
-70	8,4	5,3	6,9	6,6	8,8	8,5	8,7	8,7
-80	11,6	8,1	9,9	9,5	10,5	9,3	9,9	9,9
-90	11,6	10,8	11,2	11,1	12,1	9,4	10,8	10,7
-100	8,4	9,6	9,0	9,1	7,5	6,1	6,8	6,8
-110	6,3	7,1	6,7	6,8	5,3	6,6	6,0	6,0
-120	5,8	6,6	6,2	6,3	6,0	8,0	7,0	7,1
-130	4,6	5,5	5,1	5,1	6,2	4,4	5,3	5,2
-140	4,7	5,0	4,9	4,9	4,1	4,2	4,2	4,0
-150	4,2	4,8	4,5	4,5	4,0	3,6	3,8	3,8
-160	3,3	4,3	3,8	3,9	4,3	4,0	4,2	4,1
-170	2,6	3,8	3,2	3,3	3,8	3,3	3,6	3,5
-180	2,9	3,6	3,3	3,3	3,7	7,0	5,4	5,4

NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 7a

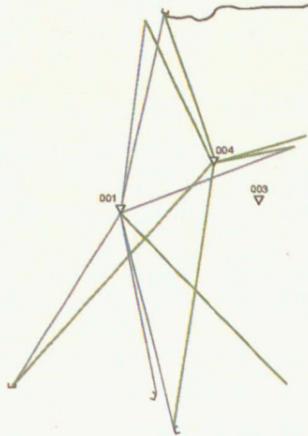
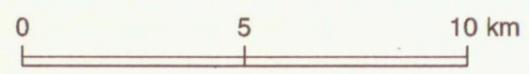
Zusammenstellung von Ergebnissen
 von Grundwassermarkierungsversuchen (Farbstoffausbreitung)





Zusammenstellung von Ergebnissen
von Grundwassermarkierungsversuchen (Farbstoffausbreitung)

- ▽ Tracereingabestelle
- 002 Code - Nr. des Versuchs
- ↔ Verbindungslinie zwischen Tracer-Eingabe- und Austrittsstelle
- Austrittsstellen:
 - ⊕ Wasserversorgung
 - ⊖ nicht genutzte Quellen
 - ⊗ Bach / Fluß
- Langanhaltender, z.T. sichtbarer Farbnachweis / Farbdurchgang bzw. Tracernachweis
- Über mehrere Tage anhaltender Farb- bzw. Tracerdurchgang oder zahlreiche deutliche Einzelnachweise während des Beobachtungszeitraumes
- wiederholte Einzelnachweise
- wenige Einzelnachweise im Spurenbereich
- - - fragliche Nachweise



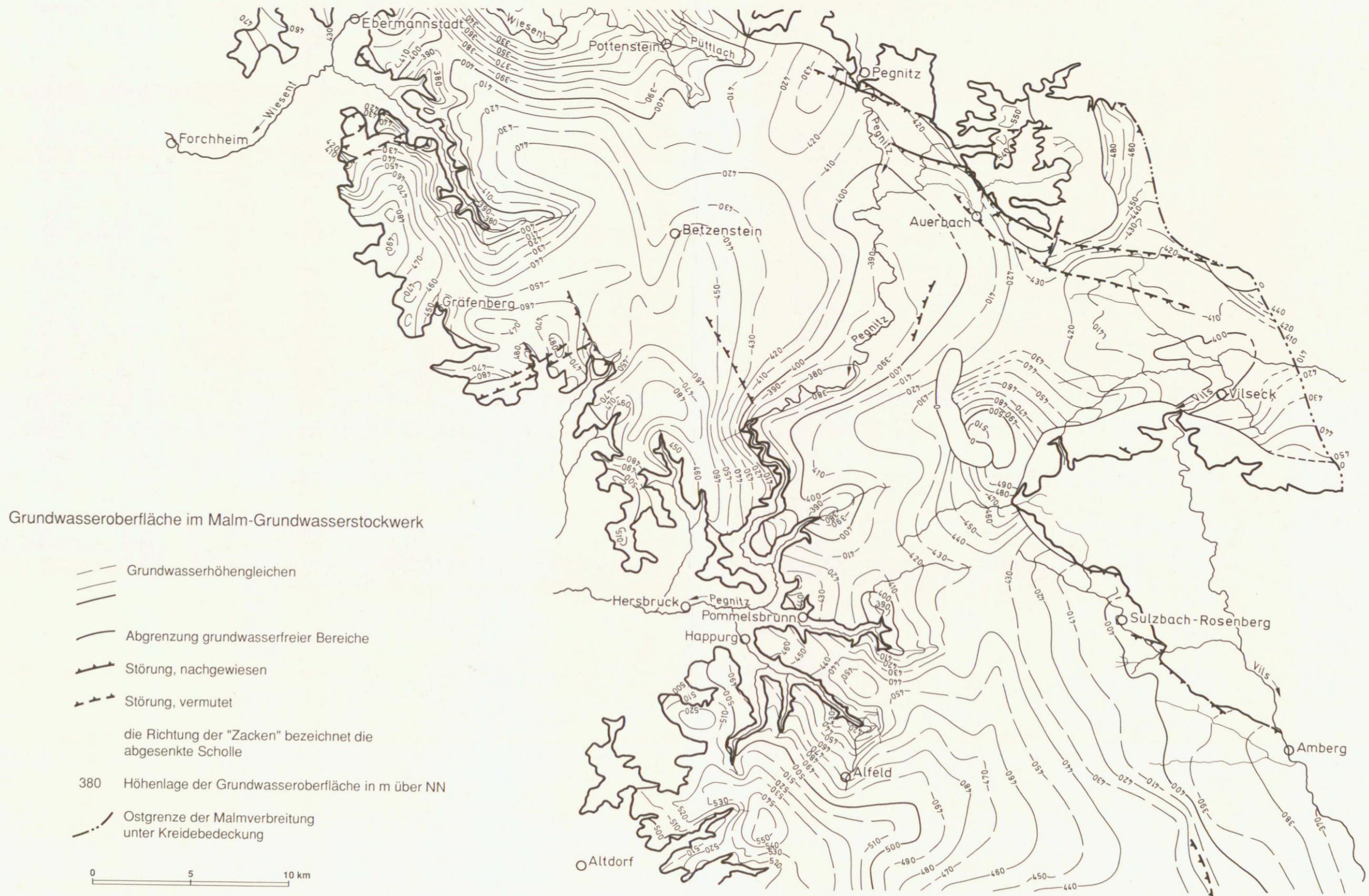
NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 8a

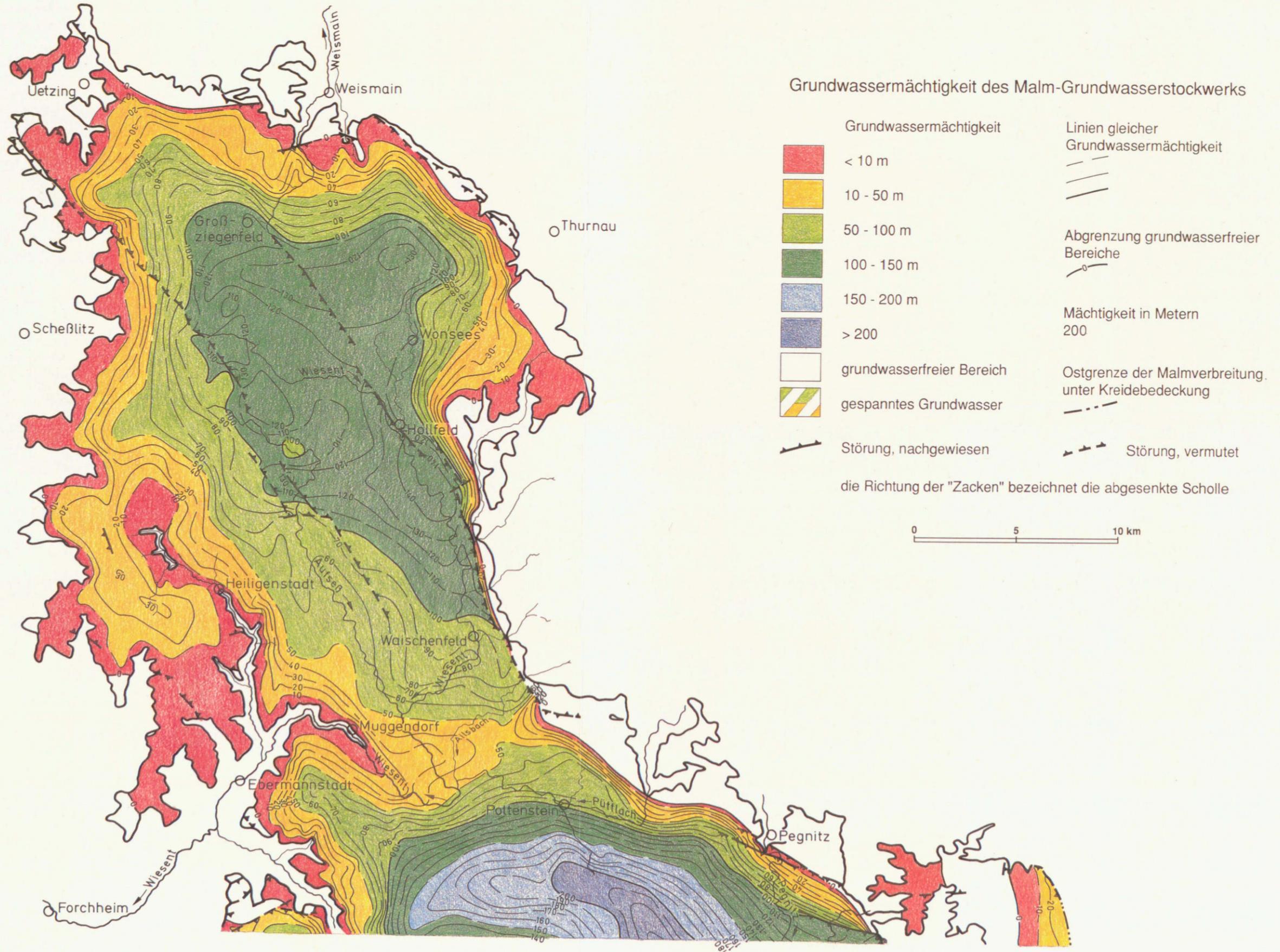


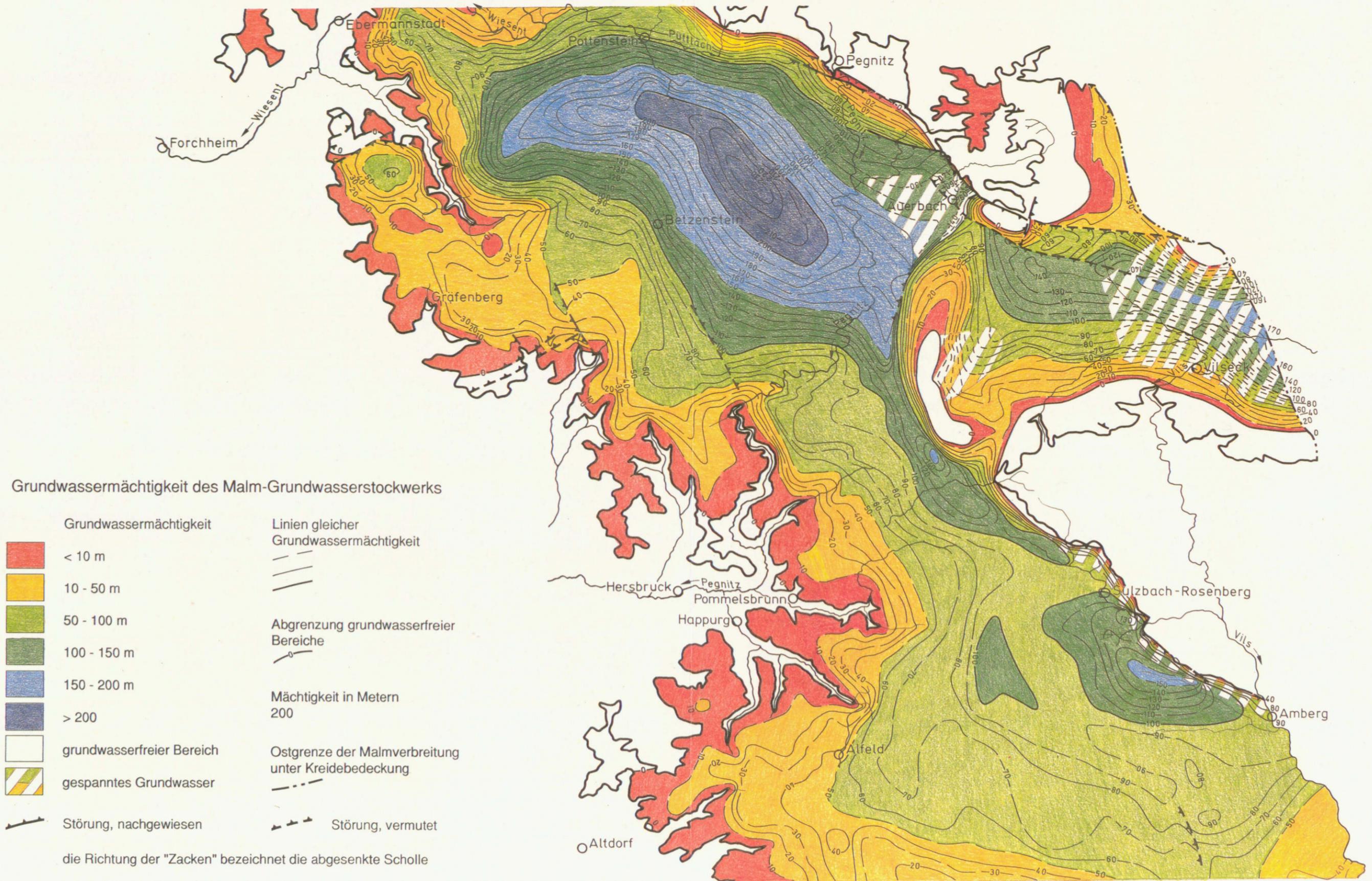
Grundwasseroberfläche im Malm-Grundwasserstockwerk

-  Grundwasserhöhengleichen
-  Abgrenzung grundwasserfreier Bereiche
-  Störung, nachgewiesen
-  Störung, vermutet
- die Richtung der "Zacken" bezeichnet die abgesenkte Scholle
- 380 Höhenlage der Grundwasseroberfläche in m über NN
-  Ostgrenze der Malmverbreitung unter Kreidebedeckung

