

**GIS-gestützte Standortanalyse zur Differenzierung der
Ablagerungseignung verschiedener Naturräume
Unterfrankens gegenüber Müllverbrennungsschlacken**

Dissertation zur Erlangung des
naturwissenschaftlichen Doktorgrades
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Günter Kus

aus Randersacker

Würzburg 2001

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie & Umwelt der Universität Würzburg im Zusammenhang mit einem vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen geförderten Forschungsvorhaben zur Untersuchung des Langzeitverhaltens von MV-Schlacken im Naturraum.

Herrn Prof. Dr. P. Udluft bin ich, für seine großzügige und vielfältige Unterstützung während der Durchführung der Arbeit, besonders zu Dank verpflichtet. Ein weiterer Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft und dem Bayerischen Geologischen Landesamt für die Bereitstellung digitaler Daten. Ohne diese Grundlage wäre die Arbeit nicht zustande gekommen.

Eine wichtige Voraussetzung war ebenso die technische und moralische Unterstützung meiner Kollegen im Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie & Umwelt der Universität Würzburg. In diesem Zusammenhang danke ich vor allem meinem Kollegen Roland Barthel für den intensiven Erfahrungsaustausch zum Thema Geoinformationssysteme. Ein weiterer Dank gilt meinem Kollegen Bernhard Schäfers, der mich bei der Datenerhebung tatkräftig unterstützte. Herrn Dr. W. Trapp gebührt Dank für seine Unterstützung bei der Zusammenstellung regionaler Literatur.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Frau Lilian und meiner Schwester Barbara, die durch einfühlsame Teilnahme die Arbeit begleitet haben.

Kurzfassung

Die Müllverbrennung hat sich in der BRD als wichtiges Glied in der Entsorgungskette etabliert. Bei der thermischen Verwertung fällt als Restprodukt u. a. Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) an, die deponiert oder wiederverwertet wird. Eine vollständige Abtrennung umweltrelevanter Schadstoffe (vorwiegend Schwermetalle) kann mit dem Verfahren der Müllverbrennung jedoch nicht erreicht werden. Eine nachhaltig umweltbewusste Entsorgung der Schlacke setzt daher voraus, daß sich das Schlacke-Material nach Ablagerung weitestgehend neutral in seiner natürlichen Umgebung verhält. Zahlreiche Untersuchungen verschiedener Autoren haben gezeigt, daß das Auslaugungsverhalten der Schlacke und damit auch das Freisetzen von Schadstoffen bei Ablagerung, sehr stark von den Umgebungsbedingungen abhängt. Wesentlich dabei sind vor allem der Wasserumsatz und die hydrogeochemischen Milieubedingungen im gesamten Ablagerungssystem. Geringe Wasserumsätze und spezielle pH-Bedingungen des Carbonatpufferbereichs bedingen besonders günstige und stabile Verhältnisse. Daraus ist abzuleiten, daß hauptsächlich dort gegenüber MV-Schlacken langfristig ablagerungsfreundliche Bedingungen herrschen, wo einerseits geringe Wasserumsätze und andererseits hohes Puffervermögen durch carbonatische Phasen und prinzipiell geringes Wasserleitvermögen vorausgesetzt werden können. Unter diesen Gesichtspunkten wurden relevante naturräumliche Standortfaktoren definiert, die im Rahmen einer modellhaften Standortanalyse für den Raum Unterfranken (Nordbayern) eingesetzt wurden. Die Haltung, Analyse und Bewertung der vielfältigen, raumbezogenen Daten zu den einzelnen Faktoren erfolgte dabei in einem Geoinformationssystem (GIS) mit Datenbankanbindung. In einer abschließenden Synthese wurden alle Faktoren zusammengeführt und hinsichtlich der Ablagerungsfreundlichkeit unterschiedlicher Naturräume Unterfrankens gegenüber MV-Schlacke bewertet. Im Modell Standortanalyse wurden Bewertungsansätze gewählt, die auf Grundlagen der FUZZY-Logik beruhen.

Als wesentliches Ergebnis der Arbeit kann festgehalten werden, daß vorwiegend die Talräume als Ablagerungsstandorte langfristig ungeeignet erscheinen sowie die sandsteindominierten (Spessart, Südrhön, Odenwald) oder vorwiegend von Kristallingestein eingenommenen (Vorspessart) Gebiete mit vergleichsweise hohen Gesamtabflußraten, hohen Durchlässigkeiten sowie geringem Puffervermögen in den Deckschichten. Aufgrund der klimatisch günstigen Position und der geeigneten Deckschichtenverhältnisse erscheinen besonders weite Teile der Mainfränkischen Platten als ablagerungsfreundlich.

Abstract

Waste incineration in the Federal Republic of Germany has become an important and environmental conscious link within the waste disposal systems. The thermal process generates a residue called municipal solid waste incineration ash, which has to be disposed or recycled. A complete separation of relevant pollutants (primarily heavy metals) through the thermal waste treatment is impossible.

An environmentally (sustainable) acceptable disposal requires that the incineration ash behaves vastly neutral in its new depositional milieu. Leaching and mobilization of pollutants from the incineration ash mainly depends on environmental conditions. Water budget and hydrogeochemical conditions in the entire depositional system are of fundamental importance. Low water budgets, pH-conditions of carbonate buffer systems and in principle lower hydraulic conductivity provide favorable and stable relations. Therefore, disposal of incineration ash is presumably advantageous where these conditions occur naturally within geological surface lithologies. Using relevant natural site parameters such as average annual runoff or surface carbonate content, several regions of Lower Franconia (Northern Bavaria) were analyzed. Assessment, management, and processing of the spatially diversified data was accomplished using a Geographic Information System (GIS) with database connection. Suitability modeling was achieved by incorporating FUZZY-LOGIC computations.

The principle result of the investigation shows that valleys and areas with predominating sandstone lithologies (Spessart, Südrhön, Odenwald) or crystalline rocks (Vorspessart) of high run-off, low carbonate buffering capacities and high permeability are not suitable for incineration ash disposal. In contrast, the greater part of the Mainfränkische Platten tends to be expedient for disposal due to promising surface geologies and climate.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung – Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Verzeichnis mehrfach verwendeter Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Ausgangslage zu Beginn der Arbeiten	3
2 Zusammensetzung, Eigenschaft und Verhalten von MV-Schlacken	5
2.1 Stoffliche und chemische Zusammensetzung	5
2.2 Gefährdungspotential in natürlicher Umgebung	6
2.3 Alterung und Eigenschaften bei Ablagerung	8
2.3.1 Hydraulische Eigenschaften	8
2.3.2 Chemische Alterungsprozesse	11
2.4 Modell Langzeitverhalten	15
2.5 Praktizierte Verwertung und Entsorgung	16
3 Einführung in den Naturraum Unterfranken	20
3.1 Räumliche Gliederung	20
3.2 Klima und Wasserhaushalt	23
3.3 Geologisch-Hydrogeologischer Überblick	24
3.3.1 Geologie	24
3.3.2 Grundwasserlandschaften	25
4 Naturräumliche Standortkriterien und Bewertungsfaktoren	32
4.1 Standortkriterien	32
4.2 Bewertungsfaktoren	33
4.2.1 Klima und Wasserhaushalt	33
4.2.2 Untergrund und Grundwasser	35
4.2.2.1 Durchlässigkeit	35
4.2.2.2 Grundwasserflurabstand	37
4.2.2.3 Hydrogeochemie	38
4.2.3 Morphologie	38
5 Datengrundlage, -verarbeitung und Bewertungsmodell	40
5.1 Datengrundlage	40
5.2 Datenverarbeitung -GIS	42
5.3 Erfassung der Basisdaten	45
5.3.1 Topographie	48
5.3.2 Quellen	48
5.3.3 Digitales Geländemodell	51
5.3.4 Niederschlag und Verdunstung	52
5.3.5 Geologie	56
5.3.6 Hydrochemie	57
5.4 Bewertungsmodell	63
5.4.1 Bewertungsmodelle zur Grundwassergefährdung	63
5.4.2 Bewertungsmodell Ablagerungsfreundlichkeit	65

5.4.2.1 Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik)	66
5.4.2.2 Modellansatz Ablagerungsfreundlichkeit	67
6 Standortanalyse.....	69
6.1 Hydrologisch-/hydrogeologische Faktoren	69
6.1.1 Gesamtabfluß	70
6.1.2 Hangneigung	73
6.1.3 Gewässernetzdichte	77
6.1.3.1 Flußdichte bezogen auf ein gleichmäßiges Flächenraster.....	80
6.1.3.2 Flußdichte bezogen auf die geologischen Flächen.....	81
6.1.3.3 Bewertung Gewässernetzdichte	86
6.1.4 Quellenposition	88
6.1.4.1 Theoretischer Grundwasserbereich	89
6.1.4.2 Grundwasserbereiche bezogen auf die geologischen Flächen.....	92
6.1.4.3 Bewertung Quellenposition.....	96
6.1.5 Tiefenbereiche	100
6.1.5.1 Position im Einzugsgebiet und morphologischer Aspekt	102
6.1.5.2 Bewertung Tiefenbereiche.....	104
6.2 Hydrogeochemische Faktoren	109
6.2.1 Übersicht	109
6.2.2 Regionalisierung.....	109
6.2.3 Carbonatanteil	110
6.2.3.1 Carbonatanteil der stratigraphischen Einheiten	112
6.2.3.2 Bewertung des Carbonatanteils	120
6.2.4 Carbonat-Sättigungsindex	123
6.2.4.1 Hydrochemischer Datensatz	124
6.2.4.2 Regionalisierung	126
6.2.4.3 Bewertung Carbonat-Sättigungsindex	128
7 Synthese	133
7.1 Fuzzy-Sets Hydrologie-Hydrogeologie	133
7.1.1 Kombination Gesamtabfluß und Hangneigung.....	134
7.1.2 Kombination Gewässernetzdichte und Quellenposition.....	135
7.1.3 Kombination Zwischenwerte und Tiefenbereich	137
7.2 Fuzzy-Sets Hydrogeochemie	142
7.3 Synthese	144
7.4 Sensitivitätsanalyse	147
8 Zusammenfassung und Schlußbetrachtung	150
8.1 Zusammenfassung	150
8.2 Schlußbetrachtung	153
9 Literaturverzeichnis	155
10 Anlagen	167
Karte 1: Naturräumliche Gliederung Unterfrankens	
Karte 2: Geologie und Relief in Unterfranken	
Karte 3: Geowissenschaftliche Spezialliteratur in Unterfranken	
Karte 4: Ablagerungsfreundlichkeit von Regionen in Unterfranken gegenüber Schlackedepositionen	
Karte 5: Aufbereitungsanlage und potentielle Transportwege für MV-Schlacken in Unterfranken	