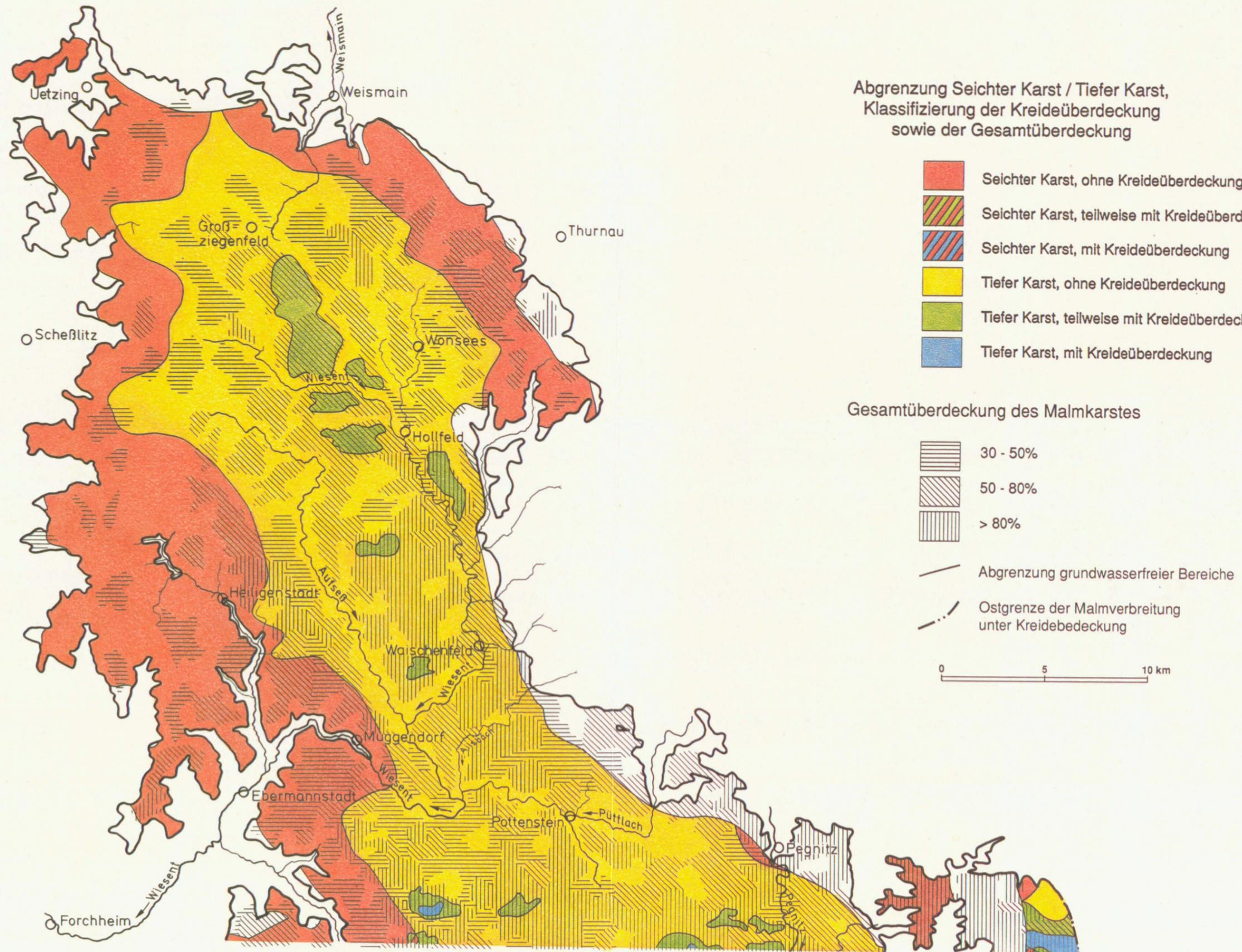
0 5 10 km

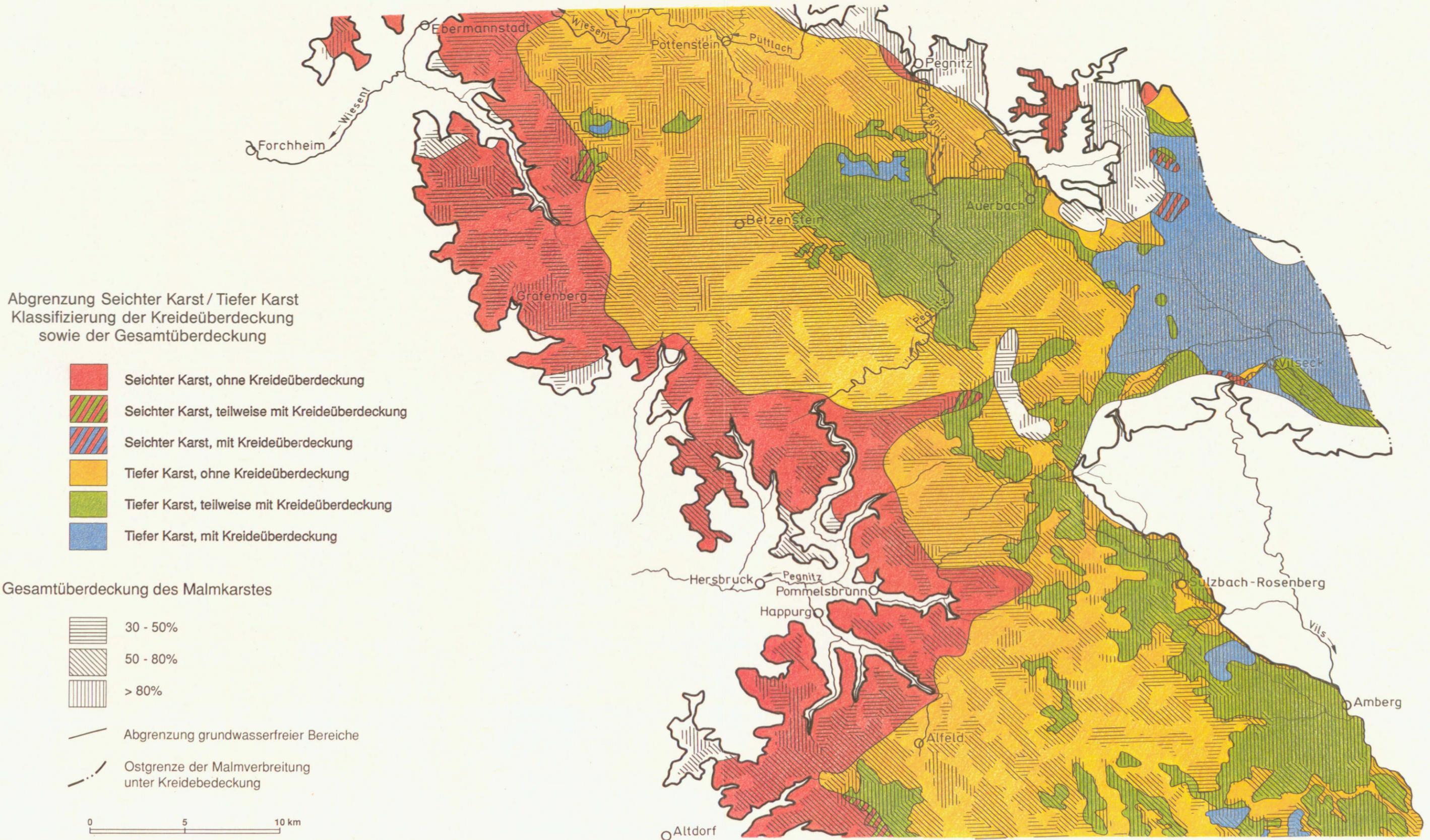




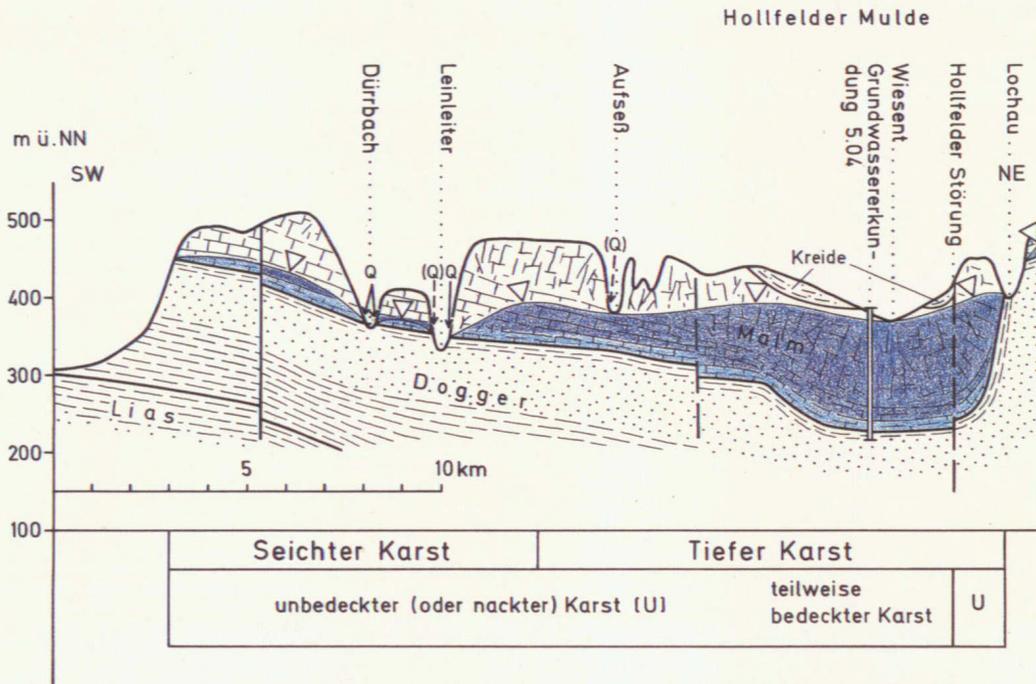


NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 10a

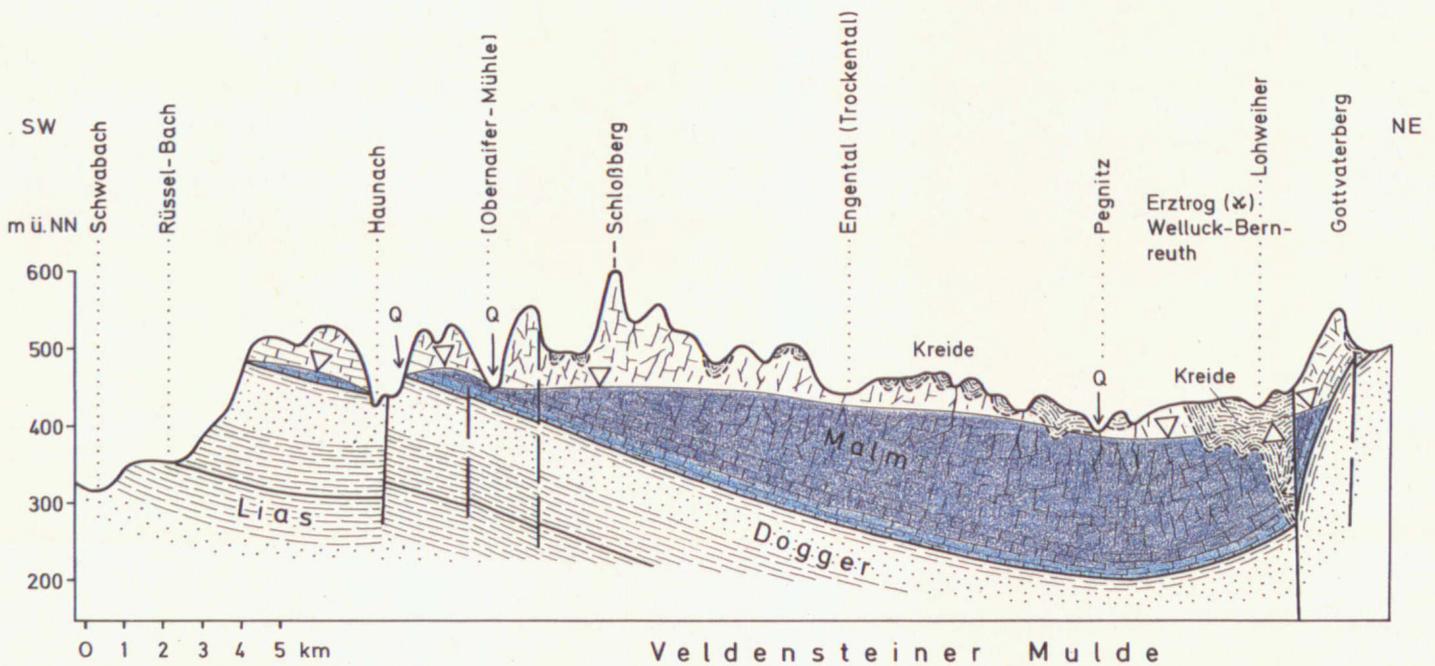




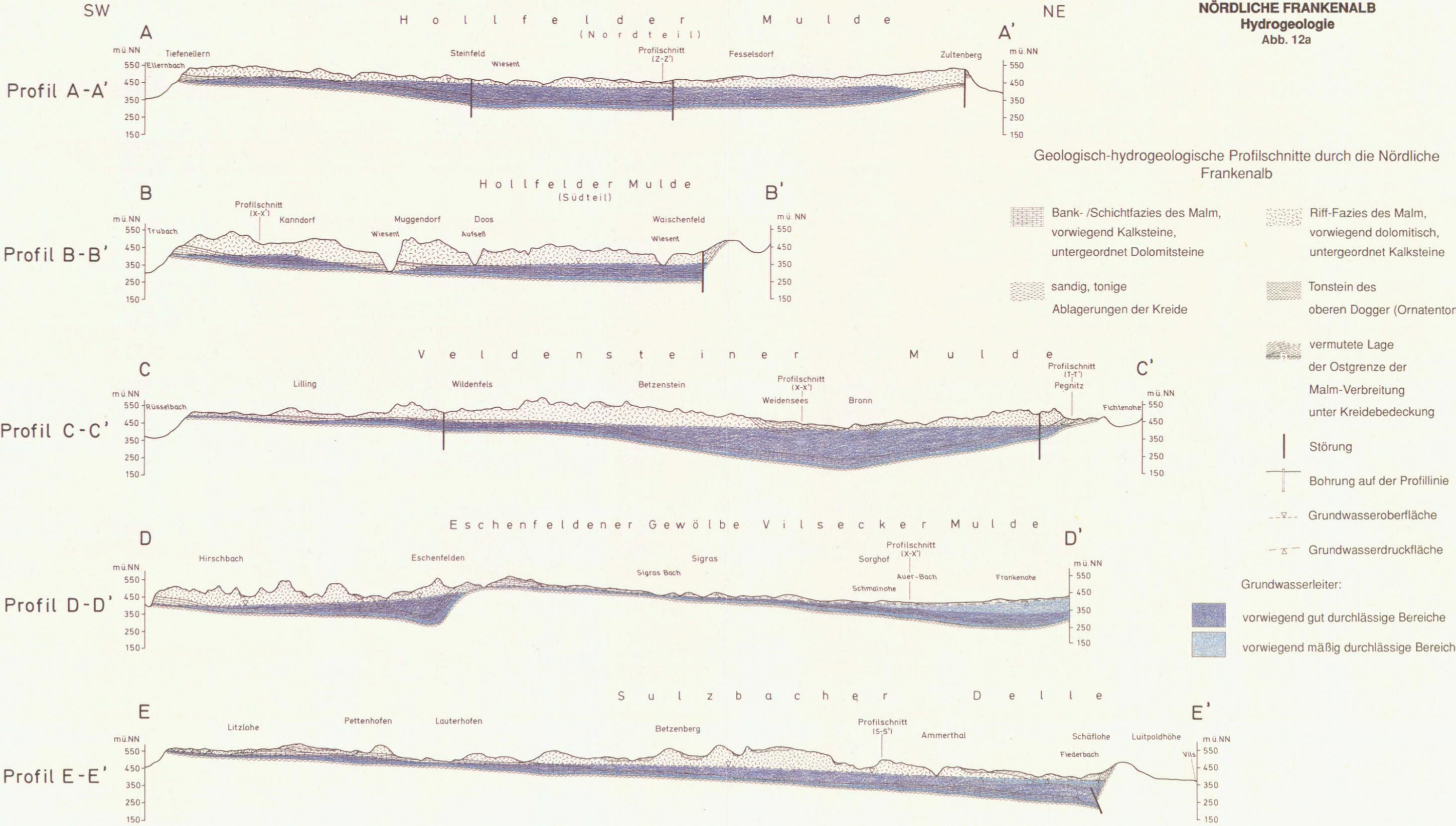
Hydrogeologische Schemaprofile durch die Nördliche Frankenalb

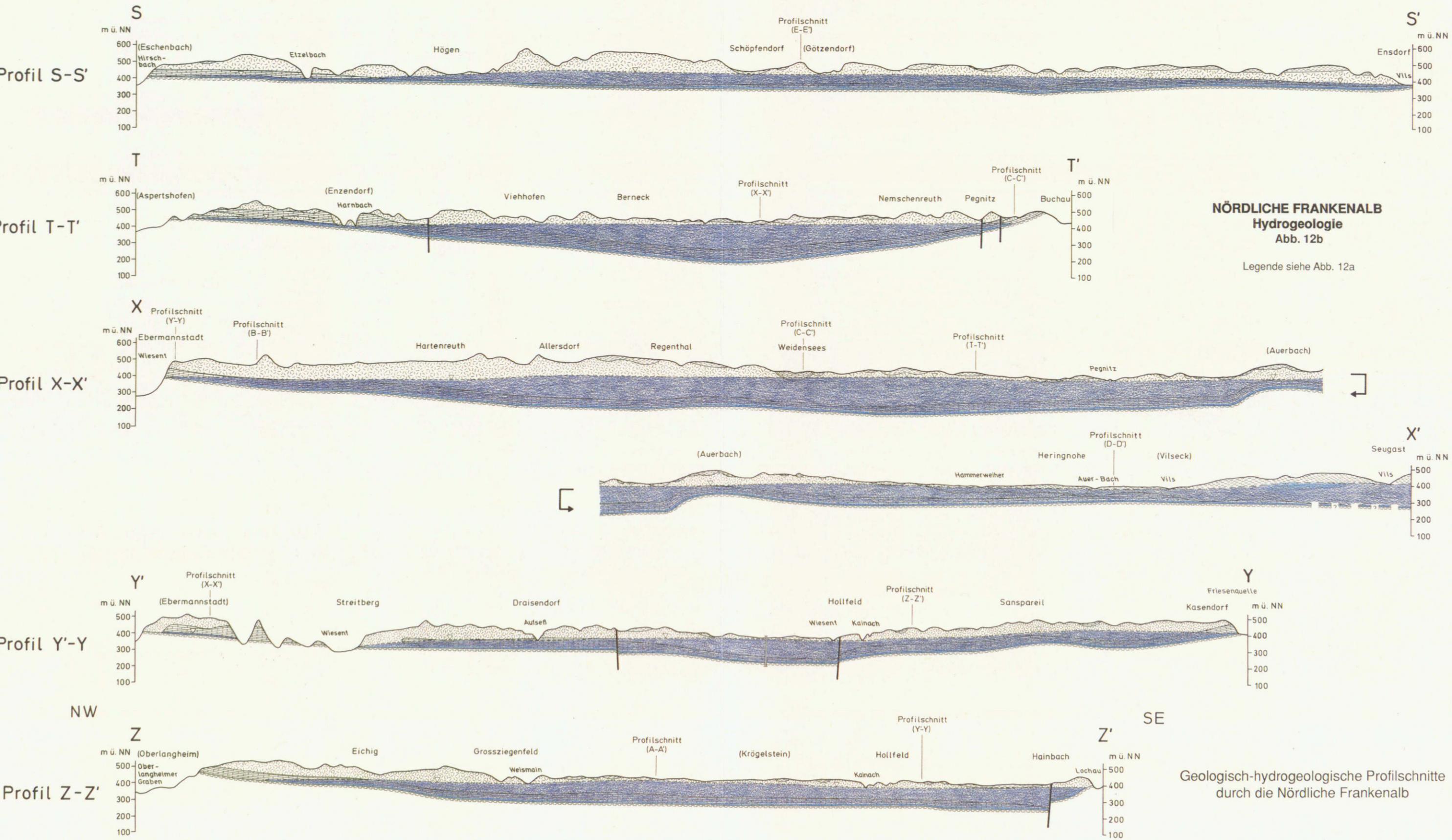


Hydrogeologisches Schemaprofil durch den Nordteil des Untersuchungsgebietes



Hydrogeologisches Schemaprofil durch den Südteil des Untersuchungsgebietes



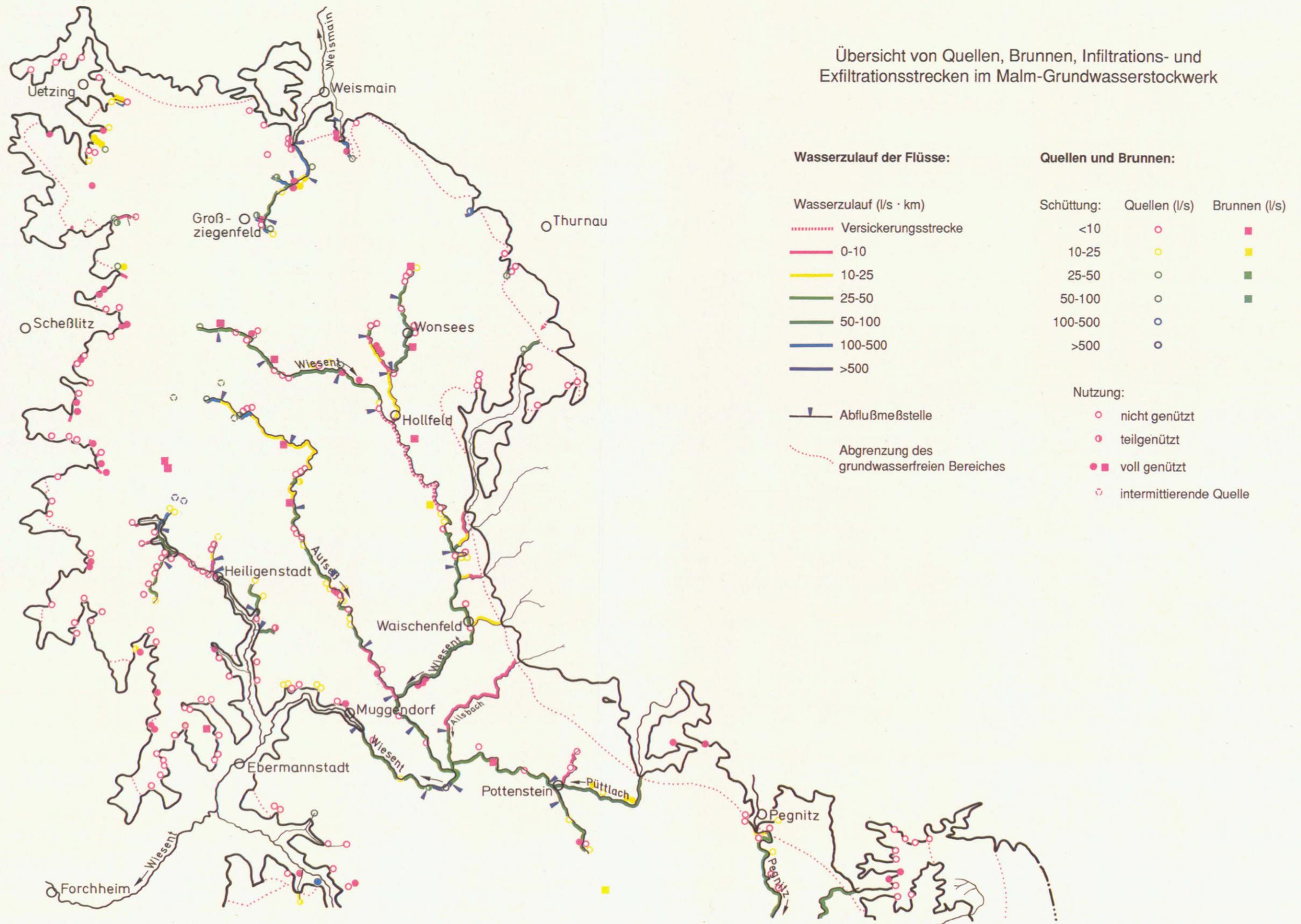


NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 12b

Legende siehe Abb. 12a

Geologisch-hydrogeologische Profilschnitte durch die Nördliche Frankenalb

Übersicht von Quellen, Brunnen, Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken im Malm-Grundwasserstockwerk

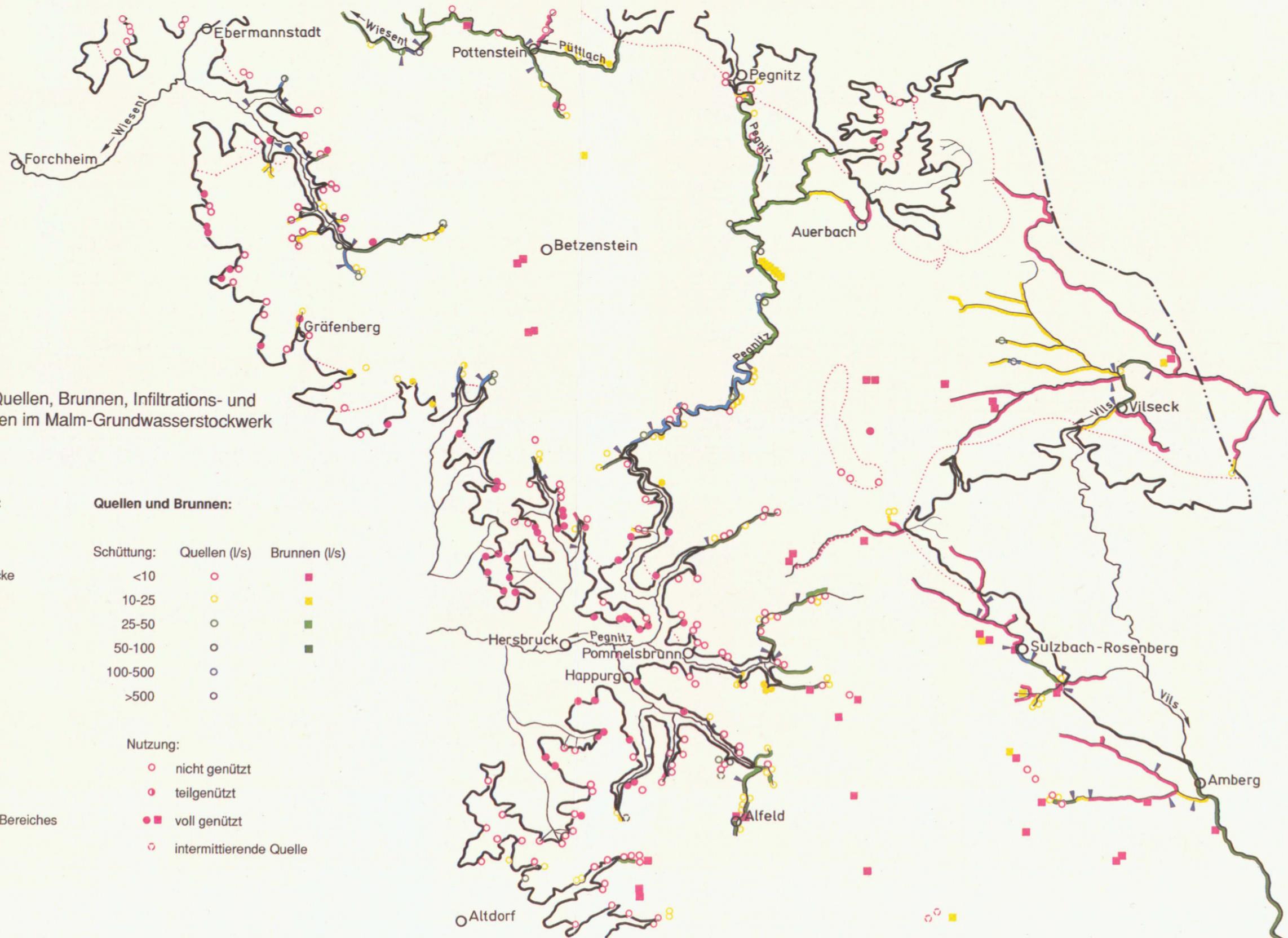
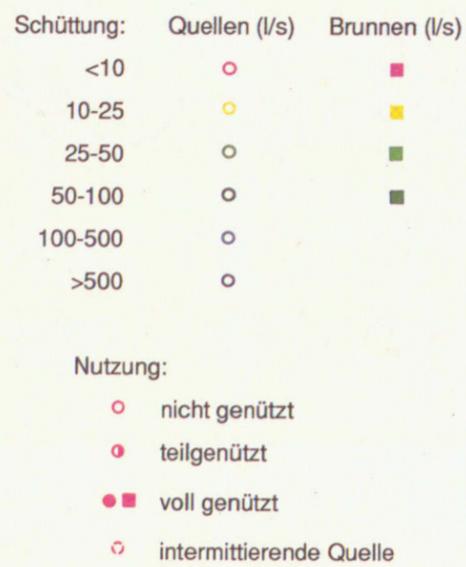


Übersicht von Quellen, Brunnen, Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken im Malm-Grundwasserstockwerk

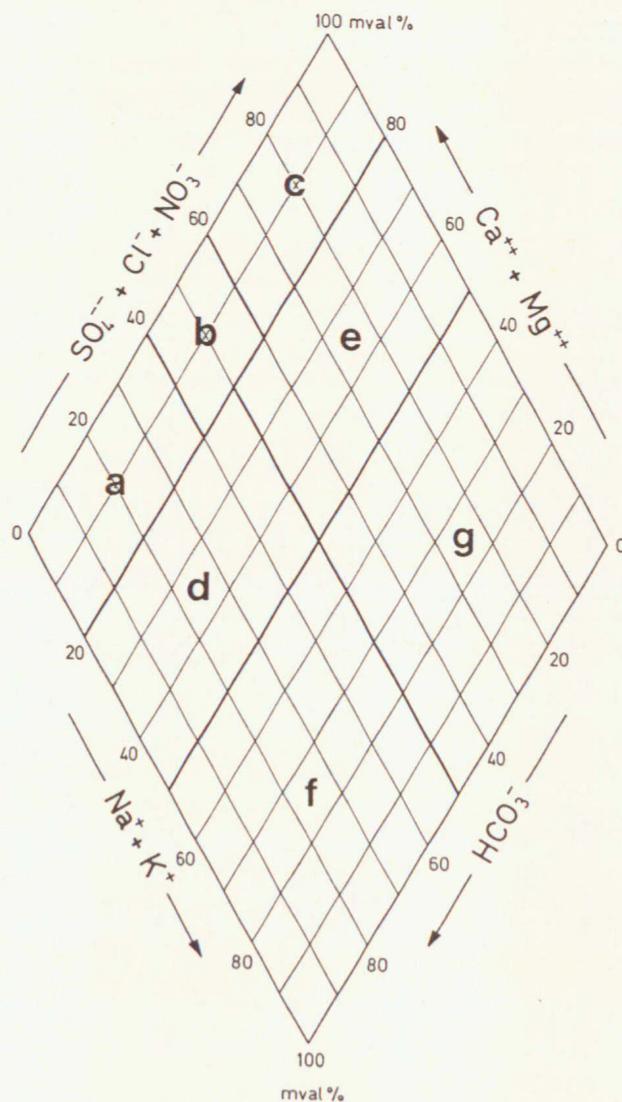
Wasserzulauf der Flüsse:



Quellen und Brunnen:



Typisierung nach FURTAK & LANGGUTH (1967)



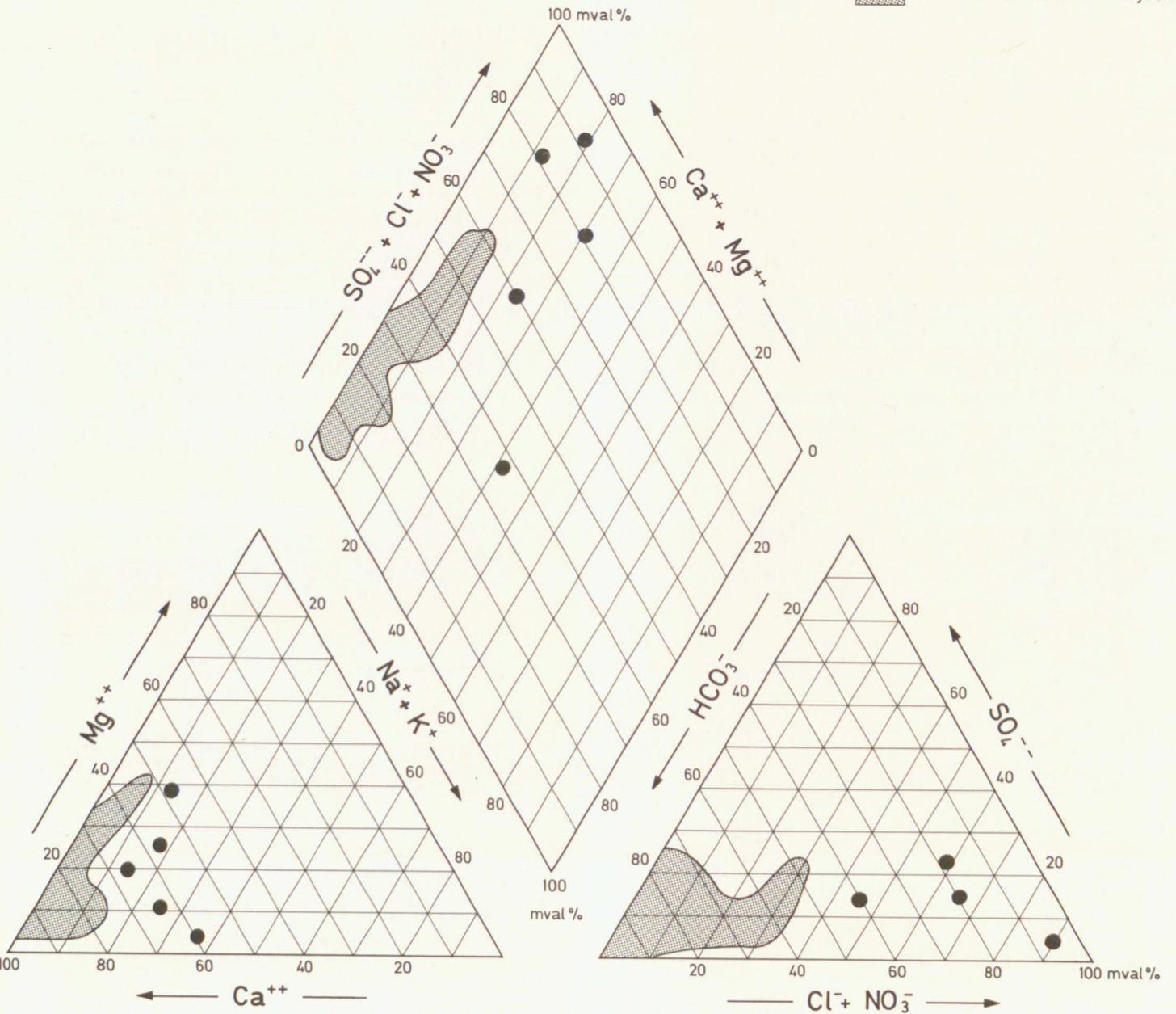
- Normal erdalkalische Wässer
 - a) überwiegend hydrogenkarbonatisch
 - b) hydrogenkarbonatisch-sulfatisch
 - c) überwiegend sulfatisch
- Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt
 - d) überwiegend hydrogenkarbonatisch
 - e) überwiegend sulfatisch
 - überwiegend chloridisch
- Alkalische Wässer
 - f) überwiegend (hydrogen-)karbonatisch
 - g) überwiegend sulfatisch-chloridisch
 - überwiegend chloridisch

NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie

Abb. 15

Wässer aus dem Dogger

- Einzelanalyse
- ▨ Umfassende von ca. 60 Analysen



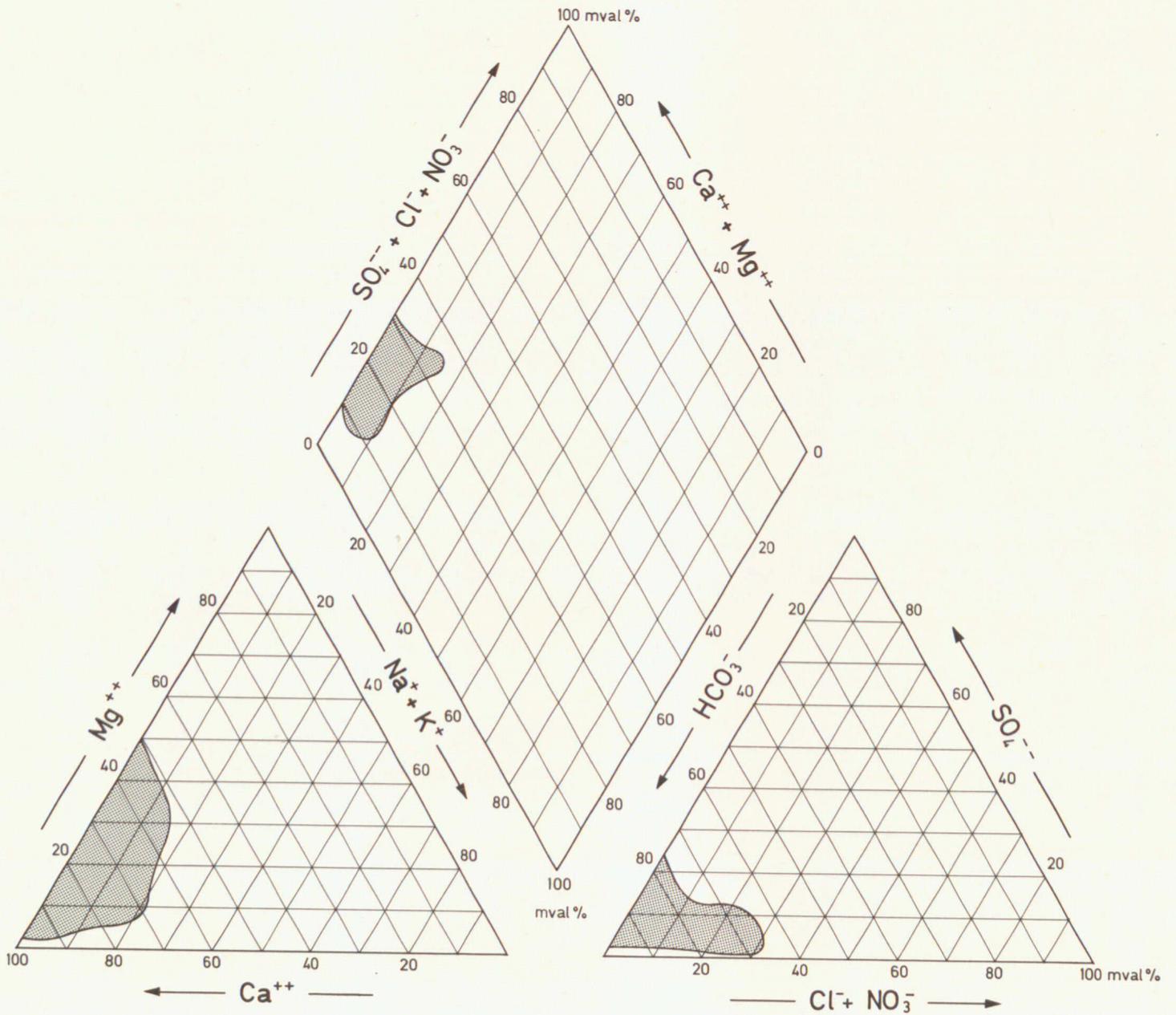
NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie

Abb. 16

Wässer aus dem Malm (Seichter Karst)



Umfassende von ca. 70 Analysen

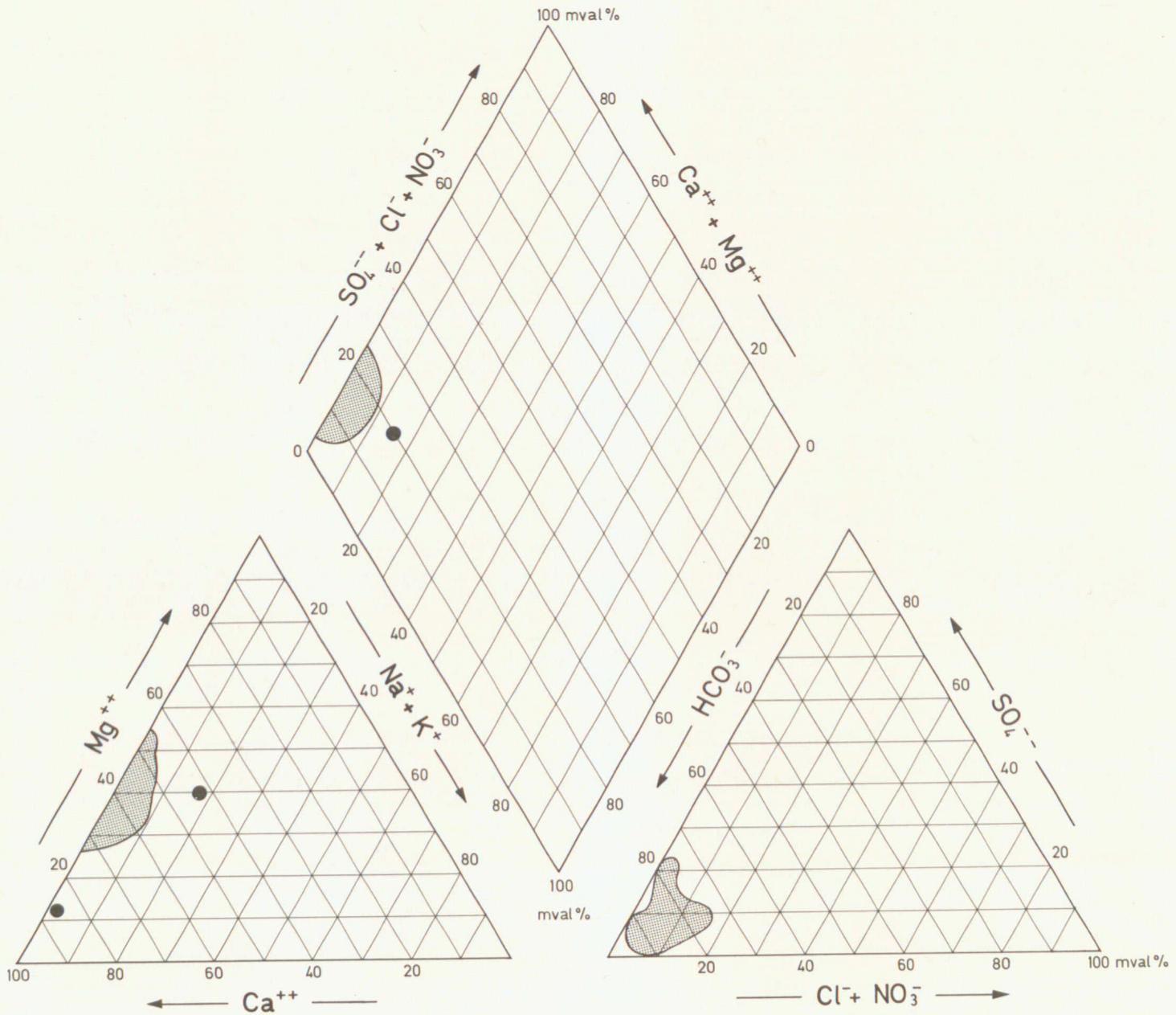


NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie

Abb. 17

Wässer aus dem Malm (Tiefer Karst)