Abbildungsverzeichnis¹⁾

Abb. 1-1: Feldlysimeter.	3
Abb. 2-1: Porenvolumen und gesättigte Wasserleitfähigkeit von MV-Schlacken und natürlich vorkommender Locker- bzw. Halbfestgesteine.	10
Abb. 2-2: Beiträge verschiedener Mineralphasen zur Alkalinität der MV-Schlacke.	15
Abb. 3-1: Klimatische Übersicht Unterfrankens.	23
Abb. 3-2: Geologische Übersichtskarte von Unterfranken.	24
Abb. 3-3: Prozentuale Flächenanteile der geologischen Einheiten.	25
Abb. 3-4: Grundwasserlandschaften in Unterfranken.	26
Abb. 4-1: Beziehungsgeflecht maßgeblicher naturräumlicher Standortfaktorengruppen.	33
Abb. 5-1: Konfiguration des Arbeitsplatzes.	46
Abb. 5-2: Schematisches Datenmodell.	47
Abb. 5-3: Abbildung GISCAD, Ausschnitt aus der TK25.	50
Abb. 5-4: Klimastationen in Franken.	53
Abb. 5-5: Landnutzungsklassen.	54
Abb. 5-6: Gesamtverdunstung und Aktuelle Verdunstung an Rebhängen.	56
Abb. 5-7: Verwendete geologische Kartengrundlagen.	57
Abb. 5-8: Datenbankstruktur.	58
Abb. 5-9: Anzahl n der Analysen der Datenbank, bezogen auf das Jahr der Probennahme.	61
Abb. 5-10: Analysen der Datenbank bezogen auf den Monat der Probennahme.	62
Abb. 5-11: Anzahl der Entnahmestellen, bezogen auf die geologischen Einheiten.	62
Abb. 5-12: Faktorengruppen Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit.	64
Abb. 5-13: Graphische Darstellung einer scharfen und unscharfen Menge.	66
Abb. 5-14: Schema des Bewertungsmodells Ablagerungsfreundlichkeit.	67
Abb. 6-1: Zugehörigkeitsfunktion Gesamtabfluß mit Darstellung des Funktionsgraphen.	70
Abb. 6-2: Durchschnittlich jährlicher Gesamtabfluß und zugehöriges Fuzzy-Set.	72
Abb. 6-3: Zugehörigkeitsgrade zur Menge AF in Abhängigkeit des Gesamtabflusses.	72
Abb. 6-4: Verfahren zur Berechnung der Hangneigung aus dem DGM nach BURROUGH (1986).	73
Abb. 6-5: Zugehörigkeitsfunktion Hangneigung mit Darstellung des Funktionsgraphen.	74
Abb. 6-6: Modellschema zur Berechnung des Fuzzy-Sets [fuzHn].	75
Abb. 6-7: Verteilung der Zugehörigkeitsgrade Hangneigung.	76
Abb. 6-8: Zusammengefaßte geologische Einheiten nach Abb. 3-2 und Gewässernetz der TK25.	78
Abb. 6-9: Einzugsgebiet der Lauer mit der Geologie.	79
Abb. 6-10: Screen dump von ARCVIEW.	80
Abb. 6-11: Flußdichten im Bezug auf die Geologischen Einheiten Unterfrankens.	82
Abb. 6-12: Zugehörigkeitsfunktion Flußdichte mit Darstellung des Funktionsgraphen.	86
Abb. 6-13: Darstellung des Zugehörigkeitsgrades ($\mu_{AF}(X)$) einer geologischen Einheit zur Menge AF.	88
Abb. 6-14: Theoretische Grundwasserbereiche.	91
Abb. 6-15: Statistik zur räumlichen Lage der Grundwasserbereiche.	92

1) Die Abbildungsunterschriften des Textes wurden teilweise gekürzt in das vorliegende Verzeichnis aufgenommen

Abb. 6-16: Quellendichte bezogen auf die Flächen der geologischen Einheiten.	94
Abb. 6-17: Zugehörigkeitsfunktion Quellenposition mit Darstellung des Funktionsgraphen.	97
Abb. 6-18: Prozentualer Flächenanteil der Zugehörigkeitsklassen bezogen auf die geol. Einheiten.	99
Abb. 6-19: Definition Tiefenbereich.	100
Abb. 6-20: Konstruktion Tiefenbereich.	101
Abb. 6-21: Bewertung Tiefenbereiche im Einzugsgebiet.	103
Abb. 6-22: Gesamtbewertung Tiefenbereich.	105
Abb. 6-23: Funktionsgraphen bei unterschiedlichen Gamma-Werten	107
Abb. 6-24: Prozentualer Flächenanteil der Klassen Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF bezogen auf die Grundwasserlandschaften Unterfrankens.	108
Abb. 6-25: Deckschichtenkarte für den Bereich Unterfranken.	120
Abb. 6-26: Statistik möglicher Zugehörigkeitsgrade zur Menge AF, ermittelt aus den geschätzten Anteilen carbonatischer Spezies am Normalprofil der stratigraphischen Einheiten.	121
Abb. 6-27 : Flußdiagramm zur Ermittlung von [FuzCa].	122
Abb. 6-28: Räumliche Verteilung der Klasse Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF.	122
Abb. 6-29: Ionenbilanz der verfügbaren Analysen.	124
Abb. 6-30: Wasserentnahmestellen in Unterfranken und angrenzender Gebiete.	125
Abb. 6-31: Carbonat-Sättigungsindices interpoliert.	127
Abb. 6-32: Häufigkeitsverteilung der Carbonat-Sättigungsindices.	128
Abb. 6-33: Häufigkeitsverteilung von pH-Wert-Schwankungen.	128
Abb. 6-34: Statistik Carbonatsättigungsindex I.	129
Abb. 6-35: Statistik Carbonatsättigungsindex II.	130
Abb. 6-36: Zugehörigkeitsfunktion Carbonatanteil mit Darstellung des Funktionsgraphen.	132
Abb. 7-1: Schema zur Ermittlung der Synthesekarte nach hydrologisch-/hydrogeologischen Faktoren.	134
Abb. 7-2: Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Fuzzy-Set Hangneigung [fuzHn] und dem Zwischenwert [fuzAH].	134
Abb. 7-3: Prozentuale Verteilung der Zugehörigkeitsklassen bezogen auf die Kombination der Fuzzy-Sets Flußdichte [fuzFd] und Quellenposition [fuzQp].	136
Abb. 7-4: Prozentualer Anteil der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad an der Gesamtfläche Unterfrankens.	138
Abb. 7-5: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche Zugehörigkeitgrad zur Menge AF.	139
Abb. 7-6: Prozentualer Flächenanteil der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF, bezogen auf die Geologischen Einheiten Unterfrankens.	140
Abb. 7-7: Vergleich zwischen den Fuzzy-Sets Carbonatanteil und Carbonat-Sättigungsindex.	142
Abb. 7-8: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF ermittelt nach hydrogeochemischen Größen.	143
Abb. 7-9: Standardabweichung zwischen den Werten der einzelnen Fuzzy-Sets.	144
Abb. 7-10: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF verschiedener Naturräume in Unterfranken – Synthesekarte.	146
Abb. 7-11: Hierarchische Rangfolge der Bewertungsfaktoren.	147
Abb. 7-12: Abweichungen der einzelnen Fuzzy-Sets vom Synthesewert.	148

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Stoffliche Zusammensetzung von Roh- und aufbereiteter MV-Schlacke aus Literaturdaten nach REGENER (1997).	5
Tab. 2-2: Chemische Zusammensetzung von Rohschlacken zusammengestellt nach KORALEWSKA (1999).	6
Tab. 2-3: Vergleich von Schwermetallkonzentrationen.	7
Tab. 2-4: Hydrophysikalische Parameter von MV-Schlacken aus bayerischen MHKW's und natürlich vorkommender Locker- bzw. Halbfestgesteine in Unterfranken (Kurzzeichen der stratigraphischen Einheiten).	9
Tab. 2-5: Maximale Feldkapazität von MV-Schlacken aus bayerischen MHKW's und in Unterfranken natürlich vorkommender Locker- bzw. Halbfestgesteine.	10
Tab. 2-6: Verwertung oder Deponierung von MV-Schlacke nach Kummer (1995).	18
Tab. 2-7: Kriterien bei der Schlackeverwertung nach der LAGA (1994).	19
Tab. 4-1: Maßgebliche naturräumliche Standortfaktoren und mögliche Alternativen.	36
Tab. 5-1: Datenbestände, die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen bzw. erhoben wurden.	41
Tab. 5-2: Hydrogeologisch relevante Übersichtsliteratur für den Regierungsbezirk Unterfranken.	42
Tab. 5-3: Datentabelle der Quellen; Daten erhoben aus der TK 25 im Digitalen Kartensystem GISCAD.	49
Tab. 5-4: Statistik der digitalisierten Quellpunkte für den Raum Unterfranken.	49
Tab. 5-5: Landnutzungsklassen nach Agrarklimatologischem Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997).	55
Tab. 5-6: Herkunft der Hydrochemischen Daten.	59
Tab. 6-1: Schematischer Ansatz zur qualitativen Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlackedepositionen anhand hydrologisch-/hydrogeologischer Milieufaktoren.	69
Tab. 6-2: Zunahme der relativen Erosion mit steigender Hangneigung (modifiziert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992).	73
Tab. 6-3: Gewichtung der Hangneigung.	106
Tab. 6-4: Gewichtung der Einzugsgebietszonen.	106
Tab. 6-5: Mittlere Carbonatgehalte stratigraphischer Einheiten in Franken (vorwiegend Ufr.).	112
Tab. 6-6: Mächtigkeitsverteilung kalkig-dolomitischer (kd), tonig-mergeliger (tm) und sandig ausgebildeter Schichten im Unteren Keuper Unterfrankens.	115
Tab. 6-7: Anteile verschiedener Gesteinsarten an Normalprofilen des Sandsteinkeupers	117
Tab. 6-8: Mächtigkeitsverteilung der Schichtglieder Feuerletten bis Unterer Lias in Ufr.	118
Tab. 6-9: Bewertung der stratigraphischen Einheiten nach ihrem geschätzten Anteil am Normalprofil	121
Tab. 6-10: Repräsentativer Carbonat-Sättigungsindex IL und nach Gleichung in Abb. 6-36 berechneter Zugehörigkeitsgrad $\mu(x)$.	132
Tab. 7-1: Zuordnung von Fuzzy-Werten (Zugehörigkeitsgrade) für die Quartären Einheiten.	135
Tab. 7-2: Rangfolge der Verbreitungsgebiete geologischer Einheiten in Unterfranken, bezogen auf den flächenmäßigen Anteil der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF.	140
Tab. 7-3: Schema zur Berechnung der Rangfolge	141
Tab. 7-4: Qualitative Beurteilungstufen im Vergleich.	145