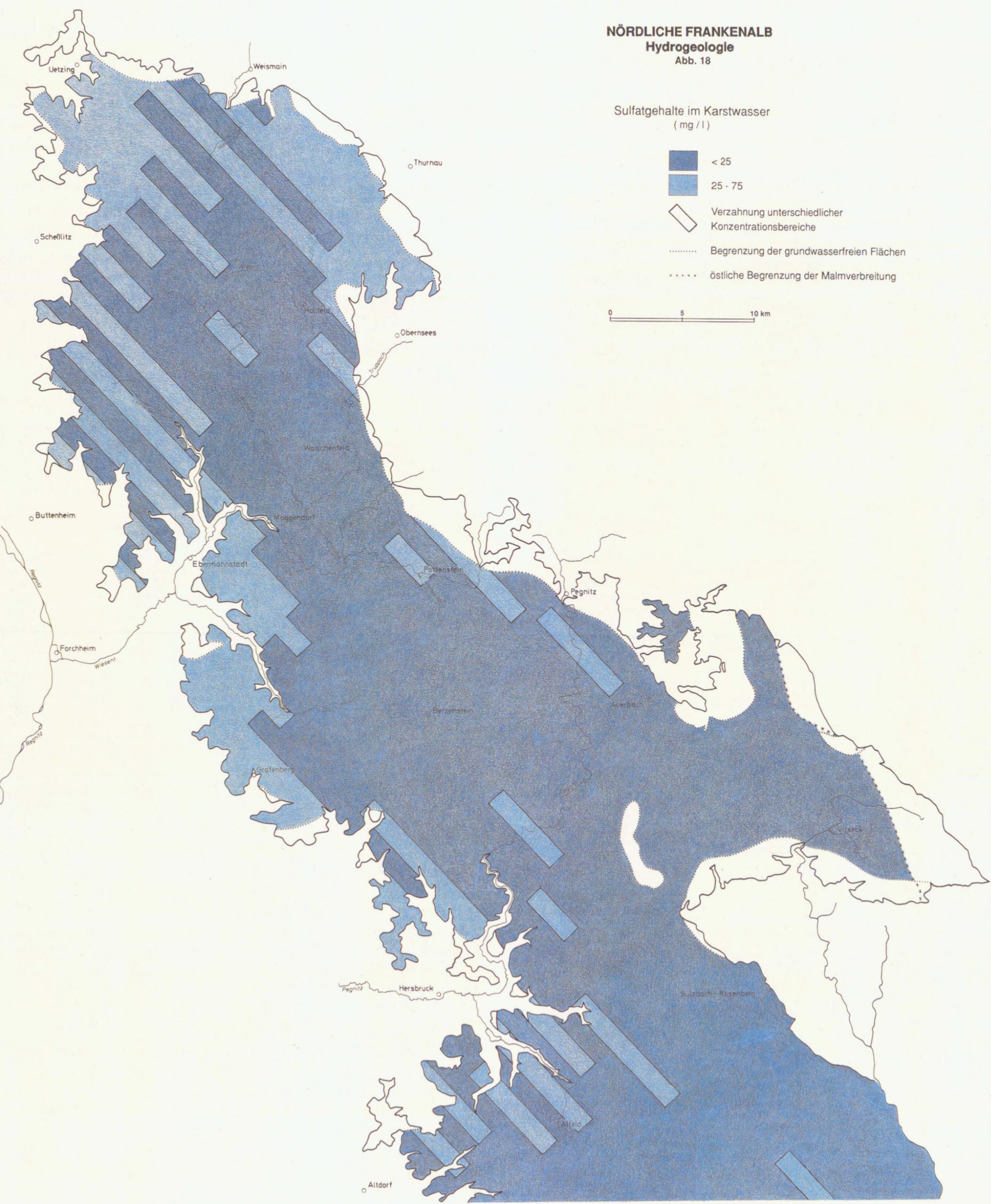
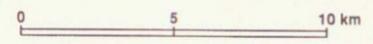
- Einzelanalyse
- Umfassende von ca. 70 Analysen



NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 18

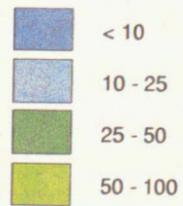
Sulfatgehalte im Karstwasser
 (mg / l)

-  < 25
-  25 - 75
-  Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche
-  Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
-  östliche Begrenzung der Malmverbreitung

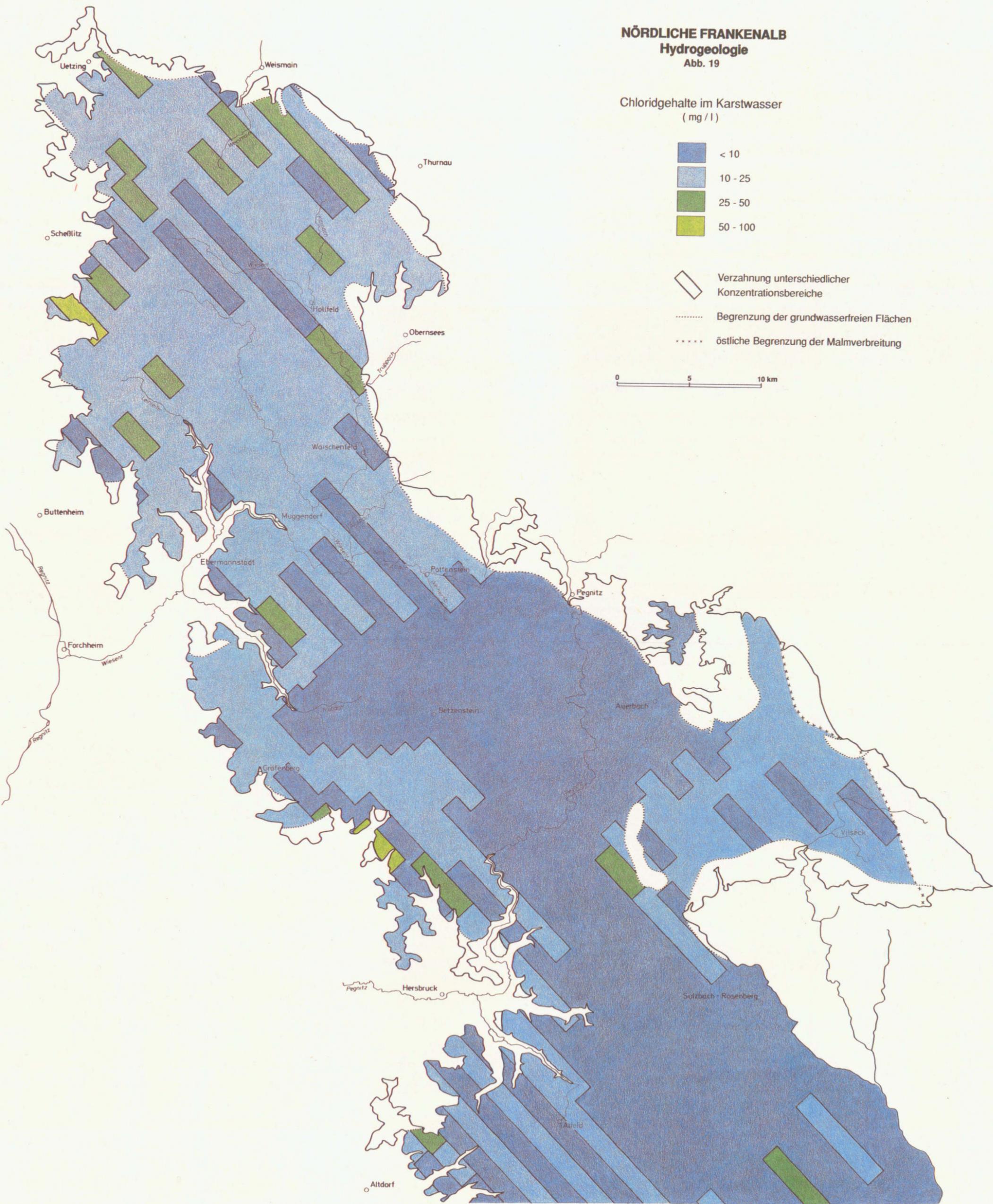
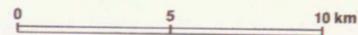


NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 19

Chloridgehalte im Karstwasser
 (mg/l)

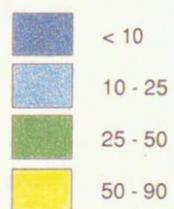


-  Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche
-  Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
-  östliche Begrenzung der Malmverbreitung

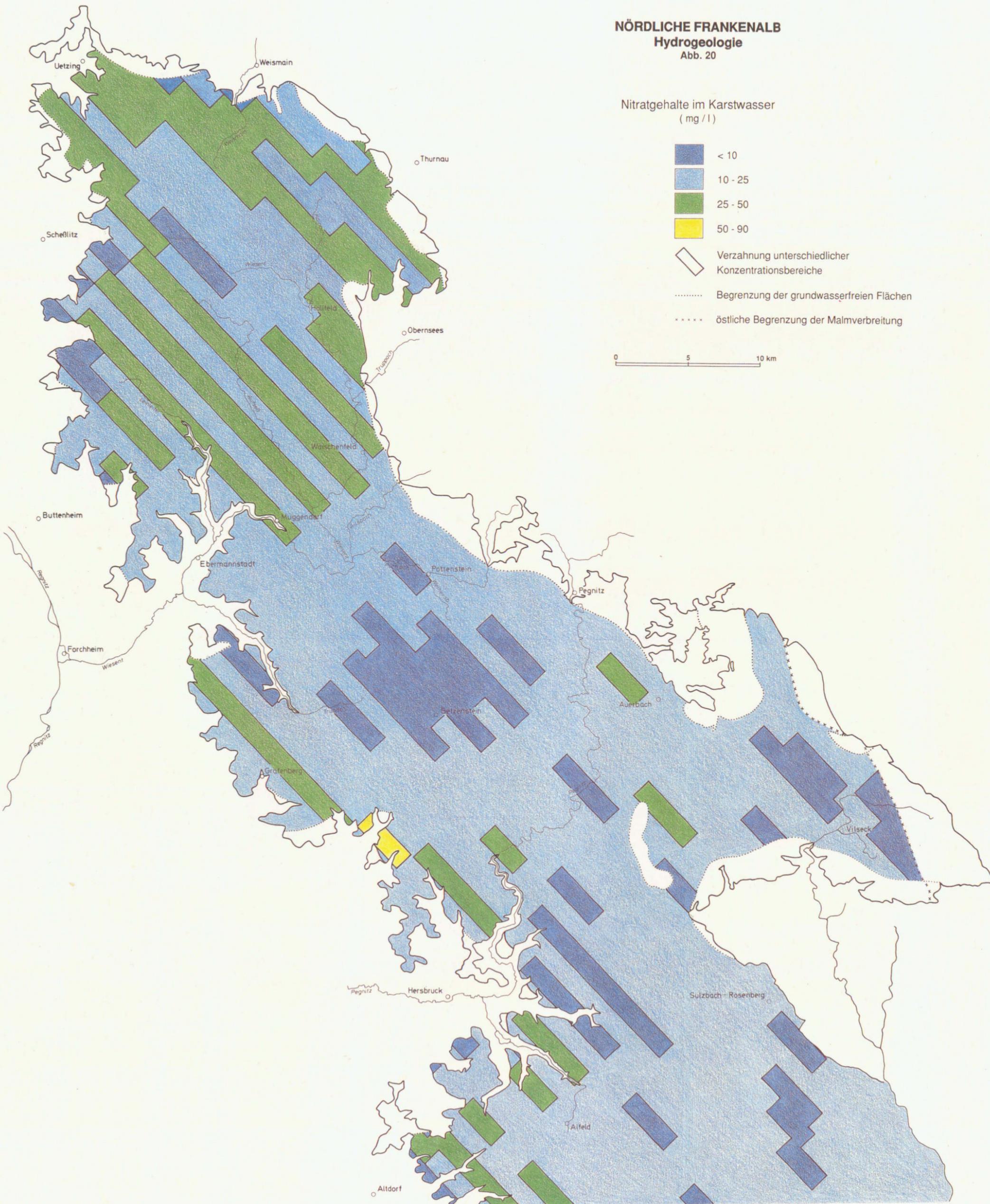


NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 20

Nitratgehalte im Karstwasser
 (mg/l)

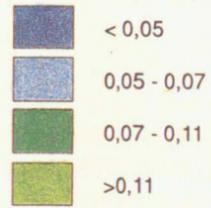


-  Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche
-  Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
-  östliche Begrenzung der Malmverbreitung



NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 21

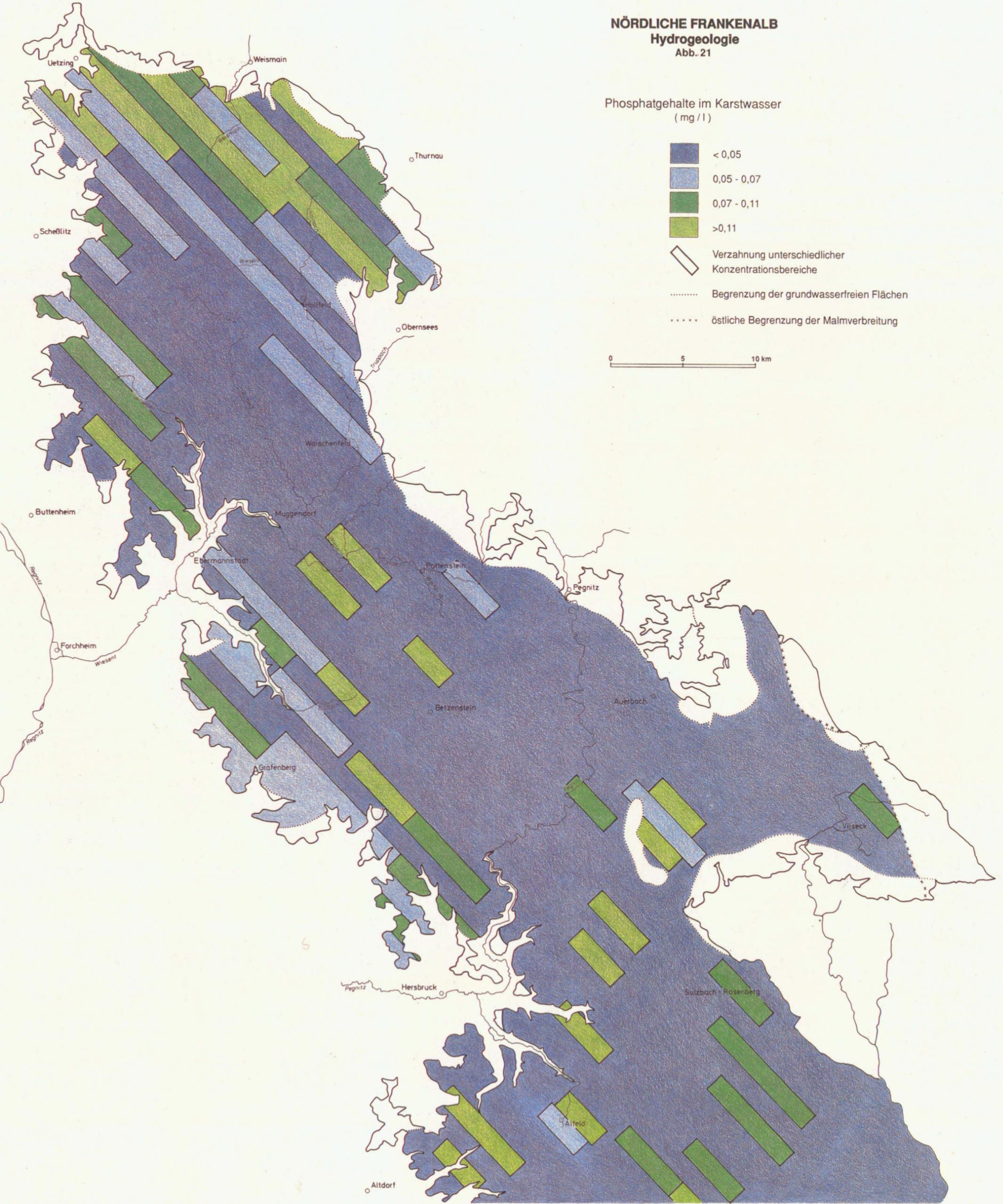
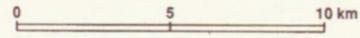
Phosphatgehalte im Karstwasser
 (mg/l)



 Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche

 Begrenzung der grundwasserfreien Flächen

 östliche Begrenzung der Malmverbreitung



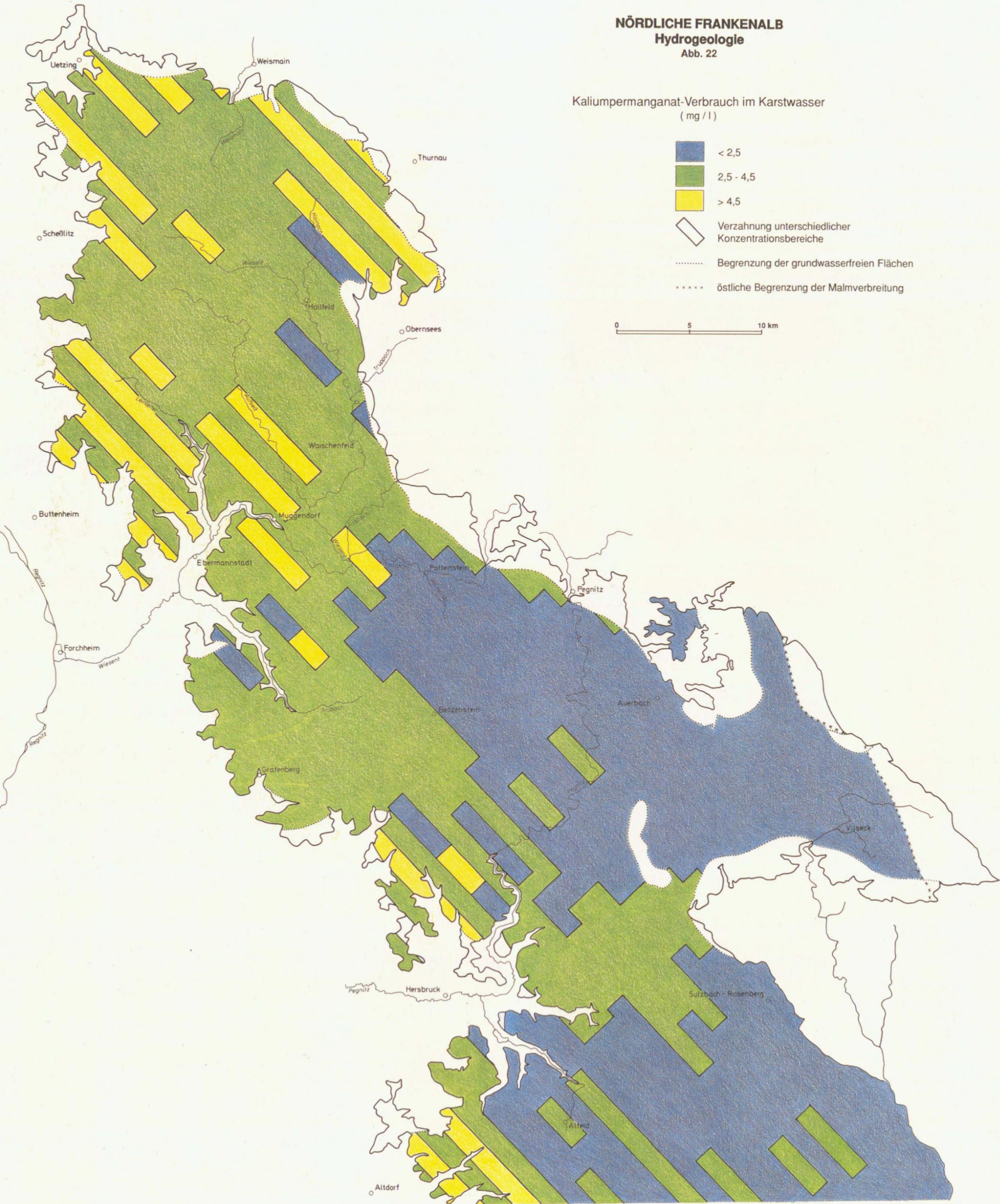
NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 22

Kaliumpermanganat-Verbrauch im Karstwasser
 (mg/l)

- < 2,5
- 2,5 - 4,5
- > 4,5

- Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche
- Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
- östliche Begrenzung der Malmverbreitung

0 5 10 km



NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
 Abb. 23

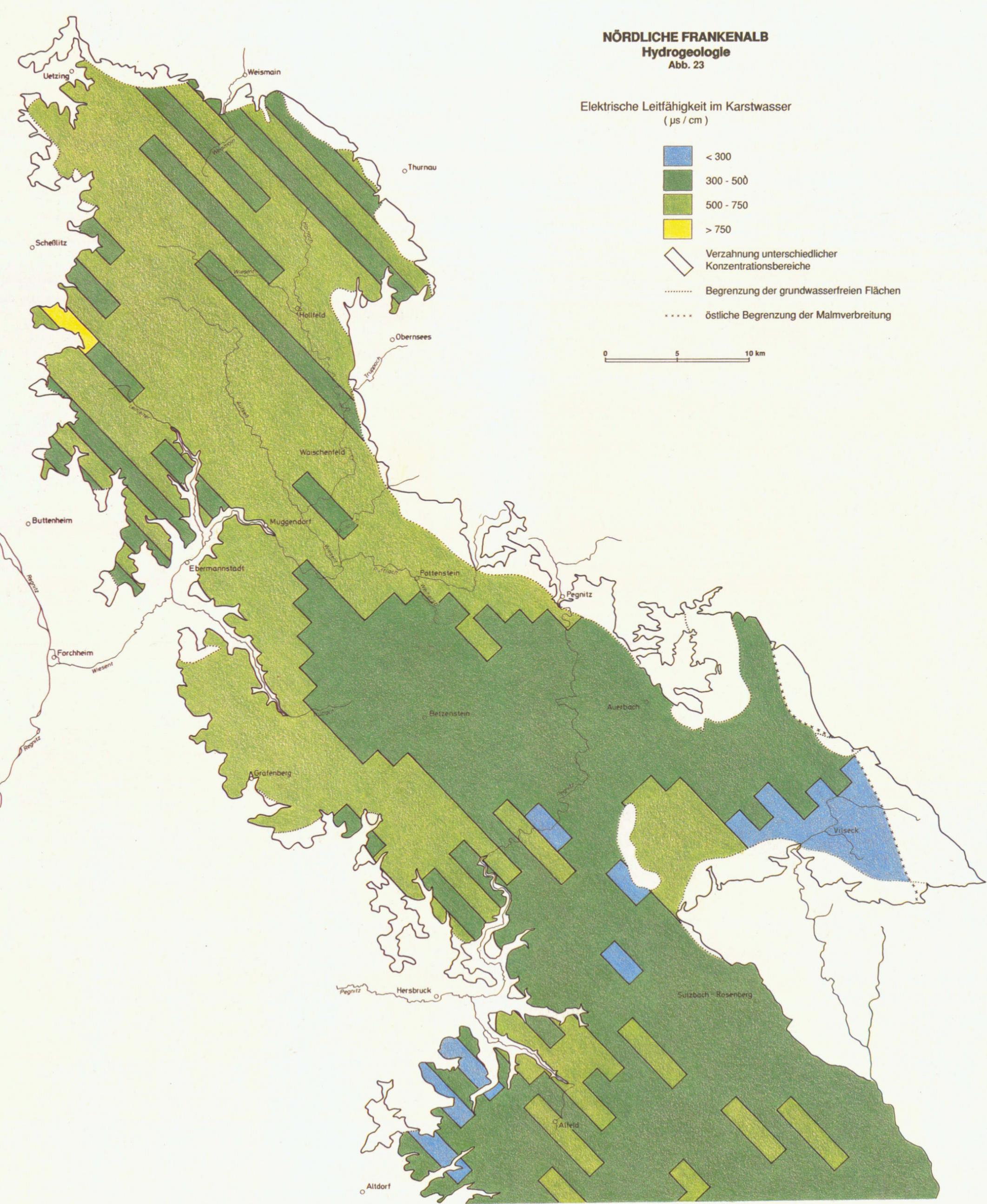
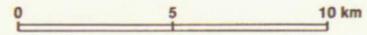
Elektrische Leitfähigkeit im Karstwasser
 ($\mu\text{s/cm}$)

- < 300
- 300 - 500
- 500 - 750
- > 750

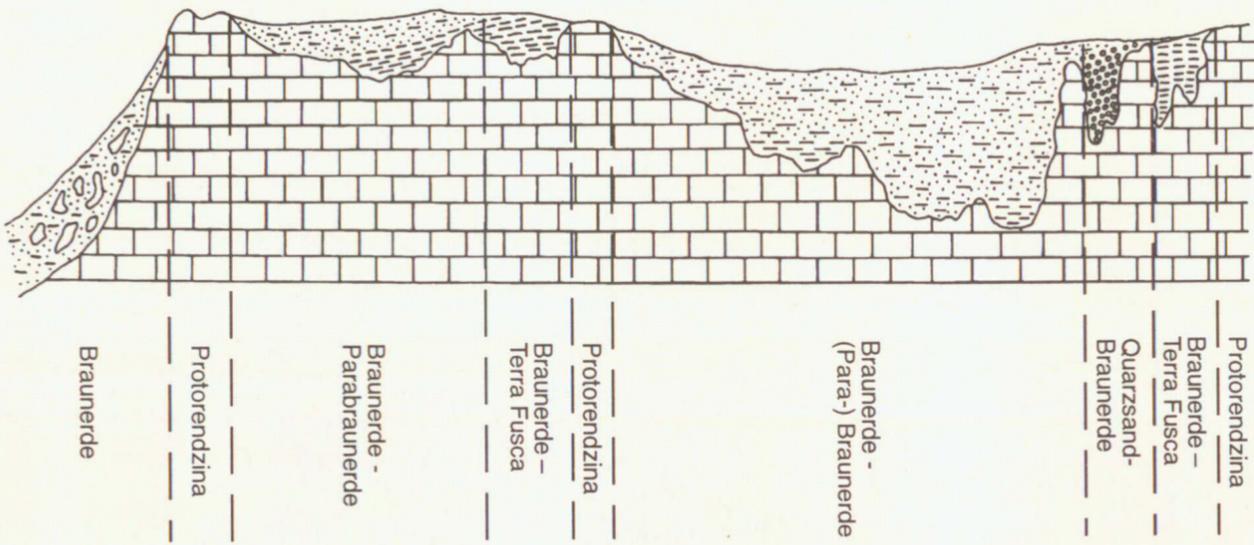
Verzahnung unterschiedlicher Konzentrationsbereiche

Begrenzung der grundwasserfreien Flächen

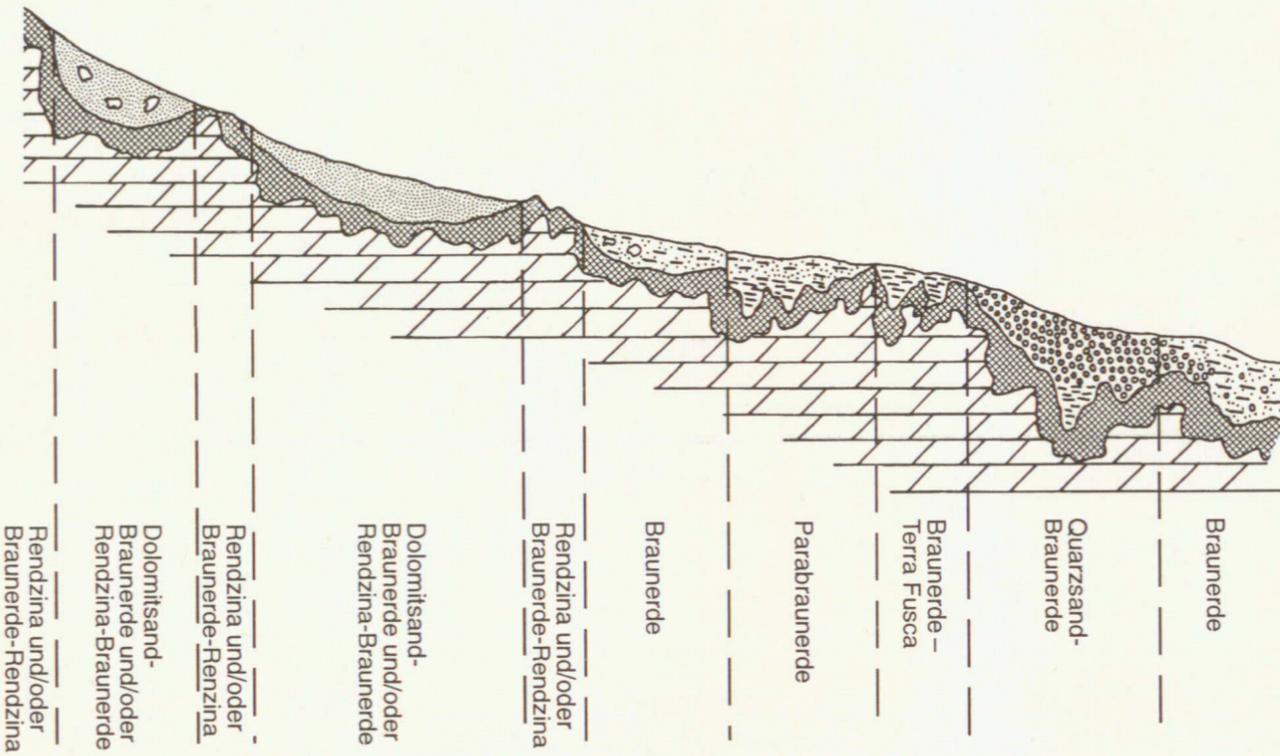
östliche Begrenzung der Malmverbreitung



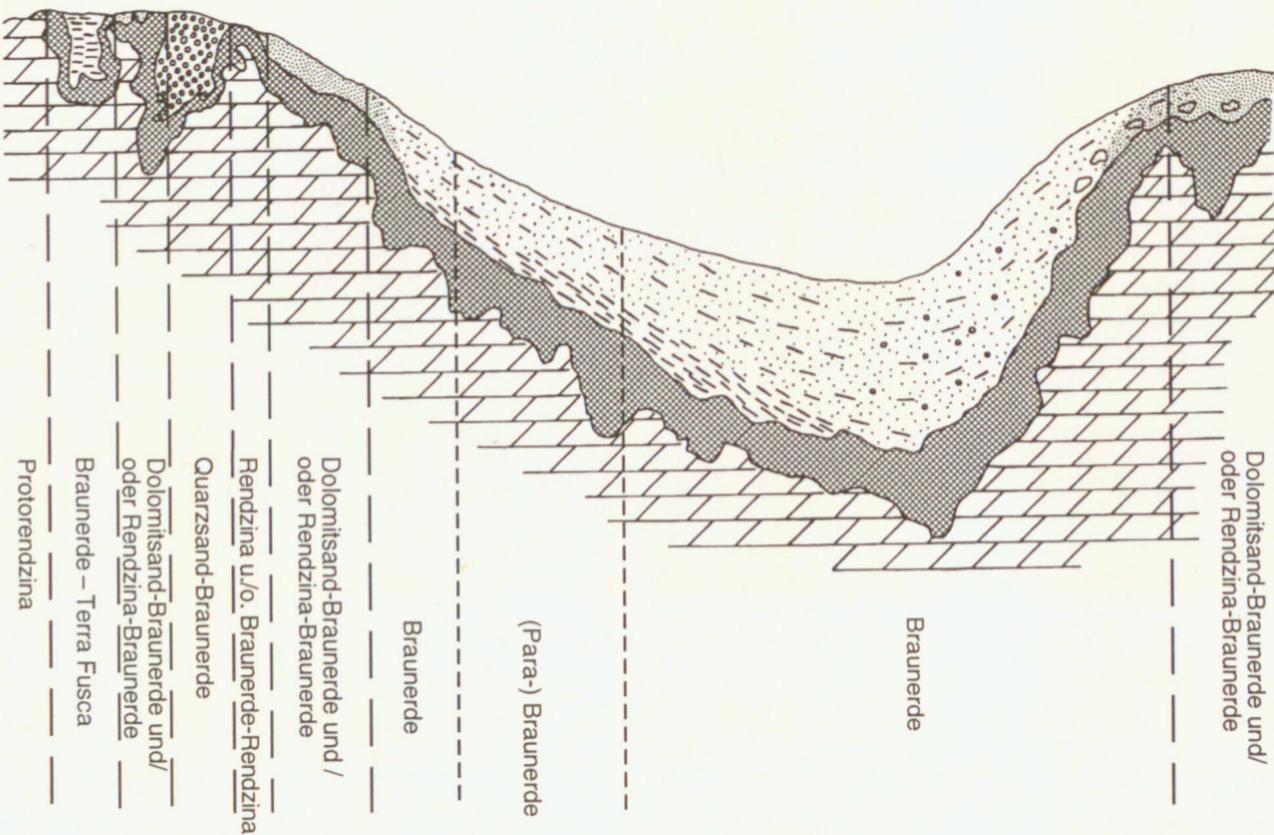
Schemaprofile zur Überdeckung des Karstgrundwasserleiters

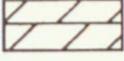
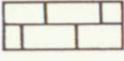
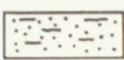
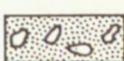


Profilskizze zur Verteilung der Böden im Bereich eines Plateaus mit Überhang zum Steilhang (links) über Kalk

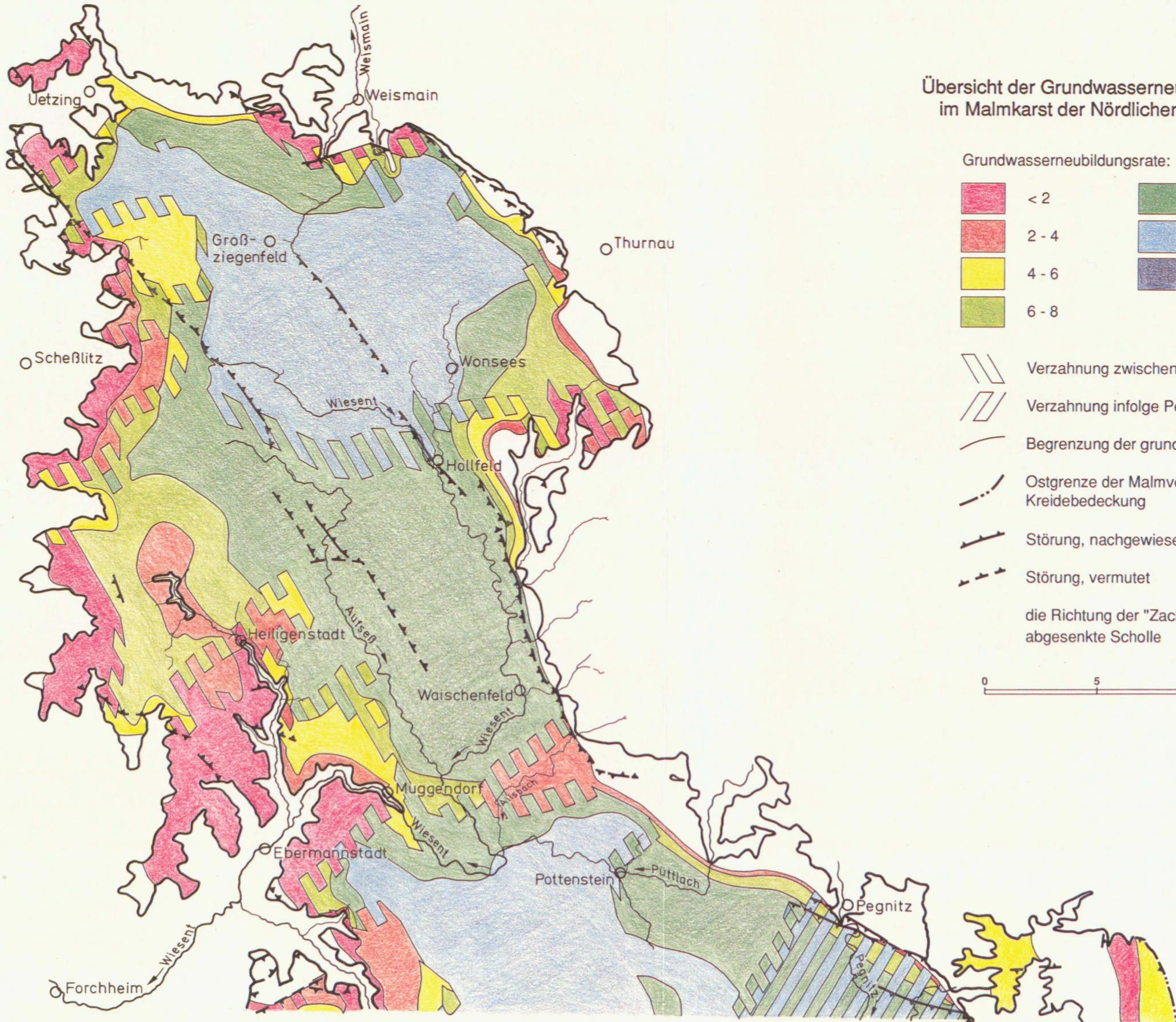


Profilskizze zur Verteilung der Böden im Bereich eines Hanges bzw. am Hangfuß über Dolomit