Verzeichnis mehrfach verwendeter Abkürzungen

AF	Menge der gegenüber Müllverbrennungsschlacken ablagerungsfreundlichen Bereiche
Ag	Gesamtabfluß
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATKIS	Amtliches Topographisches Informationssystem
DGM	Digitales Geländemodell
EZG	Einzugsgebiet
Fd	Fluß- bzw. Gewässernetzdichte
GIS	Geoinformationssystem
GÜK	Geologische Übersichtskarte
Hn	Hangneigung
IL	Carbonat-Sättigungsindex
$\mu_{AF(X)}$	Zugehörigkeitsfunktion zur Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades zur Menge AF
m	arithmetischer Mittelwert
MV-Schlacke oder Schlacke	Müllverbrennungsschlacke
n	Anzahl
Qp	Quellenposition
SQL	Structured Query Language
St	Standardabweichung
Tb	Tiefenbereich
TK25	Topographische Karte im Maßstab 1:25.000
TVO	Trinkwasserverordnung

Geologische Kurzzeichen:

b	Basalt (untergeordnet Tuffite sowie sonstige tertiäre Sedimente)
K	Kristallin
kmf/j	Feuerletten , Rhätlias-Übergangsschichten, Unterster Lias
ku, kmg, kms	Unterer Keuper, Gipskeuper und Sandsteinkeuper
mu, mm, mo	Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk
q	Quartär ungliedert (überwiegend Talfüllungen, Schotterflächen und Hangschutt)
qL	Löß
Sa	Flugsand
su, sm, so	Unterer, Mittlerer und Oberer Buntsandstein
z/ro	Zechstein, Rotliegendes

1 Einleitung

Dem Naturraum kommen vielfältige Nutzungsfunktionen zu, die in Konkurrenz und im Regelfall in Konflikt zur Ökologie stehen. Die Voraussetzungen für eine nachhaltige ökologische Nutzung des Naturraumes werden bereits in der regionalen Raumplanung geschaffen. Wichtige Grundlagen hierbei stellen insbesondere regionale Kartenwerke dar, die einerseits konkurrierende Nutzungen (z. B. Siedlung, Verkehr, Rohstoffgewinnung, Ver- und Entsorgung), aber andererseits auch die ökologische Empfindlichkeit des dabei in Anspruch genommenen Naturraums darstellen.

In den sechziger und siebziger Jahren war die Erstellung solcher umfassenden Kartenwerke aufgrund der gegebenen technischen Möglichkeiten sehr begrenzt. Erst mit der Entwicklung und Verbreitung leistungsfähiger Rechnersysteme und entsprechender Software in den achtziger und neunziger Jahren war die Basis geschaffen, die Vielzahl an komplexen Daten raumbezogen zu behandeln. Die zentrale Aufgabe der Datenaufbereitung, -regionalisierung und -auswertung übernahmen dabei Datenbanksysteme (DBS) und Geoinformationssysteme (GIS).

Eine problematische Nutzungsfunktion besteht heute besonders in der Entsorgung bzw. Ablagerung mehr oder minder stark belasteter Reststoffe, die vor allem Boden und Grundwasser gefährden. Hierzu zählen u. a. Schlacken aus der Müllverbrennung. Die allgemein fortschreitende Flächeninanspruchnahme, ein zunehmendes Aufkommen von Schlacken sowie der vorrangige Schutz des Naturraums erfordern daher regionale, standortangepasste Entsorgungsstrategien. Die regionale Analyse naturräumlicher Gegebenheiten spielt bei der Frage nach geeigneten Ablagerungsstandorten eine übergeordnete Rolle; sie ist wesentlicher Bestandteil vorsorgeorientierter Ansätze bzw. Lösungen insbesondere zur umweltverträglichen Ablagerung von Schlacken.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Müllverbrennung hat sich in der BRD als wichtiges Glied in der Entsorgungskette etabliert. Etwa ein Drittel des jährlichen Gesamtrestmüllaufkommens von 40 Millionen Tonnen geht in die thermische Verwertung, bei der ein Rückstand von ca. 3 - 4 Millionen Tonnen pro Jahr bleibt. Restmüll, der verbrannt bzw. energetisch genutzt wird, setzt sich zusammen aus Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Sperrmüll und Klärschlamm. Pro Tonne verbrannten Restmüll entstehen ca. **250 – 450 kg Schlacke** und 4 – 5 kg Flugasche. Der rechtliche Rahmen schreibt vor, Schlacke vorrangig zu verwerten. In der Entsorgungs- bzw. Verwertungspraxis wird ein Teil der produzierten Schlacke als Bauersatzstoff verwendet oder als Versatzmaterial untertage verbracht. Das restliche Material wird deponiert, wenn es den Qualitätsanforderungen zur Verwertung nicht genügt oder keine Möglichkeit zur Verwertung besteht.

Schlacke stellt nach der Aufbereitung ein heterogenes Gemisch aus Asche, silikatischen Schmelzprodukten und abfallspezifischen Durchläufermaterialien (z. B. Glas, Steine) dar. Dieses körnige, poröse Material enthält Salze wie Chloride und Sulfate, Schwermetalle wie Kupfer, Nickel, Blei und Zink sowie organische Verbindungen (KORALEWSKA, 1999). Das Gefährdungspotential der Schlacke liegt vorwiegend in den erhöhten Schwermetallkonzentrationen.

Bei der Verwertung bzw. Ablagerung der Schlacke kommt der Umgebung (Naturraum) eine besondere Bedeutung zu, denn diese übt langfristig einen wesentlichen Einfluß auf das hydraulische und hydrogeochemische Verhalten der Schlacke aus und damit auch auf die Freisetzung von Schwermetallen. Aus dem Verhalten der Schlacke einerseits und den vielfältigen Eigenschaften des Naturraums andererseits, ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten, die Eignung eines Standortes für Schlackeablagerungen zu beurteilen. Besondere Beachtung gilt, neben verschiedenen konkurrierenden Nutzungen, dem Schutzgut Grundwasser. Dabei nimmt die Grundwasserüberdeckung als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine übergeordnete Rolle ein.

In der vorliegenden Arbeit werden relevante naturräumliche Faktoren definiert, die qualitative Aussagen zur Eignung verschiedener Naturräume Unterfrankens gegenüber Schlackeablagerungen zulassen. Hierzu tragen zahlreiche Arbeiten verschiedener Autoren bei, die das Verhalten der Schlacke bereits unter definierten Ablagerungsbedingungen untersucht haben. Vor dem Hintergrund der zeit- und kostenaufwendigen Datenerhebung und -eingabe sowie der prinzipiellen Datenverfügbarkeit können für den gewählten Untersuchungsraum Unterfranken jedoch nicht alle Faktoren berücksichtigt werden. Die Auswahl der Faktoren erfolgt daher nach Daten, die mehr oder weniger flächendeckend für Unterfranken vorliegen oder zumindest entsprechende Generalisierungen zur flächendeckenden Bearbeitung des Untersuchungsraumes ermöglichen. Infolge dessen liegt ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit in der Datenrecherche zu den wichtigen naturräumlichen Faktorengruppen Klima, geologischer Untergrund, Grundwasser und Morphologie bzw. Topographie. Die Vielfalt an Daten unterschiedlicher Quellen und Jahrgänge werden gesichtet, soweit möglich verifiziert und gemäß ihrer späteren Verwendung digital aufbereitet. Die Aufbereitung, Regionalisierung und Auswertung der Daten erfolgt dabei im Rahmen eines Geoinformationssystems (GIS). Das GIS muß in der Lage sein, die vielfältigen Formate zu verarbeiten, mit Verfahren aus der Statistik und Stochastik (z. B. Fuzzy-Logik) auszuwerten und in frei wählbaren Maßstäben darzustellen. Dies setzt gleichsam systematisch bzw. einheitlich aufgebaute und auf ein gemeinsames Bezugssystem referenzierte digitale Datenbestände voraus, welche dann der regionalen Standortanalyse als Basisdaten zugrunde gelegt werden können.

Als primäres Ziel der Standortanalyse wird eine vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Naturräume Unterfrankens bezüglich ihrer Ablagerungseignung gegenüber Schlacke anhand der ausgewählten Bewertungsfaktoren angestrebt. Die räumliche Differenzierung soll dabei u. a. nach den geologischen Einheiten erfolgen, da insbesondere die Grundwasserverhältnisse und spezifischen Untergrundeigenschaften als bedeutende Bewertungsfaktoren eng mit diesen zusammenhängen. In Abhängigkeit der zur Anwendung kommenden Maßstäbe sollen die im Rahmen des GIS erstellten Ergebniskarten für Übersichtsdarstellungen und als Grundlage für regionale Planungen sowie als Ansatz für weitere Detailuntersuchungen dienen.