-  Dolomit
-  Kalk
-  Dolomitgrus
-  Residualtone, meist mit Lößlehm vermengt
-  Lößlehm, stellenweise mit eingelagerten Residualtonresten; über Dolomit auch dolomitsandig
-  Dolomitsand, z.T. schluffig
-  Kreidereste
-  Schutt

Profilskizze zur Verteilung der Böden im Bereich eines Trockentals mit Übergang zu einem Plateau über Dolomit

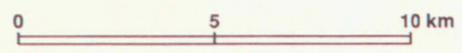


Übersicht der Grundwasserneubildungsraten im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb

Grundwasserneubildungsrate: (l/s x km²)

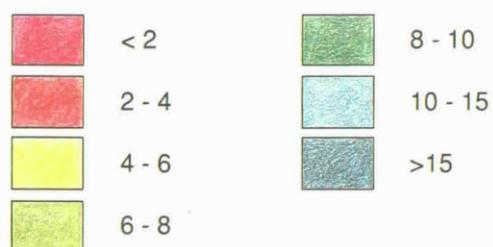
	< 2		8 - 10
	2 - 4		10 - 15
	4 - 6		>15
	6 - 8		

-  Verzahnung zwischen Bilanzierungsgrenzen
 -  Verzahnung infolge Pegnitzversickerung
 -  Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
 -  Ostgrenze der Malmverbreitung unter Kreidebedeckung
 -  Störung, nachgewiesen
 -  Störung, vermutet
- die Richtung der "Zacken" bezeichnet die abgesenkte Scholle

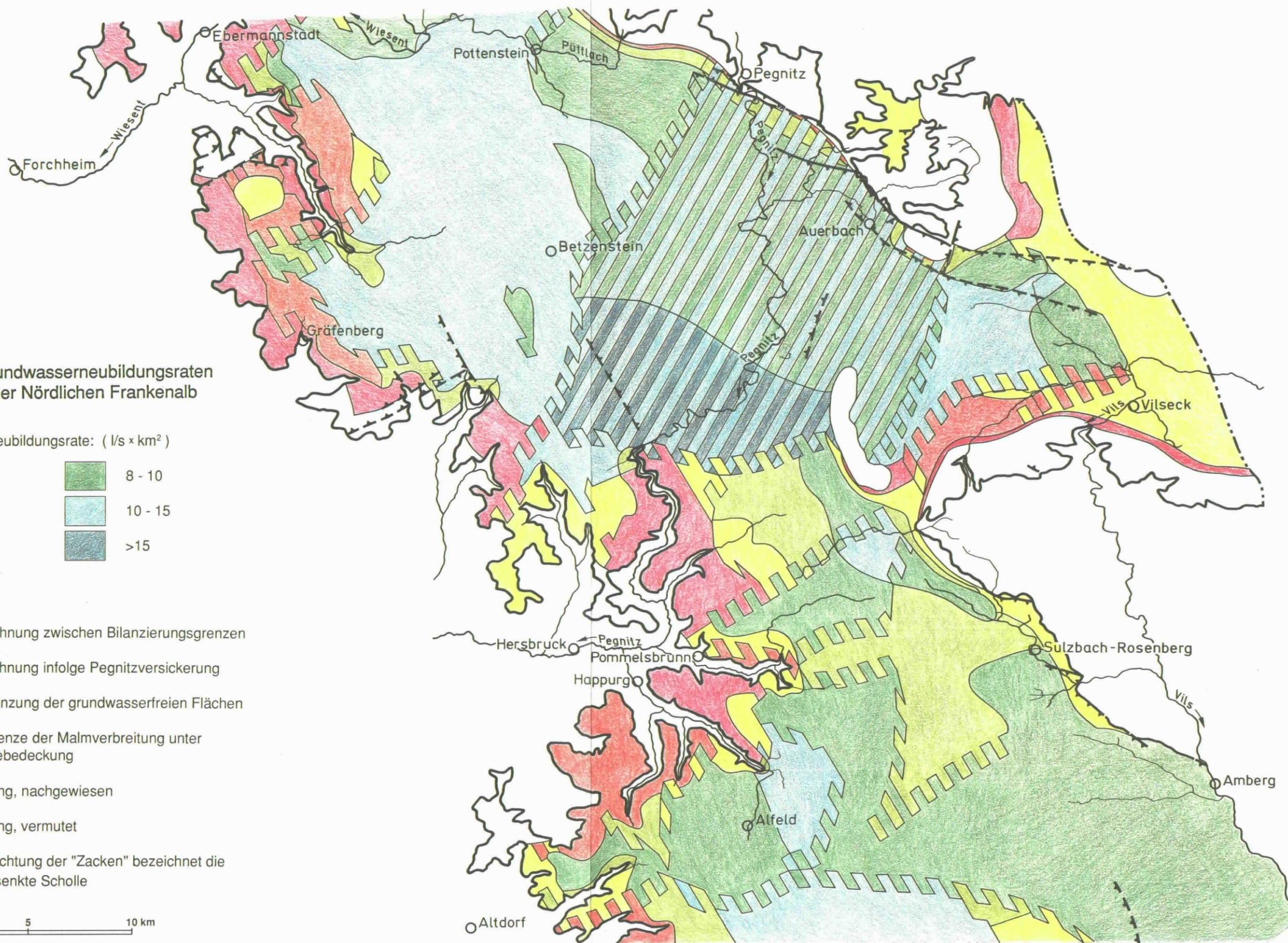
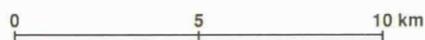


Übersicht der Grundwasserneubildungsraten
 im Malmkarst der Nördlichen Frankenalb

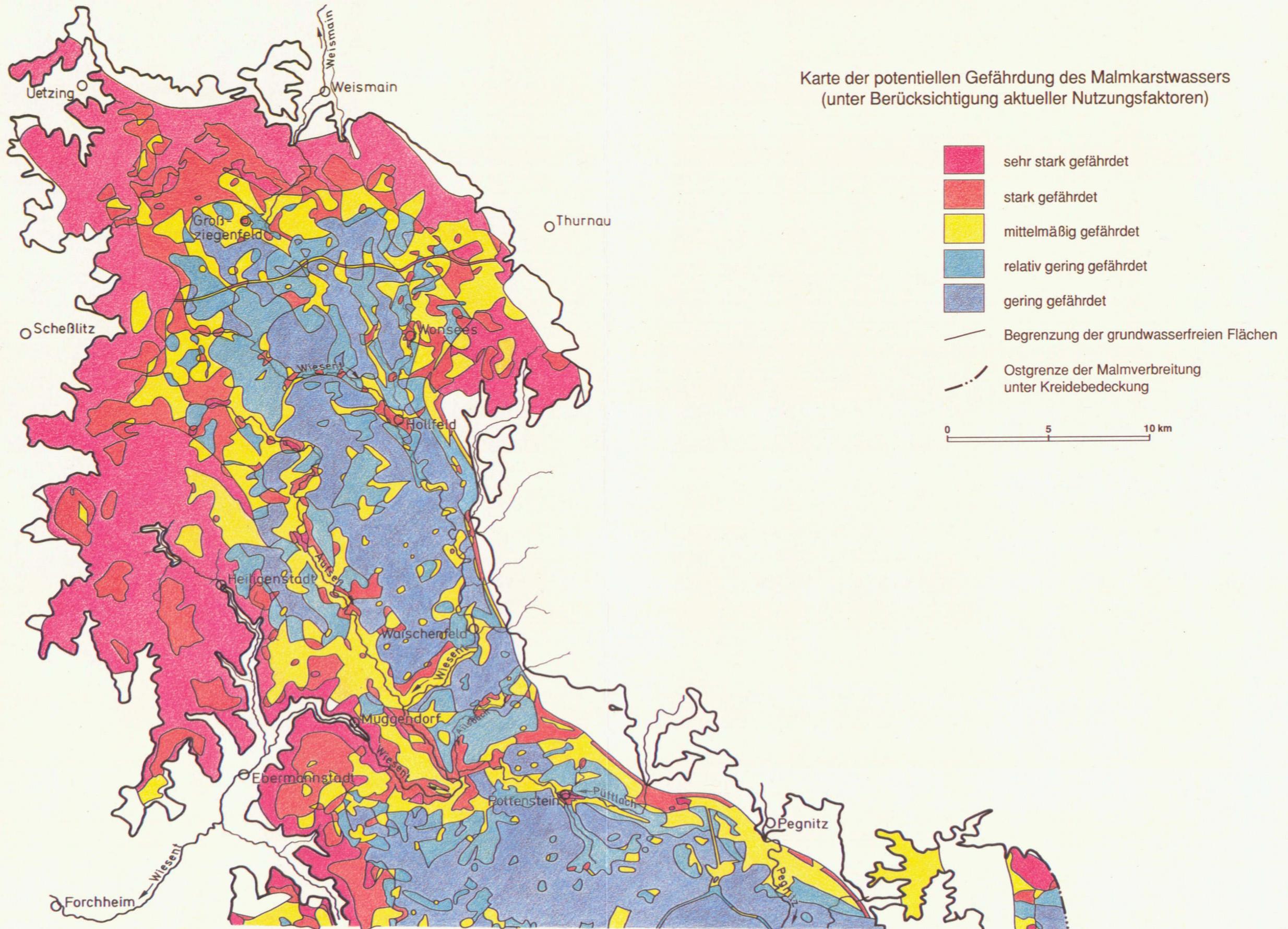
Grundwasserneubildungsrate: (l/s × km²)

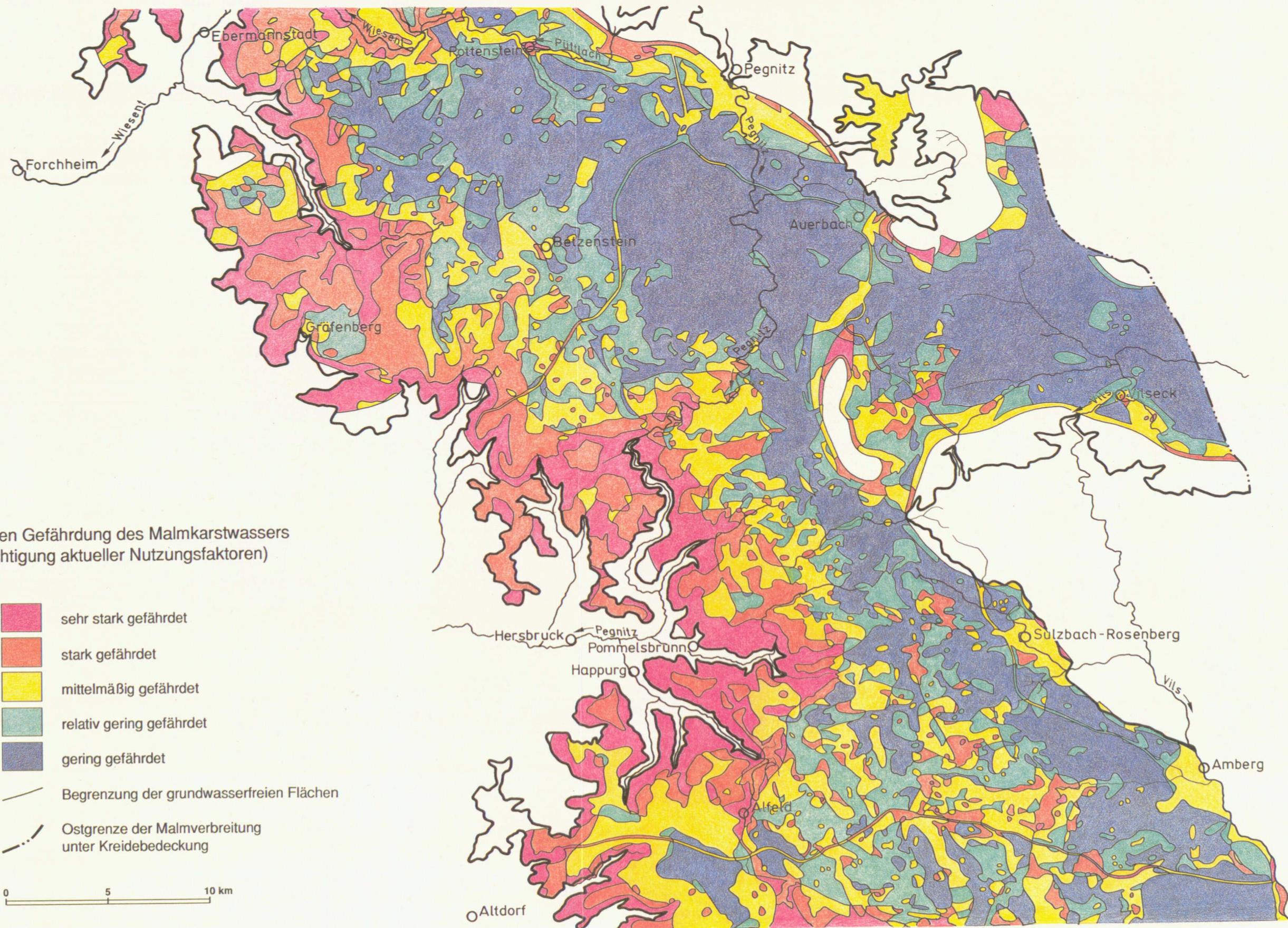


-  Verzahnung zwischen Bilanzierungsgrenzen
 -  Verzahnung infolge Pegnitzversickerung
 -  Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
 -  Ostgrenze der Malmverbreitung unter Kreidebedeckung
 -  Störung, nachgewiesen
 -  Störung, vermutet
- die Richtung der "Zacken" bezeichnet die abgesenkte Scholle



Karte der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers
 (unter Berücksichtigung aktueller Nutzungsfaktoren)





Karte der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers
 (unter Berücksichtigung aktueller Nutzungsfaktoren)

- sehr stark gefährdet
- stark gefährdet
- mittelmäßig gefährdet
- relativ gering gefährdet
- gering gefährdet
- Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
- Ostgrenze der Malmverbreitung unter Kreidebedeckung

0 5 10 km

Schema zur Ermittlung der Klassen der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwassers unter Berücksichtigung hydrogeologischer Faktoren sowie aktueller Nutzungsfaktoren.

SEICHTER KARST

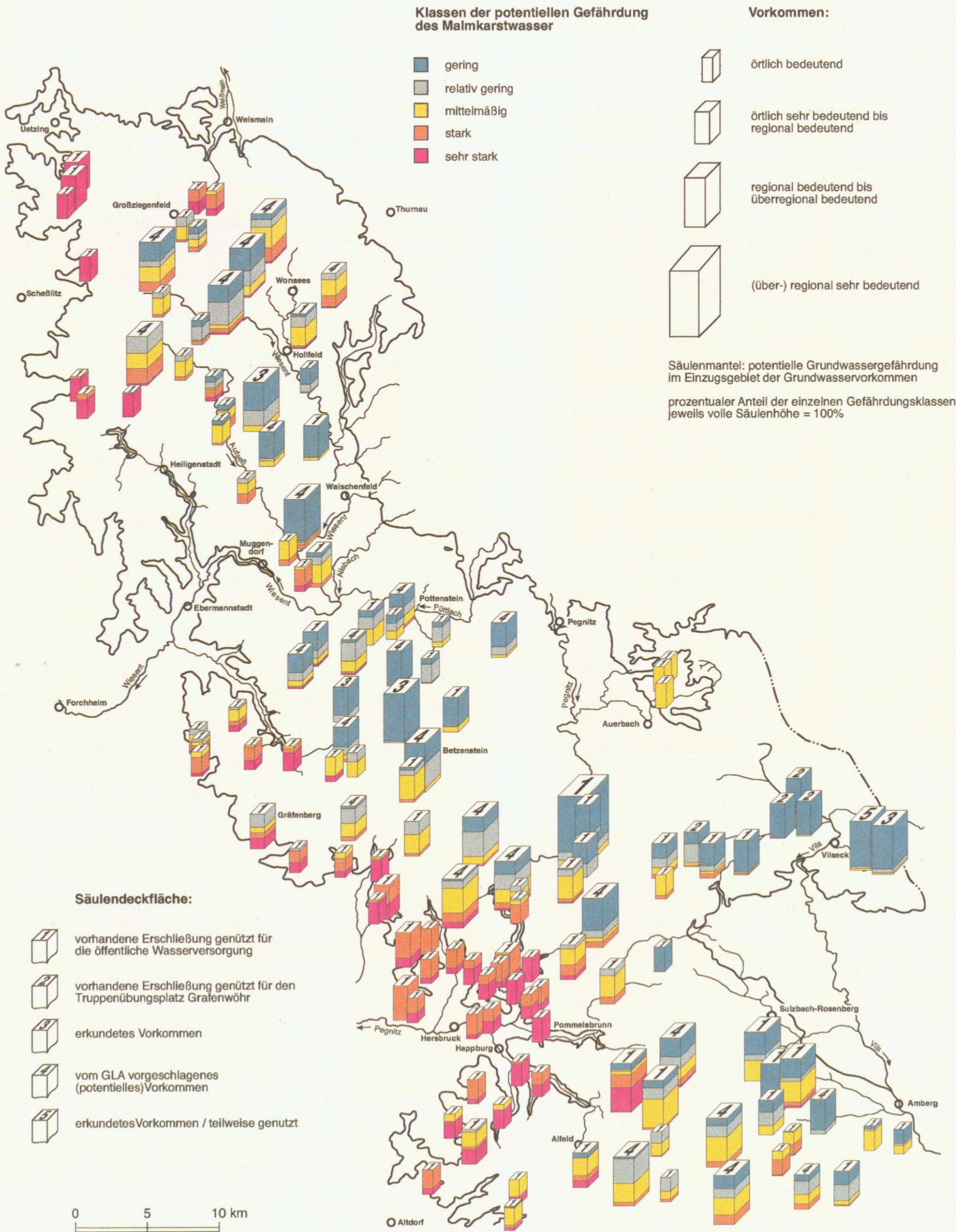
Hydrogeologische Faktoren			Nutzungsfaktoren			
Grundwasser-Mächtigkeit (m)	Überdeckung		Siedlungen, Verkehrswege	Wald < 70%	Wald 70 - 95%	Wald 95 - 100%
	Kreide	gesamt				
< 10m	< 70%	< 50%				
		50-80%				
		> 80%				
	70-95%	< 80%				
		> 80%				
		> 80%				
10-50m	< 95%	> 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				
	> 95%	> 95%				
50-100m*1	< 95%	< 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				
> 100m*1	< 95%	< 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				

*1 (auf kleine Flächen beschränkt)

TIEFER KARST

Hydrogeologische Faktoren			Nutzungsfaktoren			
Grundwasser-Mächtigkeit (m)	Überdeckung		Siedlungen, Verkehrswege	Wald < 70%	Wald 70 - 95%	Wald 95 - 100%
	Kreide	gesamt				
< 10m "Übergangsbereich"	< 70%	< 50%				
		50-80%				
		> 80%				
	70-95%	< 80%				
		> 80%				
		> 95%	> 95%			
10-50m	< 95%	< 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				
	> 95%	> 95%				
50-100m	< 95%	< 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				
> 100m	< 95%	< 30%				
		30-50%				
		50-80%				
		> 80%				
	> 95%	> 95%				