1.2 Ausgangslage zu Beginn der Arbeiten

An der Universität Würzburg, Institut für Geologie, Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie & Umwelt, wird derzeit ein vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStLMU) gefördertes Forschungsvorhaben (F151 *Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum*) durchgeführt. Gegenstand der Forschungsarbeiten sind Langzeitbeobachtun-

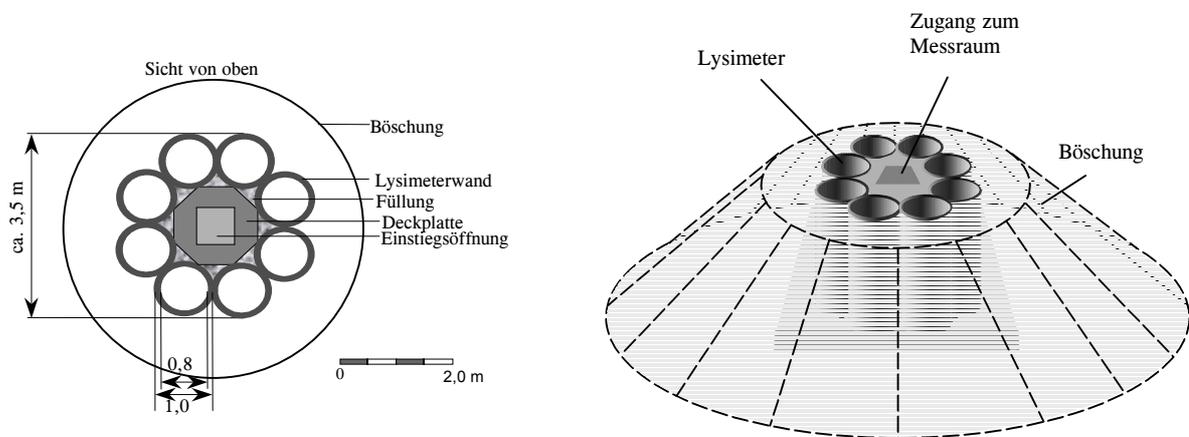


Abb. 1-1: Maßstabsgetreue Draufsicht (links) und schematische Perspektive (rechts) der Feldlysimeteranlage des Forschungsvorhabens F151 *Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum*.

gen an naturnahen Ablagerungssystemen. In Freilandversuchen (Lysimeter, vgl. Abb. 1-1) wird dabei das hydraulische und hydrogeochemische Verhalten verschiedener Materialkombinationen studiert. Zum Einsatz im Schichtaufbau der Lysimeter kommen flächenhaft verbreitete Gesteinsmaterialien mit vorwiegend halbfester Konsistenz und Schlacken aus der Müllverbrennung. Das BayStLMU genehmigte 1998 in diesem Zusammenhang ein Forschungsvorhaben zur GIS-gestützten Untersuchung der Ablagerungseignung unterschiedlicher Naturräume Unterfrankens gegenüber Schlacke.

Als grundlegende Arbeiten sind hierzu besonders die Veröffentlichungen von JOHNSON (1994), JOHNSON et al. (1995), HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997), HUBER et al. (1997) sowie KORALEWSKA (1999) zu nennen, die neben eigenen Untersuchungsergebnissen auch einen detaillierten Forschungsstand zum Ablagerungsverhalten von Schlacke unter definierten Randbedingungen wiedergeben. BACCINI et al. (1994) gelten als gedankliche Wegbereiter der Arbeit. Sie haben sich insbesondere mit den Fragen auseinandergesetzt, wie ein zur Endlagerung anstehender Reststoff beschaffen sein muß, was dabei unter Immissionsneutralität zu verstehen ist und welche Bedeutung dem geologischen bzw. natürlichen Rahmen zukommt. Dieser zentrale Grundgedanke wurde bereits in der Arbeit von HAHN (1988) angeschnitten, wo die Immissionsneutralität einer Ablagerung nicht alleine nach der Eigenschaft des abgelagerten Materials (Reststoff), sondern gleichermaßen nach dem Ablagerungsstandort beurteilt werden muß.

2. Zusammensetzung, Eigenschaft und Verhalten von MV-Schlacken

2.1 Stoffliche und chemische Zusammensetzung

MV-Schlacken stellen ein heterogenes Stoffgemisch dar. Die Beschaffenheit hängt dabei maßgeblich von der Zusammensetzung des Verbrennungsinputs ab. Im allgemeinen wird unterschieden zwischen Roh- und aufbereiteter Schlacke. Die durchschnittliche Zusammensetzung wurde nach REGENER (1997) aus Literaturwerten wie folgt zusammengefaßt:

Tab. 2-1: Stoffliche Zusammensetzung von Roh- und aufbereiteter MV-Schlacke aus Literaturdaten nach REGENER (1997)

Stoffgruppe	MV-Rohschlacke [Gew. %]	Aufbereitete MV-Schlacke [Gew. %]
Aschen, Schlacken		30 – 80
Glas, Keramik	80 - 85	10 – 70
Naturstein etc.		0 – 20
Eisen- und Nichteisen-Metalle	8 – 10	1 – 2
Unverbranntes	3 - 5	< 1
Überkorn	4 – 5	0

Streng genommen entsprechen die Hauptbestandteile der MV-Schlacke einem Gemisch aus Aschen und Schlacken. Die Aschen setzen sich zusammen aus anorganischen Rückständen, Rußpartikeln, nichtbrennbaren Staubpartikeln und feinkörnigem Abrieb von Glas, Keramik- und Metallkomponenten (REGENER, 1997). Die Schlackepartikel hingegen sind aufgeschmolzene, teils gerundete feste Klumpen mit einer porösen, überwiegend glasigen Matrix. Petrographische Untersuchungen von LICHTENSTEIGER (1996) ergaben, daß die MV-Schlacken aus Aschen und Schmelzprodukten, die zusammen die Matrix bilden, sowie materialspezifischen Komponenten bestehen. Nach KORALEWSKA (1999) ist die Matrix sehr porös und erreicht bisweilen eine Gesamtporosität von 50 %. Mehr als zwei Drittel aller Poren sind kommunizierend, erlauben somit einen ungehinderten Stofftransport und bieten Raum für Mineralneubildungen und Wiederausfällungen.

Aus der Tabelle 2-2 ist die chemische Zusammensetzung der MV-Schlacke in ihrer Bandbreite aufgelistet. Es wird deutlich, daß es sich bei den Komponenten der Schlacke um calcium-, aluminium- und silikatreiche Phasen handelt, die mit mehr oder weniger Eisen durchsetzt sind. Nach REGENER (1997) bleiben die eisenhaltigen Rückstände auch nach der Metallabscheidung relativ hoch.

Tab. 2-2: Chemische Zusammensetzung von Rohschlacken zusammengestellt nach KORALEWSKA (1999)

Element	vor 1990 [g/kg]	nach 1990 [g/kg]	1994/95 [g/kg]	1996/97 [g/kg]
Hauptbestandteile				
Silicium	168 – 215	140 – 230	k. A.	203
Calcium	35 – 100	30 – 140	k. A.	69 – 108
Aluminium	80 – 180	5 – 95	k. A.	27 – 46
Eisen	40 – 230	20 – 110	k. A.	42 – 59
Natrium	10 – 60	5 – 35	k. A.	6,4 – 20
Kohlenstoff	15 – 40	5 – 50	k. A.	k. A.
Magnesium	6 – 18	4 – 18	k. A.	7,1 – 14
Kalium	5 – 20	3 – 21	k. A.	4,5 – 9,3
Phosphor	7 – 14	3 – 34	k. A.	3,4 – 11,2
Schwefel	2 – 4	2 – 4	k. A.	1,6 – 24,7
Chlor	2 – 6	0,3 – 6,3	k. A.	0,6 – 9,1
Glühverlust	1,0 – 8,0 [%]	0,5 – 7,9 [%]	k. A.	1,5 – 6,2 [%]
Spurenelemente				
Zink	4 – 15	0,5 – 21	1 – 6,9	0,7 – 5,3
Kupfer	1 – 4	0,2 – 7,0	0,89 – 5,9	0,8 – 6,2
Blei	1 – 17	0,6 – 5,2	0,4 – 3,6	0,003 – 5,2
Chrom	1 – 10	0,1 – 9,6	0,01 – 0,74	0,003 – 0,45
Fluor	k. A.	0,02 – 1,1	k. A.	k. A.
Nickel	0,1 – 0,3	0,04 – 0,76	0,05 – 0,26	0,05 – 0,35
Arsen	k. A.	0,003 – 0,002	0,0002 – 0,024	0,002 – 0,035
Cadmium	0,01 – 0,03	0,001 – 0,082	0,0002 – 0,046	0,00005 – 1,1
Quecksilber	0,0001 – 0,0007	0,0001 – 0,02	0,000002 – 0,075	0,000005 – 0,00005
Zinn	k. A.	0,2 – 1,7	k. A.	k. A.
Dioxin-TE-Werte	k. A.	7,2 – 25 [ng/kg]	k. A.	0,0001 – 0,08 [μ g/kg]

HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) sehen die Müllverbrennungsschlacke in einer zusammenfassenden Betrachtung als eine sehr komplexe Vergesellschaftung von Durchläufer- und neugebildeten Phasen, sowohl kristalliner, als auch amorpher Art, die in dieser Zusammenstellung in der Natur so nicht vorkommt; sie sind thermodynamisch nicht stabil und bergen daher ein sehr hohes Reaktionspotential (BACCINI et al., 1994).

2.2 Gefährdungspotential in natürlicher Umgebung

MV-Schlacken enthalten Phasen, die nur bei hohen Temperaturen stabil sind, nicht dagegen unter Ablagerungsbedingungen. JOHNSON (1994) bezeichnet sie daher, geochemisch gesehen, als sehr reaktiv und das über einen sehr langen Zeitraum. Vergleicht man nun die Schlacke mit natürlichen

Gesteinen, so wird sie z. B. nach HUBER et al. (1997) aufgrund ihrer silikatischen Matrix als erdkrustenähnliches Material bezeichnet. Sie unterscheidet sich allerdings in einigen wesentlichen Punkten von weitverbreiteten natürlichen Gesteinen (verändert nach HUBER et al., 1997):

- Schlacke enthält sehr viele Metalle in elementarer Form wie Kupfer, Eisen, Zink, Blei und Aluminium.
- Schlacke enthält basische Metalloxide, wie Calcium- oder Magnesiumoxid, welche in der Natur nicht stabil vorkommen. Beim Kontakt mit Wasser bilden sie in einem exothermen Prozeß Hydroxide.
- Man findet in Schlacken eine Mischung von leichtlöslichen (Chloride, Sulfate) und schwerlöslichen (Sulfide, Phosphate, Schwermetallhydroxide) Salzen, sowie ein breites Spektrum an verschiedenen Schwermetallen, wie es weit verbreitete natürliche Gesteine (z. B. Kalk-, Sand- und Tonsteine, Granite, Basalte u. w.) in diesen Konzentrationen nicht enthalten (Ausnahme bilden Gesteine und geologische Formationen mit Lagerstättencharakter).
- Schlacke enthält einen gewissen Anteil an organischem Kohlenstoff.
- Die silikatische Matrix ist z. T. verglast. Die bei der Aufschmelzung bzw. Versinterung entstandenen Gläser sind sehr verwitterungsanfällig (Palagonitisierung). Als Vergleich bieten sich glasreiche, vulkanische Gesteine an.

Allgemein bekannt und zentral bei der Bewertung des Gefährdungspotentials und der ökotoxikologischen Relevanz ist der gegenüber dem geogenen Hintergrund höhere Gehalt an Schwermetallen (vgl. Tab. 2-3).

Tab. 2-3: Vergleich von Schwermetallkonzentrationen

Schwermetall	Konzentration im Restmüll [ppm]	Konzentration in MV-Schlacke [ppm]	Konzentration in Gesteinen [ppm]
Zink	1100	1500	Amphibol bis 5000
Blei	810	1800	Granit bis 150 Kalkstein bis 200
Kupfer	480	1500	Schiefer bis 300 Gabbro bis 400
Cadmium	11	2,2	Schwarzschiefer bis 11
Quecksilber	1,8	0,4	Durchschnitt Erdkruste 0,08

Lagert man die Schlacke in natürlicher Umgebung ab, so muß die langfristige Entwicklung ihres Emissions- und damit Gefährdungspotentials im jeweiligen Ablagerungsmilieu, als Maß für die Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden. So finden über lange Zeiträume chemische Reaktionen

in der Schlacke statt, die die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Materials verändern und den Austrag von Schadstoffen kontrollieren; als Hauptreaktionspartner sind dabei Wasser, Luft und CO₂ nennen. Die Intensität der unterschiedlichen Prozesse wird maßgeblich durch die Eigenschaften der Schlacke selbst und durch deren chemisch-physikalischen Umgebung (Atmosphäre, Pedosphäre, Lithosphäre) beeinflusst. **Das Gefährdungspotential der Schlacke liegt langfristig in der Schwermetallfreisetzung und ist nicht statisch sondern dynamisch zu betrachten.**

2.3 Alterungsprozesse und Eigenschaften der Schlacke bei Ablagerung

Die Alterungsprozesse und Eigenschaften der Schlacke bei Ablagerung zeigen relevante Mechanismen auf, die das dynamische Gefährdungspotential (Schwermetallfreisetzung) kontrollieren. Die Geschwindigkeit der Prozesse hängt maßgeblich von der chemischen Umgebung, der zur Verfügung stehenden reaktiven Oberfläche und der Durchlässigkeit für Wasser und Luft ab. Da bislang noch gezielte Untersuchungen zum Verhalten der Schlacke in einer natürlichen Ablagerungsumgebung fehlen, stützen sich die folgenden Ausführungen überwiegend auf Untersuchungen zum Deponieverhalten (HIRSCHMANN & FÖRSTNER, 1997; JOHNSON, 1994; KERSTEN, MOOR & JOHNSON, 1995; HUBER et al., 1997; BACCINI et al 1994; ZEVENBERGEN & COMANS, 1994; BELEVI, STAEMPFLER & BACCINI 1992; u. w.) bzw. zum Verhalten der Schlacke als Material im Straßenbau (GOETZ & GERWINSKI 1989; KRÄUCHI et al., 1995). Zur Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften wurden auch eigene, im o. g. Forschungsvorhaben durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse herangezogen.

2.3.1 Hydraulische Eigenschaften

Nach einigen Autoren (HUBER et al., 1997; HIRSCHMANN & FÖRSTNER, 1997) hängt der Austrag von Schadstoffen aus der Schlacke sehr stark vom Feststoffliquiditätsverhältnis (Wasser/Schlacke) ab. Dies konnten HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) mittels Lysimeterversuchen nachweisen. Über das langfristige, hydraulische Verhalten der Schlacke können jedoch derzeit nur Annahmen getroffen werden, da weit über den möglichen Beobachtungszeitraum hinaus stattfindende Reaktionen (z. B. Carbonatisierung, Hydratation) die physikalischen Eigenschaften des Materials erheblich verändern können. HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) diskutieren z. B., wie durch Neubildung von Fe-Hydroxiden und Tonmineralen die Porosität und damit die Durchlässigkeit über lange Zeiträume beeinflusst wird. In Lysimeterversuchen haben sie bereits nach einem Jahr die Bildung von Krusten und Oberflächen beobachtet, vermuten aber, daß diese Vorgänge auch in größeren Zeiträumen den Porenquerschnitt nicht maßgeblich verändern. Infolge der bekannten und z. T. intensiven Fällungs-

reaktionen während der „Alterung“, deren Dauer sich allerdings über Jahrhunderte bis Jahrtausende erstrecken kann, muß mit einer Porenverengung in der Schlacke gerechnet werden. So läßt die fortschreitende Verfestigung während der Alterung - nach REICHEL (1996) werden hierfür hauptsächlich die Umwandlung von Calciumhydroxid in Calciumcarbonat sowie generell die Fällung von Calciumcarbonat aus der Lösung und nach LIECHTENSTEIGER & ZELTNER (1994) auch die Bildung von C-S-H-Phasen aus amorphen SiO₂-Verbindungen und Calciumhydroxidphasen verantwortlich gemacht - einerseits eine Verbesserung der Raumbeständigkeit aber andererseits auch eine Abnahme wasserwegsamere Porenräume vermuten. Untersuchungen von SCHNEIDER et al. (1994) haben zudem ergeben, daß der Anteil an mergeligen und tonigen Bestandteilen infolge der Verwitterung eher zunimmt, was die Wasserleitfähigkeit erniedrigen und das Wasserspeichervermögen erhöhen dürfte.

Tab. 2-4: Hydrophysikalische Parameter von MV-Schlacken aus bayerischen MHKW's und natürlich vorkommender Locker- bzw. Halbfestgesteine in Unterfranken (Kurzzeichen der stratigraphischen Einheiten).

Material	k _r -Wert [m/s]	Glühverlust [Gew.-%]	Kalkgehalt [Gew.-%]	Feststoffdichte [g/cm ³]	Porenvolumen [%]
Schlacke A	4,9 E-04	4,3	31 bis 35	2,86	49 bis 53
Schlacke B	2,8 E-03	8,5	25 bis 30	2,39	48 bis 55
Schlacke C	6,5 E-04	4,1	35 bis 42	2,31	42 bis 46
Schlacke D	1,6 E-04	4,7	20 bis 27	2,41	31 bis 36
kmg (Tonmergelstein)	1,2 E-08	2,3	19 bis 25	1,85	16 bis 22
ku (dolomitischer Tonmergelstein)	8,5 E-07	1,9	13 bis 17	2,72	13 bis 17
mm (dolomitischer Kalkmergelstein)	4,6 E-07	3,1	40 bis 70	2,23	22 bis 27
qL (carbonatischer Löß)	8,9 E-08	4,9	10 bis 15	2,03	30 bis 38

Aus den Laboruntersuchungen des Forschungsvorhabens wurden für unterschiedlich gealterte Schlacken aus unterschiedlichen Kraftwerken in Bayern gesättigte Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen $2,8 \cdot 10^{-3}$ und $6,5 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt (vgl. Tab. 2-4). Im ungesättigten Zustand sinkt die Wasserleitfähigkeit mit abnehmendem Wassergehalt in der Schlacke. Die Beziehung zwischen der Wasserleitfähigkeit und dem Wassergehalt wird im wesentlichen durch die Porenraumgeometrie und damit vom Korngrößenspektrum bestimmt. Als Maß kann hier vereinfacht die Feldkapazität angegeben werden, die jene Wassermenge beschreibt, die ein Boden (Lockergestein) gegen die Schwerkraft zurückhalten kann.

Im Labor wurden bei den untersuchten Schlacken maximale Feldkapazitäten zwischen 420 und 570 mm/m ($\text{mm} = 1/\text{m}^3$) ermittelt, was im Vergleich zu natürlich vorkommenden Locker- bzw. Halbfestgesteinen in Unterfranken als sehr hoch einzustufen ist (vgl. Tab. 2-4). Betrachtet man jedoch das zugehörige Kornspektrum der Schlacken, dann sollten die Feldkapazitäten wesentlich niedriger liegen. Nach dem Tabellenwerk der AG BODEN (1994) läßt sich anhand der Korngrößenverteilung eine Feldkapazität zwischen 100 und 250mm abschätzen, was die Speichereigenschaften der Schlacke eher widerspiegeln dürfte. Hierzu zeigt auch das Diagramm der Abbildung 2-1, daß aufgrund der üblichen Kornspektren von Schlackematerialien und dem Verhältnis Durchlässigkeitsbeiwert - Po-

renvolumen im Vergleich zu den aufgeführten natürlichen ein wesentlich geringeres Wasserspeichervermögen anzunehmen ist.

Tab. 2-5: Maximale Feldkapazität von MV-Schlacken aus bayerischen MHKW's und in Unterfranken natürlich vorkommender Locker- bzw. Halfestgesteine.