Übersicht ergiebiger Grundwasservorkommen im Malmkarst
(unter Berücksichtigung ihrer potentiellen Gefährdung)



Klassen der potentiellen Gefährdung des Malmkarstwasser

- gering
- relativ gering
- mittelmäßig
- stark
- sehr stark

Vorkommen:

- örtlich bedeutend
- örtlich sehr bedeutend bis regional bedeutend
- regional bedeutend bis überregional bedeutend
- (über-) regional sehr bedeutend

Säulendeckfläche: potentielle Grundwassergefährdung im Einzugsgebiet der Grundwasservorkommen

prozentualer Anteil der einzelnen Gefährdungsklassen jeweils volle Säulenhöhe = 100%

Säulendeckfläche:

- vorhandene Erschließung genützt für die öffentliche Wasserversorgung
- vorhandene Erschließung genützt für den Truppenübungsplatz Grafenwöhr
- erkundetes Vorkommen
- vom GLA vorgeschlagenes (potentielles) Vorkommen
- erkundetes Vorkommen / teilweise genützt

0 5 10 km

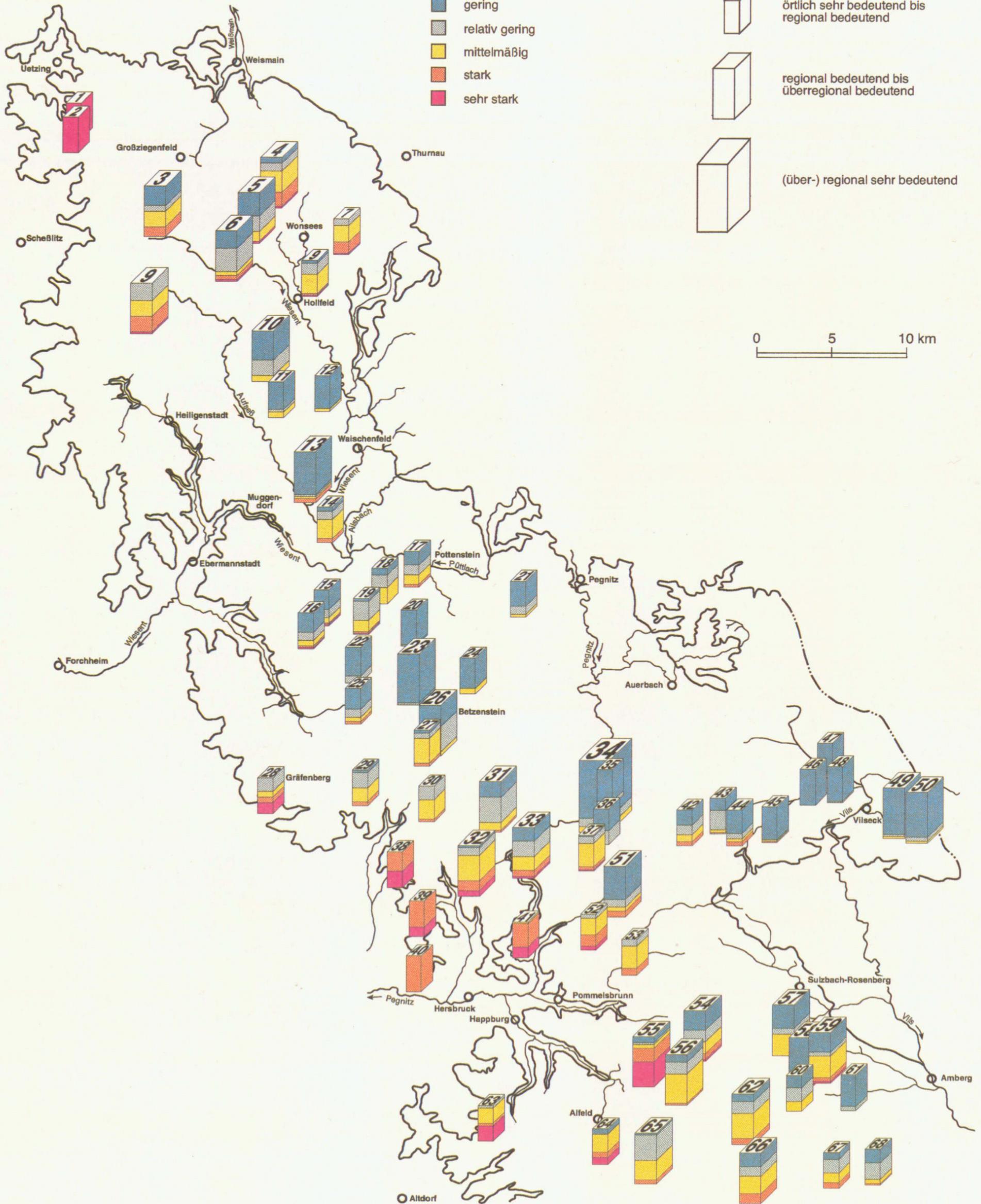
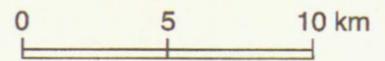
Übersicht ergiebiger Grundwasservorkommen im Malmkarst
Säulendeckfläche: fortlaufende Nummern (vgl. Tab. 14)

Klassen der potentiellen Gefährdung
des Malmkarstwasser

- gering
- relativ gering
- mittelmäßig
- stark
- sehr stark

Vorkommen:

- örtlich sehr bedeutend bis regional bedeutend
- regional bedeutend bis überregional bedeutend
- (über-) regional sehr bedeutend





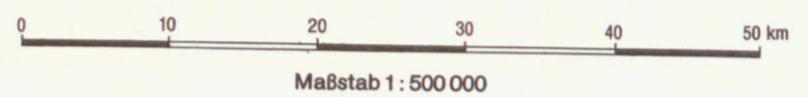
Ausschnitt aus der Übersichtskarte:
Gewässerkundliche Meßstellen
an oberirdischen Gewässern
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft,
München 1983

Zeichenerklärung

- Hauptwasserscheide
- Wasserscheide 1. Unterteilung
- Wasserscheide 2. Unterteilung
- Wasserscheide 3. Unterteilung
- Gebietskennzahl
(4-stellig, weitere Unterteilungen siehe
„Verzeichnis der Bach- und Flußgebiete in Bayern“
bzw. die Verzeichnisse der angrenzenden Bundesländer)
- Lattenpegel
- Schreibpegel
- Abflußpegel (Lattenpegel)
- Abflußpegel (Schreibpegel)
- Schwebstoff-Meßstelle
- Wassertemperatur-Meßstelle
- Wassertemperatur-Meßstelle
mit Registrierung

Gewässerbeschaffenheit:

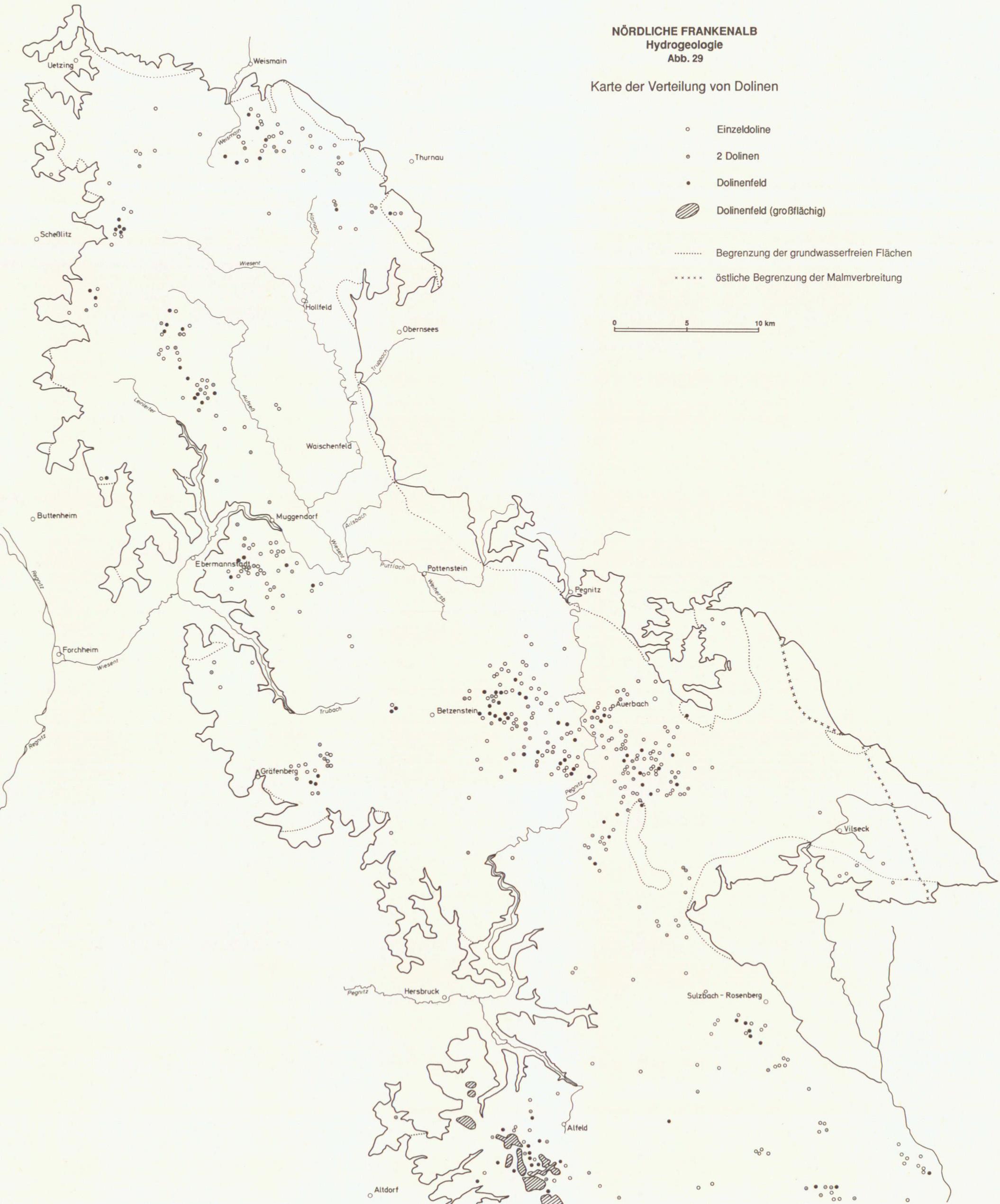
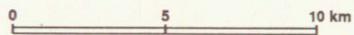
- Hauptmeßstelle
- Hauptmeßstelle mit Registrierung



NÖRDLICHE FRANKENALB
Hydrogeologie
Abb. 29

Karte der Verteilung von Dolinen

- Einzeldoline
- 2 Dolinen
- Dolinenfeld
- ▨ Dolinenfeld (großflächig)
- Begrenzung der grundwasserfreien Flächen
- xxxxx östliche Begrenzung der Malmverbreitung



Fazielle Entwicklung der Malmgesteine

MALM ALPHA

Mittel - Oxford

Schichtfazies:

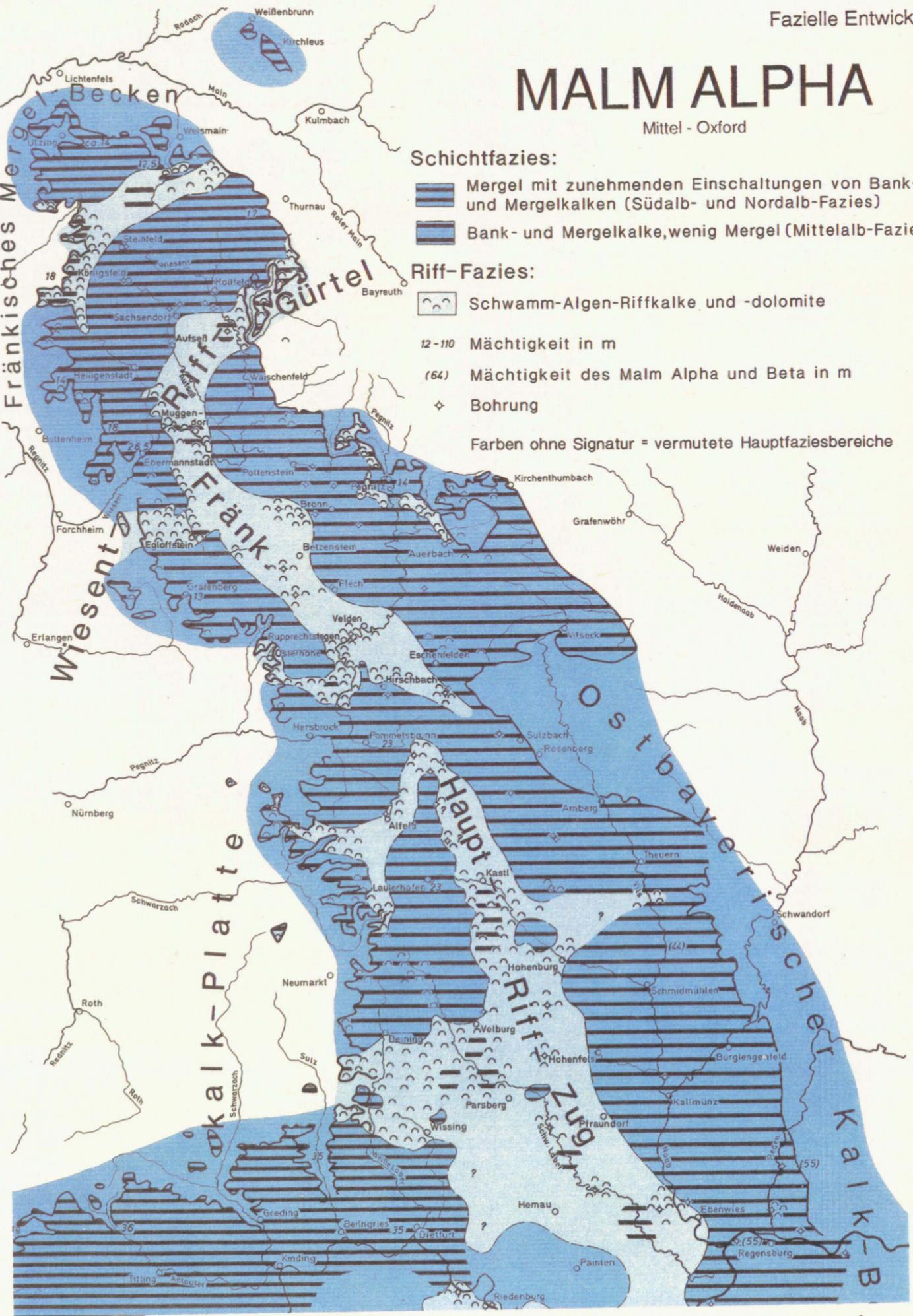
-  Mergel mit zunehmenden Einschaltungen von Bank- und Mergelkalken (Südalb- und Nordalb-Fazies)
-  Bank- und Mergelkalke, wenig Mergel (Mittelalb-Fazies)

Riff-Fazies:

-  Schwamm-Algen-Riffkalke und -dolomite

- 12 - 110 Mächtigkeit in m
- (64) Mächtigkeit des Malm Alpha und Beta in m
- ◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



Ausschnitt aus: Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 114, Tafel 1

MALM BETA

Ober - Oxford

Schichtfazies:

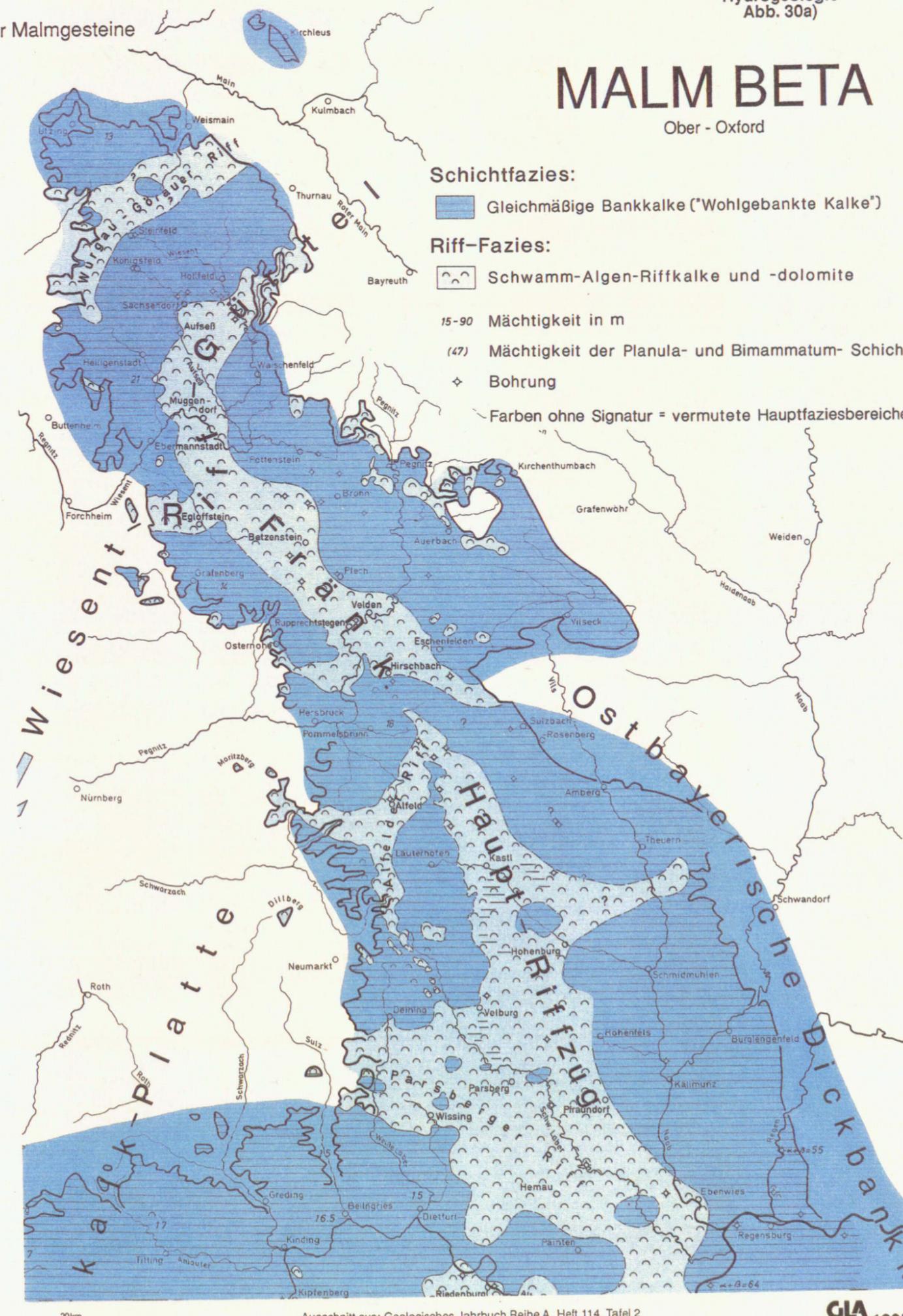
-  Gleichmäßige Bankkalke ("Wohlgebankte Kalke")