Material	max. Feldkapazität	Bei 1m mächtiger Schicht
	[%]	[mm]
Schlacke A	51 bis 54	510 bis 540
Schlacke B	45 bis 57	450 bis 570
Schlacke C	42 bis 50	420 bis 500
Schlacke D	49 bis 54	490 bis 540
kmg	40 bis 48	400 bis 480
ku	33 bis 39	330 bis 390
mm	35 bis 41	350 bis 410
qL	41 bis 47	410 bis 470

Vermutlich sind die im Versuch ermittelten hohen Feldkapazitäten auf interne Reaktions- und insbesondere Hydratationsvorgänge zurückzuführen. So werden bei Kontakt der Schlacke mit Wasser zunächst hohe Anteile dessen durch derartig chemische (z. T. auch physikalische) Vorgänge gebunden.

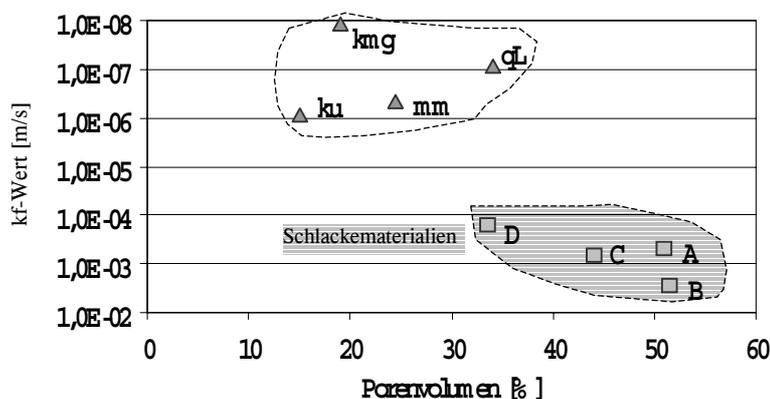


Abb. 2-1: Graphische Gegenüberstellung des mittleren Porenvolumens und der gesättigten Wasserleitfähigkeit von MV-Schlacke aus bayerischen MHKW's (A-D) und natürlich vorkommender Locker- bzw. Halfestgesteine in Unterfranken (gekennzeichnet durch zugehörige stratigraphische Einheit, Kurzzeichen).

Bei abgelagerter (endgelagerter) Schlacke ist sowohl eine gute Wasserleitfähigkeit als auch eine niedrige Feldkapazität anzustreben, da dies gleichzeitig eine kurze Verweilzeit des Sickerwassers und damit auch die Gefahrminderung der Schadstofflösung und -mobilisation bedeutet. Andererseits können hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeiten und Feldkapazitäten - z. B. durch inhomogene Verteilung der Komponenten oder Ausbildung wasserwegsamere Kanäle - zur verstärkten Verlage-

rung und Auswaschung der Feinanteile bei stärkerem Wasserfluß führen. Dabei wird das allmähliche Verstopfen der Poren und die Bildung geringleitender Passagen begünstigt bei gleichzeitig höherer Verweil- und Reaktionszeit zwischen Wasser und Schlacke. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung ist es allerdings schwer zu beurteilen, wie die hydraulischen Eigenschaften der Schlacke sich langfristig verändern werden. Nach Abklingen der Hydratationsvorgänge und unter Voraussetzung, daß sich ein Großteil der wasserwegsamem Porenräume erhält, kann die Schlacke als Schicht innerhalb eines naturnahen Ablagerungssystems oder bei allgemeinen Wasserhaushaltsbetrachtungen generell als Wasserleiter bezeichnet werden.

2.3.2 Chemische Alterungsprozesse

Bei den Verwitterungs- und Alterungsprozessen, denen die Schlacke nach Ablagerung unterliegt, ist für eine Schwermetallfreisetzung insbesondere die Entwicklung der Säurepufferkapazität bzw. Säureneutralisationskapazität (SNK) oder englisch auch als Acid Neutralisation Capacity (ANC) bezeichnet, von Bedeutung. Eine Verringerung der SNK bedeutet eine sukzessive Auswaschung potentieller Puffersubstanzen. Als Variablen fungieren hierbei das Redoxpotential und der pH-Wert, sie werden im wesentlichen durch den Eintrag von Sauerstoff und Kohlendioxid (mit Wasser oder Luft) kontrolliert. Nachfolgend werden die wichtigsten Prozesse während der Schlackeverwitterung zusammengefasst, die sowohl die SNK (Auflösung oder Bildung von Pufferphasen) als auch die pH-Wert-Entwicklung steuern können :

- Mobilisierung leicht löslicher Bestandteile (z. B. Chlorid, Sulfat)
- Hydratation (Bildung von Hydroxiden, z. B. $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$)
- Carbonatisierung (z. B. Bildung von Calcit, Metallcarbonate unter Anwesenheit von CO_2)
- Biologische Restreaktivität (Abbau organischer Substanz, CO_2 -Bildung, Schwermetallkomplexierung)
- Oxidation von elementaren Metallen und Sulfiden
- Verwitterungsprozesse der Glasmatrix zu tonartigen Strukturen (Palagonitisierung)
- Kristallneubildungen (z. B. Quarz, Magnetit, Chromit, Bornit, Pyrit)

Insbesondere nach den Untersuchungen von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997), HUBER et al. (1997) sowie KERSTEN et al. (1995), werden im pH-Bereich zwischen 11 und 7 (6,5) in der Schlacke-Bodenlösung nur sehr geringe Mengen an Schwermetallen freigesetzt. Für die geringen Konzentrationen klassischer Schwermetalle (Zn, Pb, Cd, Cu, Cr) im Sickerwasser werden hauptsächlich Hydroxidphasen und Adsorption an Eisenhydroxide (Cu, Ni, Cd) oder sekundär gebildete Speicherminerale (C-A-S-H-Phasen, gilt insbesondere für Pb, Zn, Cr(IV)) verantwortlich gemacht (JOHNSON

et al., 1995). Im stark alkalischen Bereich ($\text{pH} > 11$) muß mit einer erhöhten Freisetzung amphoterer Metalle (z.B. Zn, Al) gerechnet werden, sie zeigen aufgrund der Bildung negativ geladener Hydroxokomplexe bei pH-Werten um 12 ein verstärktes In Lösung gehen. Unterhalb des neutralen pH-Wertes 7 oder nach HUBER et al. (1997) ab pH 6,5 setzt eine verstärkte Freisetzung fast aller Schwermetalle, aber in unterschiedlichen Konzentrationen ein. Aufgrund der pH-gesteuerten Schwermetallfreisetzung, stehen die möglichen Säurebildungsmechanismen und die Bildung und Stabilisierung von Säurepuffersubstanzen im Zentrum bei der Erörterung des Alterungsverhaltens der Schlacke in natürlicher Umgebung und damit bei der Ableitung relevanter hydrogeochemischer Standortfaktoren.

Organische Restreaktivität

Nach HUBER et al. (1997) können mikrobielle Prozesse erst in nennenswertem Umfang einsetzen, wenn der ursprüngliche pH-Wert der zuerst stark alkalisch reagierenden Schlacke auf unter 10 absinkt. Der Abbau führt zur zusätzlichen Bildung von CO_2 und organischen Säuren, was eine pH-Wert-Absenkung zur Folge hat. Ebenso können Schwermetalle durch Komplexbildung verstärkt mobilisiert werden. Nach HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) enthalten MV-Schlacken je nach Ausbrand zwischen 0,5 – 2 Gew% organischen Kohlenstoff (OC), HUBER et al. (1997) ermittelten bei ihren untersuchten Schlacken einen OC von 11 g/kg (1,1 Gew%) TS, wobei kurzfristig nur ca. 500 – 700 mg/kg TS für den mikrobiellen Abbau zur Verfügung stehen. Auch PRIESTER et al. (1996) und KOWALCZYK et al. (1995) stellten fest, daß ein großer Teil des Kohlenstoffs in Form von Graphit vorliegt, also mikrobiell nicht verfügbar ist. HIRSCHMANN & FÖRSTNER bestätigen mit ihren Lysimeterversuchen daß der konkrete mikrobielle Abbau organischer Substanz sehr gering ist, da trotz etwaiger Hemmungen infolge des hohen pH-Wertes oder gar suboptimaler Wassergehalte die mikrobielle Tätigkeit schnell erschöpft ist. Sie sehen die Hauptursache im Mangel an leicht abbaubaren organischen Verbindungen, die, vor allem leichter wasserlösliche Alkane und Fettsäuren, mit dem Sickerwasser schnell ausgetragen werden, so daß auch längerfristig kein verstärkter mikrobieller Abbau zu erwarten ist.

Metall- und Sulfidoxidation

Der Oxidation, der in den MV-Schlacken auftretenden Sulfiden, wird von BACCINI et al. (1994) als Säurebildungsprozess erhebliche Bedeutung zugemessen. Die Schlacken weisen zunächst reduzierende Redoxverhältnisse auf (FÄLLMANN & HERTLEN, 1994). Durch zunehmenden Sauerstoffzutritt entwickelt sich ein aerobes Milieu in dem die oxidierenden Sulfide erhebliche Mengen an Säuren freisetzen können. BACCINI et al. (1994) ermittelten in Rohschlacken bis zu 50 % des Gesamtschwefelgehaltes als Sulfidschwefel. Der Anteil der Sulfidoxidation an der Reduzierung des SNK bei pH 7,5 beläuft sich beispielsweise mit einer H^+ -Produktion von 0,05 - 0,2 meq / g TS auf ca. 5% (BACCINI et al. 1994, JOHNSON et al. 1995). Die Tatsache, daß HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997)

nach intensivster Laugung im Lysimeter keinen deutlichen Rückgang des SNK-Wertes feststellen konnten, zeigt, daß interne Säurebildungsprozesse wie die Sulfidoxidation nur in sehr geringem Maße stattfinden. Sie weisen auch auf eine schnell ablaufende Oxidation der Metalle und Legierungen hin, wobei die dadurch frei werdenden Schwermetalle nicht ausgetragen werden, sondern in Neubildungen (Carbonate, Fe/Al-Phosphate, Phosphhydrate, Fe/Al-Hydroxide, C-S-H-Phasen, Ettringit) eingebaut werden. Auch HUBER et al. (1997) stellten bei ihren Untersuchungen fest, daß die Sulfid- und Metalloxidation sehr schnell verlaufen aber nicht zu einer wesentlichen Absenkung des SNK-Wertes führen.