Riff-Fazies:

-  Schwamm-Algen-Riffkalke und -dolomite

- 15 - 90 Mächtigkeit in m
- (47) Mächtigkeit der Planula- und Bimammatum- Schicht
- ◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



Ausschnitt aus: Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 114, Tafel 2

Fazielle Entwicklung der Malmgesteine

MALM GAMMA

Unter-Kimmeridge

Schichtfazies:

-  Vorwiegend Mergel mit einzelnen Bankkalkgruppen (Schwäbische Fazies)
-  Mergelige Bankkalk und Mergel (Fränkische Fazies)

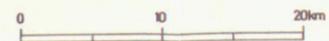
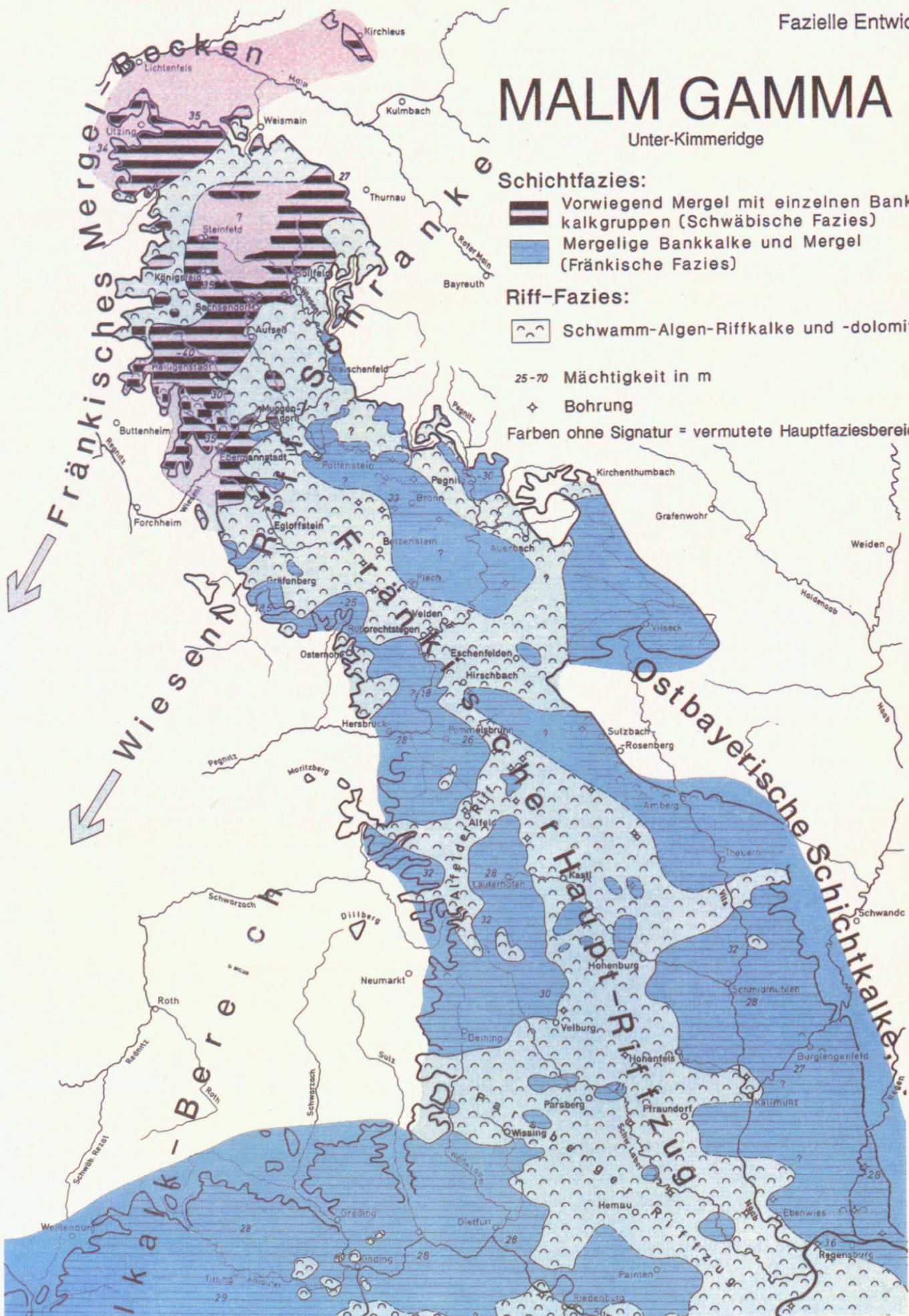
Riff-Fazies:

-  Schwamm-Algen-Riffkalke und -dolomite

25-70 Mächtigkeit in m

◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



MALM DELTA 1+2

Mittel-Kimmeridge, tieferer Teil

Schichtfazies:

-  Mergel mit Bankkalkgruppen (Fränkische Mergelfazies)
-  Dickbänke des Treuchtlinger Marmors (Fränkische Fazies), in Riffnähe z. T. tafelbankiger Kalk und Dolomit. Im SW Quaderkalk

Schwammrasenfazies (Biostromfazies):

-  Tafelbankiger Kalk und Dolomit

Schwamm-Algen-Riff-Fazies (Biohermfazies):

-  Riffdolomit und Massenkalk

12-22 Mächtigkeit der Schichtfazies

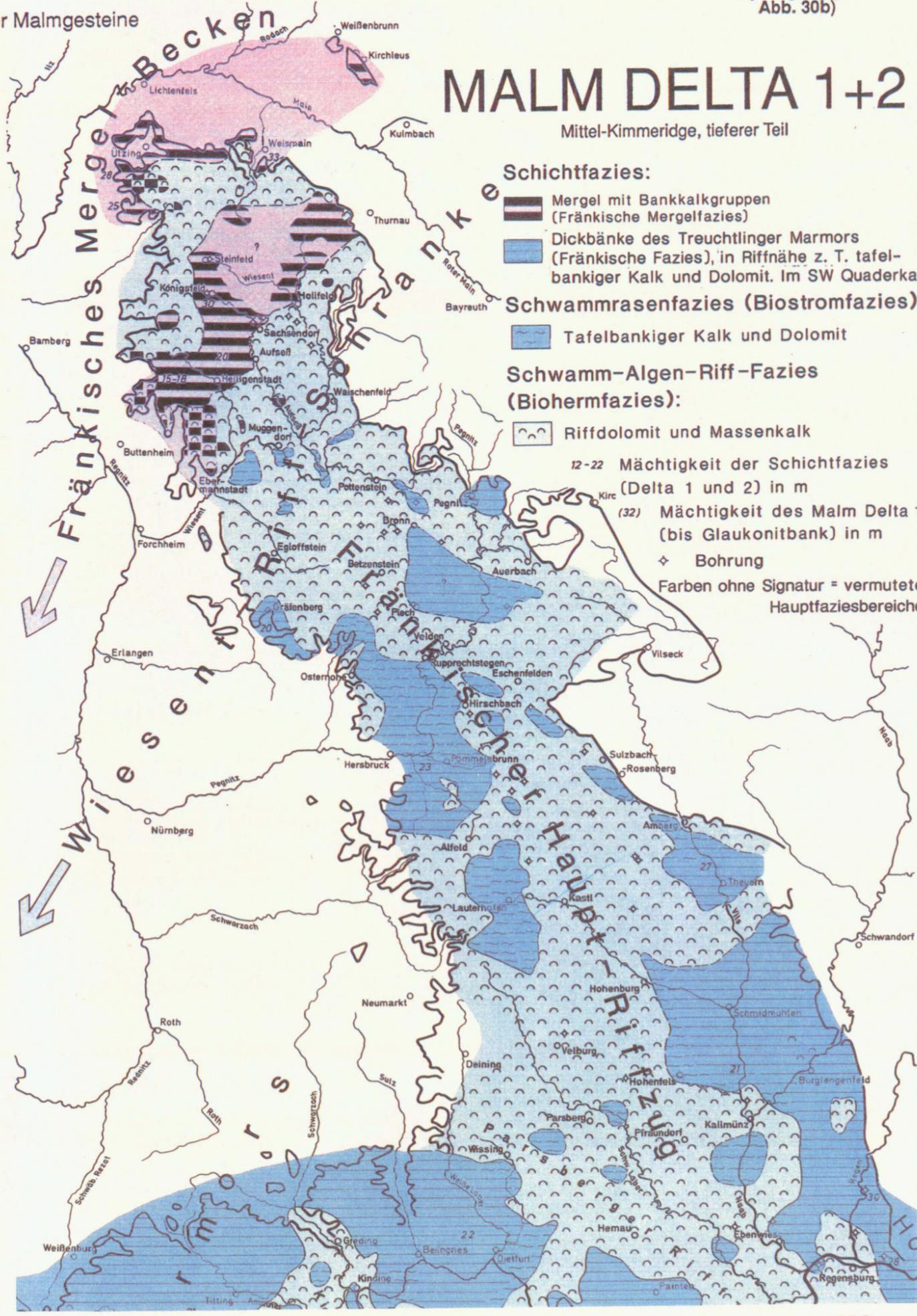
(Delta 1 und 2) in m

(32) Mächtigkeit des Malm Delta 1-3

(bis Glaukonitbank) in m

◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



Fazielle Entwicklung der Malmgesteine

MALM DELTA 4

Mittel-Kimmeridge, höchster Teil

Schichtfazies:

- Dickbankkalke
- Plattenkalke
- Echinodermen-Feinschuttkalke und grobe Fossilschuttbänke

Schwammrassenfazies (Biostromfazies):

- Tafelbankiger Kalk und Dolomit

Schwamm-Algen-Riff-Fazies (Biohermfazies):

- Riffdolomit und Massenkalk

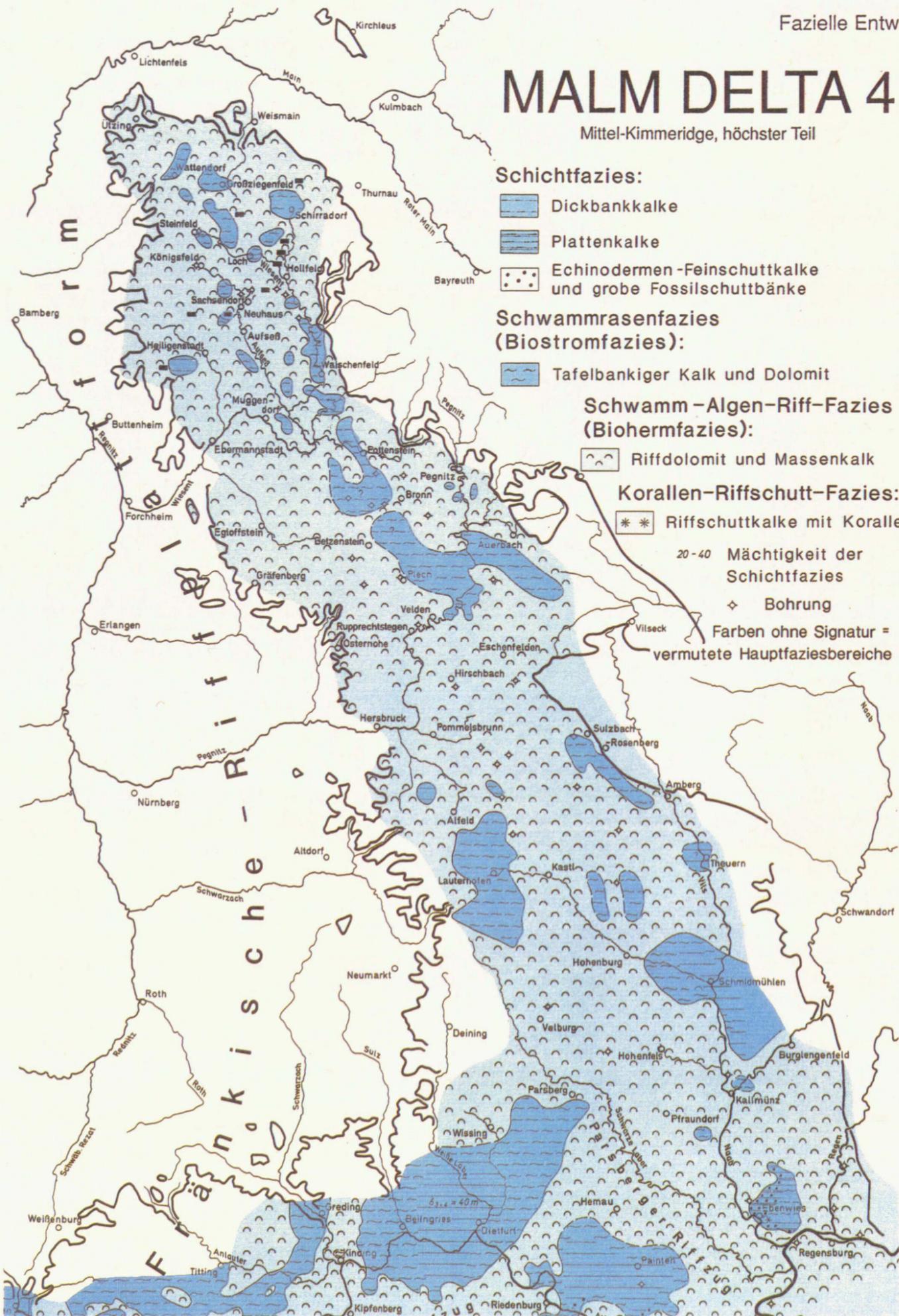
Korallen-Riffschutt-Fazies:

- Riffschuttkalke mit Korallen

20-40 Mächtigkeit der Schichtfazies

◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



Ausschnitt aus: Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 114, Tafel 5

0 10 20km

MALM EPSILON 2

Ober-Kimmeridge, höherer Teil

Schichtfazies:

- Bankkalke vorherrschend
- Plattenkalke mit Kieselplatten
- Gelegentliche Einschaltungen von groben Fossilschuttbänken (z.T. gradiert)
- Kieselrelikte aus Riffschuttkalken (in der Nordalb)

Schwammrassenfazies (Biostromfazies):

- Tafelbankiger Kalk und Dolomit, z.T. mit Ooiden

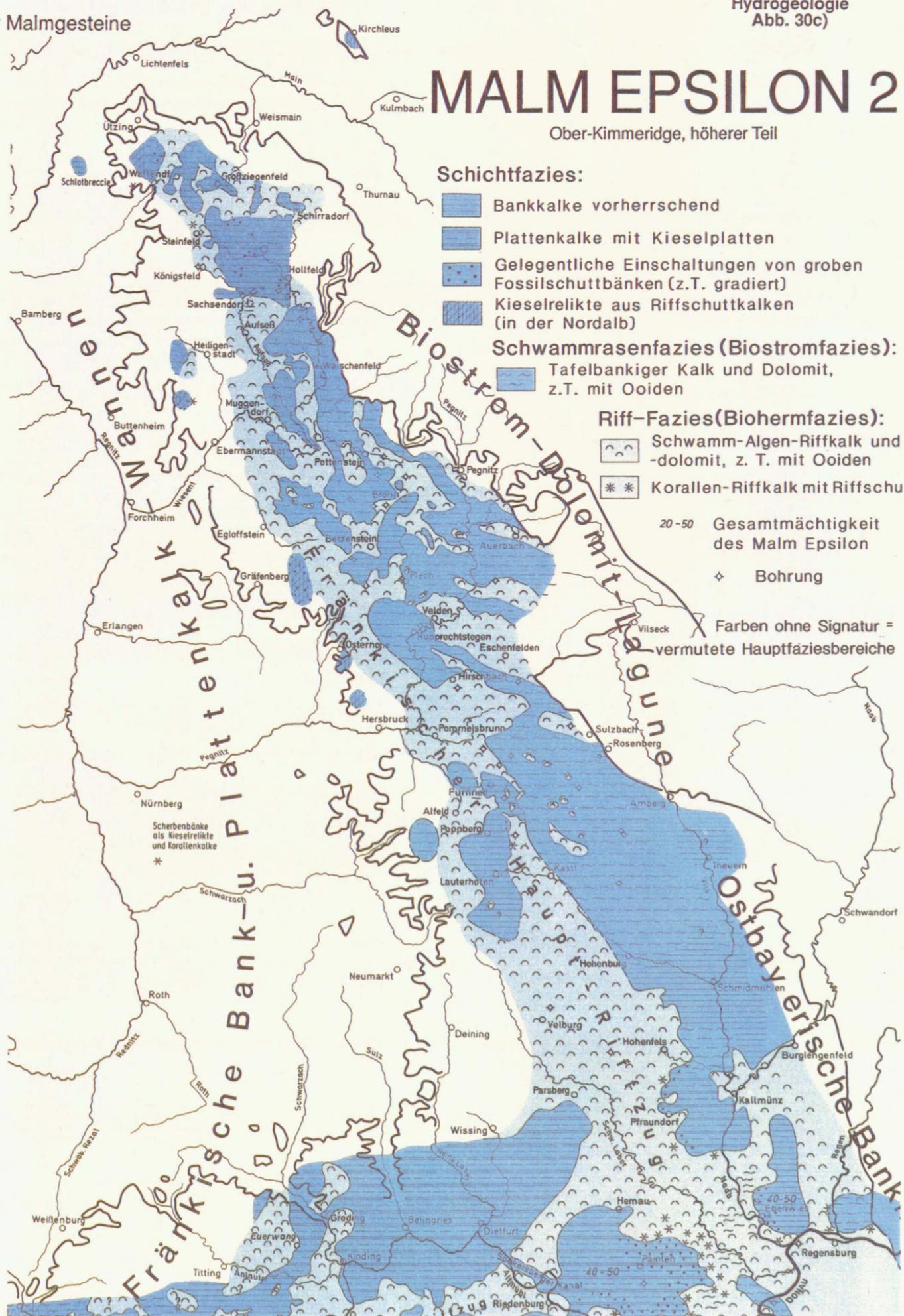
Riff-Fazies (Biohermfazies):

- Schwamm-Algen-Riffkalk und -dolomit, z.T. mit Ooiden
- Korallen-Riffkalk mit Riffschutt

20-50 Gesamtmächtigkeit des Malm Epsilon

◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche



Ausschnitt aus: Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft 114, Tafel 6

Fazielle Entwicklung der Malmgesteine

MALM ZETA 1

Unteres-Untertithon, tiefster Teil

Schichtfazies:

Fränkische Alb

-  Bankkalk vorherrschend
-  Platten- und Bankkalk
-  Bank- und Plattenkalk mit Kieselplatten im oberen Teil
-  Einschaltungen von groben Fossiltschuttbänken (z.T. gradiert)

Schwammrassenfazies

(Biostromfazies):

-  Tafelbankiger Kalk und Dolomit

Riff-Fazies:

-  Schwamm-Algen-Riffkalk u. -dolomit, z.T. mit Ooiden
-  Korallen-Riffkalk mit Riffschutt

10-90 Mächtigkeit in m

◇ Bohrung

Farben ohne Signatur = vermutete Hauptfaziesbereiche