C-S-H-Phasen

Die Calciumsilikathydratbildung vollzieht sich im alkalischen pH-Bereich ($\text{pH} > 9,5$). Die neugebildeten Phasen verhalten sich während der Schlackeverwitterung sehr instabil und tragen nur in geringen Maßen zur Säurepufferung bei. JOHNSON et al. (1995) fanden jedoch heraus, daß die C-S-H-Phasen eine erhebliche Sorptionskapazität für die Schwermetalle Zn, Pb und Cd aufweisen, wobei Cu und Ni in ihren jeweiligen Hydroxidphasen gebunden bleiben. C-S-A-H-Phasen können aber auch länger beständig bleiben, wie es z. B. Untersuchungen an gallisch-römischen Mörtel ergaben (RASSINEUX et al., 1989). Dort haben sich um die Phasen Calcitkrusten gebildet, die CO_2 -haltige Wässer abpuffern und somit das Auslaugen bzw. Carbonatisieren der Phasen auch über längere Zeiträume verhindern.

Carbonatisierung

Die Konkurrenzreaktion zur C-S-H-Bildung stellt die Carbonatisierung der Hydroxide dar. Sie bewirkt eine Stabilisierung der Säurepufferkapazität, da das neu gebildete Carbonat wesentlich schwerer löslich ist, aber in gleichem Maße zur Säurepufferkapazität beiträgt (HIRSCHMANN & FÖRSTNER, 1997). Generell begünstigt wird die Carbonatisierung durch einen erhöhten CO_2 -Partialdruck (pCO_2). Durch die Carbonatisierung erfolgt gleichzeitig eine Abnahme des pH-Wertes. Eine Lösung im Gleichgewicht mit Calciumhydroxid weist einen pH-Wert von 12,5 auf, während eine Lösung im Gleichgewicht mit Calciumcarbonat und einem pCO_2 unter atmosphärischen Bedingungen einen pH-Wert von 8,3 besitzt. In den Lysimeterversuchen von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) verlief die Carbonatisierung relativ langsam, so daß sich der pH-Wert des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts unter atmosphärischen Bedingungen ($\text{pH} = 8,3$) nur sehr zögerlich einstellen wird. Die Autoren führen dies vor allem auf den Verbrauch des verfügbaren CO_2 für die Carbonatfällung aus dem Gips-gesättigten Wasser zurück. Auch HUBER et al. (1997) schließen nicht aus, daß es während der Alterung (sinkender pH, Bildung der leichter löslichen Phasen Bassanit und Gips durch Hydratation des Anhydrits) zu einer teilweisen Umfällung leichter löslicher Sulfatphasen in Calciumcarbonat kommen kann. Demnach ist davon auszugehen, daß bis zum Endwert der Auslaugung von Sulfatphasen die Carbonatisierung verzögert werden kann. Solange Carbonatisierungsvorgänge

in der Schlacke stattfinden, werden Schwermetalle vorzugsweise in Hydroxide und in die neu gebildeten Carbonate eingebaut oder an Festphasen wie z. B. sekundär gebildeten Speichermineralen (C-S-H-Phasen) oder Eisenhydroxide sorbiert.

Nach den oben genannten Autoren wird erst während des Abbaus des Carbonatpuffers mit einer Erhöhung der Schwermetallkonzentrationen im Sickerwasser gerechnet. Voraussetzung ist allerdings die Verfügbarkeit leicht löslicher Phasen wie z. B. C-S-H-Phasen. Dies gilt nach HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) insbesondere für die Schwermetalle Zn, Ni und in geringem Ausmaß auch für Cd und Co. Nur die Bindungen von Pb, Cr und des Großteils von Cu bleiben bis einem pH-Wert von 5 stabil. Der Abbau des Carbonatpuffers erfolgt erst dann, wenn das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht unterschritten wird. Setzt man, wie weiter oben bereits erwähnt, keine nennenswerte CO₂-Bildung in der Schlacke durch mikrobielle Aktivitäten voraus, dann bestimmt der durch das umgebende Milieu gesteuerte CO₂-Eintrag die Entwicklung des Carbonatpuffers in der Schlacke.

Leichtlösliche Bestandteile

Das kurz- bis mittelfristige Auslaugverhalten ist nach HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997), KERSTEN et al. (1995), HUBER et al. (1997) u. a. durch die Auswaschung der Salze charakterisiert. Dabei werden Chloride aufgrund der höheren Löslichkeit vergleichsweise schneller ausgetragen als Sulfate. Die von HUBER et al. (1997) und HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) zu Beginn der Auslaugung im alkalischen Milieu (pH 11-12) festgestellten Aluminiumfreisetzung - vorwiegend durch Oxidation metallischer Aluminiumteile hervorgerufen - erreicht Konzentrationen im Sickerwasser, die deutlich über der gültigen TVO¹ liegen. Die Freisetzung des Al geht nach Ansicht der Autoren (HIRSCHMANN & FÖRSTNER, 1997) durch Festlegung des Al vor allem in Al-Si-Phasenreubildungen schnell zurück. Eine pH-Erniedrigung sorgt ebenso für eine Ausfällung des Al und damit bis in pH-Bereiche unter 6,5 für eine weitestgehende Immobilisierung. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992) muß mit Zunahme des Salzgehaltes und damit einer Erhöhung der Ionenstärke im Sickerwasser mit einer erhöhten Freisetzung von Schwermetallen gerechnet werden. Sie merken an, daß mit zunehmender Konzentration an Alkali- und Erdalkali-Ionen in der Bodenlösung z. B. eine Desorption von Cadmium stattfinden kann. Vor allem Chlorid und Sulfat können in Abhängigkeit des pH-Wertes relativ stabile lösliche Komplexe mit Cadmium bilden. HIMMELSBACH & WENDLAND (1999) stellten fest, daß sich in hochsalinaren Porenlösungen (Kluftlösungen) von Sandsteinen Cd bei einem neutralen bis schwach basischen pH-Wert wie ein „idealer Tracer“ ausbreitet, Pb hingegen praktisch immobil verhält.

¹ Trinkwasserverordnung

2.4 Modell des Langzeitverhaltens

Für die Prognose des Langzeitverhaltens von Schlacken ist die Alkalinität beziehungsweise das Säurebindungsvermögen ein wichtiger Faktor, da der pH-Wert einen starken Einfluß auf die Freisetzung umweltrelevanter Schwermetalle ausübt. Die für die Schlacken typischen basischen Eigenschaften sind dabei hauptsächlich durch die Calciumverbindungen geprägt (KORALEWSKA 1999). JOHNSON (1994) definierte die Alkalinität von Schlacke als Summe aller vorhandener Basen, die in einem wässrigen Milieu bei einer Titration mit Säure bis zu einem Referenz-pH-Wert neutralisiert werden (vgl. Abb. 2-2).

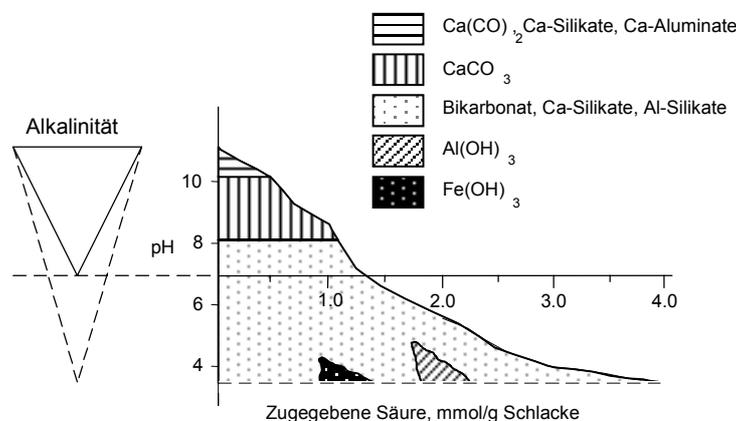


Abb. 2-2: Beiträge verschiedener Mineralphasen zur Alkalinität der MV-Schlacke als Funktion der zugegebenen Säure (JOHNSON, 1994).

Darauf aufbauend entwickelten HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) ein Modell zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von abgelagerter Schlacke. Es wurden die drei Hauptfaktoren Wasserhaushalt, Säureeintrag und Auswaschung von Puffersubstanzen als wesentliche Einflußgrößen berücksichtigt. Die zeitabhängige Unterteilung erfolgt in 4 Phasen:

- Phase 1**
- vorwiegend stark alkalisch
 - Pufferung durch C-S-H-Phasen
 - Auswaschung von Cl^- , SO_4^{2-} , Alkane, Carbonsäuren
 - kurzzeitig hohe Al-Konzentrationen, generell geringe Schwermetallgehalte
- Phase 2**
- erreichen der maximalen Säureneutralisationskapazität
 - Aufbau und z. T. wieder Abbau des Carbonatpuffers
 - Senkung des pH bis auf 7
 - Festlegung der Schwermetalle entweder durch den Einbau in Carbonate und Hydroxide oder durch Sorption an Festphasen
 - relativ unbelastetes Sickerwasser

- Phase 3**
- Abnahme des Carbonatpuffers in Abhängigkeit des Säureeintrags
 - Senkung des pH bis auf 5,5
 - Einsetzen des Silikatpuffers
 - im Sickerwasser ist mit erhöhten Gehalten von Zn, Ni, Cu, Cd, Co zu rechnen
- Phase 4**
- Pufferung durch Al-Hydroxide, Fe-Hydroxide und teilweise Silikate
 - pH-Werte zwischen 4 und 5
 - erhöhte Freisetzung von Pb, Cu, Ni und teilweise Cd und Co

Der zeitliche Verlauf der einzelnen Phasen wird wesentlich beeinflusst von der Wasserdurchlässigkeit, der Niederschlagsmenge bzw. Infiltrationsrate, der Mächtigkeit der Ablagerung und dem Säureeintrag. Sie berechneten bei sauren Regen bis pH 4 je nach Infiltrationsrate einen Säureeintrag von 25 – 50 meq H⁺ / m³*a. Unter Beachtung der Säureneutralisationskapazitäten dauert es dann rein rechnerisch 38400 bis 76800 Jahre bis ein Schlackekörper von 1m³ den pH-Wert zwischen 6 und 7 erreicht und ein verstärkter Metallaustrag beginnt. Für eine vergleichbare Abschätzung nach BACCINI et al. (1994) sowie auch für das von HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997) verwendete Modell müssen jedoch die folgenden konstanten Randbedingungen vorausgesetzt werden:

- Die Schlacke kann mit der Bodenluft und dem Sickerwasser ungehindert in Kontakt treten
- Es erfolgt keine Behinderung des Sickerwasserzutritts
- Es ist eine vollständige Drainage des Sickerwassers gegeben
- Es erfolgt eine gleichmäßige Durchsickerung des Schlackekörpers
- Es entstehen keine anaeroben Bereiche

2.5 Praktizierte Verwertung und Entsorgung von MV-Schlacke

KORALEWSKA (1999) stellte die Anforderungen und den Bewertungshintergrund für die Verwertung beziehungsweise Deponierung von MV-Schlacke wie folgt dar:

Für eine Verwertung oder Deponierung werden unterschiedliche Anforderungen an die Schlacke gestellt. Grundsätzlich werden diese im Immissionsschutz- (BIMSchG, 1990), Abfall- (KRW/ABFG, 1994), Wasserhaushaltsgesetz (WHG, 1996) und Bergrecht (BBERGG, 1980) geregelt. Allen Gesetzen ist gemeinsam, daß die Behandlung der Rückstände so zu erfolgen hat, daß ihre Nutzung im Wirtschaftskreislauf als sekundäre Rohstoffe ohne nachteilige Veränderung der Umwelt ermöglicht wird. Zusätzlich werden in Merkblättern und Technischen Regelwerken (TASI, 1993; LAGA, 1994; LÄNDERAUSSCHUSS BERGBAU, 1995) Anforderungen zur Untersuchung und Bewertung von Schlack-

ken aufgeführt, wobei der Schwerpunkt auch hier auf der umweltverträglichen Verwertung liegt.

Nach einer Befragung der Betreiber von MV-Schlackeaufbereitungsanlagen von REGENER (1997) hat sich der Anteil der MV-Schlackeverwertung am Gesamtaufkommen bundesweit, nach einem Anteil von nahezu 70 % im Jahre 1989, auf annähernd 50 % im Jahre 1993 verringert. REGENER (1997) führt dies nicht auf einen wesentlichen Rückgang der Verwertung zurück, sondern auf den wachsenden Anteil der nach 1989 verstärkt in Deponiebaumaßnahmen eingesetzt und als solcher nicht immer zur Verwertung gerechnet wurde. Nach Angaben der Betreiber hat sich die Zunahme der Verwertung im Jahr 1995 auch in den Folgejahren fortgesetzt.

Nach KRASS et al. (1997) wurden die in den Aufbereitungsanlagen im Jahre 1995 erzeugten Fraktionen in folgenden Anteilen verwertet und entsorgt:

▪ MV-Schlacke	63,6 Gew. %	Verwertung
▪ Fe-Schrott	6,7 Gew. %	Verwertung
▪ sonstige verwertbare Stoffe (z. B. NE-Metalle)	0,5 Gew. %	Verwertung
▪ Material für Deponiebau	18,4 Gew. %	Entsorgung
▪ zu deponierende Rückstände/Sonstiges	9,6 Gew. %	Entsorgung

Bei der Verwertung für Bauzwecke dominiert der private Baubereich, in dem oft über 90 % der verwerteten Menge eingesetzt werden (GALLENKEMPER & REGENER, 1993). Außerdem wird ein großer Anteil im Straßen- und Wegebau und hier vor allem in den Bereichen Frostschuttschichten (15,8 %), Verfüllmaterial (14,9 %), Schottertragschichten (12,0 %), Unter-/Dammbau (10,9 %), Bodenverfestigungen / hydraulisch gebundene Tragschichten (6,3 %) und Bodenverbesserung (5,3 %) eingesetzt. Bei der Untersuchung von zwei Straßenbaumaßnahmen, in denen MV-Schlacken in verschiedenen Einsatzarten und unter unterschiedlichen Voraussetzungen verwertet wurden, fand DAMM (1994), daß ein Einsatz unter bautechnischen Gesichtspunkten in den Bereichen Frostschuttschicht, Tragschicht (hydraulisch gebunden) und Bodenverfestigung erfolgen kann.

Gegenwärtig erfolgt beispielsweise in Bayern eine Verwertung oder Deponierung nach den Richtlinien der LAGA (1994, neu 1997) und der TASI (1993). Sie geben die Anforderungen an das Schlackenmaterial und den Standort vor, an dem es zur Ablagerung bzw. Verwertung kommt. Beide basieren nicht auf einem naturwissenschaftlichen Ansatz, sondern resultieren eher aus der praktischen Notwendigkeit, die sich aus der Entsorgungspflicht anfallender Reststoffe ergibt.

Somit sind auch ein Teil der angewandten Bewertungsverfahren und -kriterien Gegenstand kontroverser Diskussionen. Darunter fallen insbesondere die Auslaugungstests nach dem Deutschen Einheitsverfahren, die zur Bewertung der Schadstoffverfügbarkeit bzw. -mobilität in der Schlacke herangezogen werden.

Tab. 2-6: Verwertung oder Deponierung von MV-Schlacke nach Kummer (1995)

Parameter	Einheit	Aufbereitete Schlacke MHKW Würzburg ¹⁾	LAGA ²⁾ Obere Grenzwerte Verwertung	TA-Siedlungsabfall Obere Grenzwerte		NRW-Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau ³⁾	
				Deponieklasse I	Deponieklasse II	MVA I	MVA II
Organik							
Glühverlust	Masse-%	2,43	3	3	5	k. A.	k. A.
TOC	Masse-%	k. A.	k. A.	1	3	5	2,5
Extrahierbare lipophile Stoffe der Originalsubstanz	Masse-%	k. A.	k. A.	0,4	0,8	k. A.	k. A.
Eluatkriterien							
pH-Wert		11,3	7-13	5,5-13	5,5-13	7-13	7-13
Leitfähigkeit	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2140	6000	10000	50000	5000	1000
TOC	mg/l	k. A.	k. A.	20	100	k. A.	k. A.
Phenole	mg/l	k. A.	k. A.	0,2	50	k. A.	k. A.
Arsen	mg/l	< 0,001	k. A.	0,2	0,5	k. A.	k. A.
Blei	mg/l	0,020	0,05	0,2	1	0,05	0,05
Cadmium	mg/l	< 0,0005	0,005	0,05	0,1	0,005	0,005
Chrom-IV	mg/l	k. A.	k. A.	0,05	0,1	0,05	0,05
Chrom, ges.	mg/l	0,018	0,2	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kupfer	mg/l	0,27	0,3	1	5	0,3	0,3
Nickel	mg/l	< 0,005	00,4	0,2	1	k. A.	k. A.
Quecksilber	mg/l	< 0,0002	0,001	0,005	0,02	k. A.	k. A.
Zink	mg/l	0,031	0,3	2	5	0,3	0,3
Fluorid	mg/l	k. A.	k. A.	5	25	k. A.	k. A.
Ammonium-N	mg/l	k. A.	k. A.	4	200	k. A.	k. A.
Cyanide	mg/l	< 0,05	0,02	0,1	0,5	k. A.	k. A.
AOX	mg/l	k. A.	k. A.	0,3	1,5	k. A.	k. A.
Wasserlöslicher Anteil							
Abdampfrückstand	Masse-%	k. A.	k. A.	3	6	k. A.	k. A.
Chlorid	mg/l	41	250	k. A.	k. A.	250	30
Sulfat	mg/l	184	600	k. A.	k. A.	600	120
Wertespektrum für die Originalsubstanz							
EOX	mg/kg	< 2	3	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
PAK	mg/kg	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
PCDD/PCDF	ng/l	k. A.	0,6-30	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Arsen	TE/kg	4,1	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Blei	mg/kg	986	6000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Cadmium	mg/kg	6,6	20	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Chrom	mg/kg	212	2000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kupfer	mg/kg	5810	7000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Nickel	mg/kg	142	500	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Quecksilber	mg/kg	0,35	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Zink	mg/kg	4400	10000	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

1) Untersuchungsergebnisse von aufbereiteter MV-Schlacke der Wochen 42 bis 44, 1995 vom MHKW Würzburg

2) LAGA Merkblatt 1994 (Anhang)

3) MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT UND MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR VON NORDRHEIN-WESTFALEN (1991): Anforderungen an die Verwertung von aufbereiteten Altbaustoffen (Recycling-Baustoffe) und industriellen Nebenprodukten im Erd- und Straßenbau aus wasserwirtschaftlicher Sicht; MVA I und MVA II bezeichnen unterschiedliche Einsatzbereiche der Schlacke.

Die Tabelle 2-6 gibt einen Überblick über gebräuchliche Bewertungsansätze für die Ablagerung bzw. Verwertung von MV-Schlacke.

Bei der Verwertung gibt die LAGA (1994) vor, bei welchen Baumaßnahmen und unter welchen technischen Sicherungsmaßnahmen der Einbau von Schlacke möglich ist. Hinzu kommen naturräumliche Kriterien, die entweder eine Verwertung einschränken oder ausschließen.

Tab. 2-7: Kriterien bei der Schlackeverwertung nach der LAGA (1994)

Bau- und technische Sicherungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ im Straßen- und Wegebau als Tragschicht unter wasserundurchlässiger Deckschicht (Beton, Asphalt, Pflaster), als gebundene Tragschicht unter gering durchlässiger Deckschicht (Pflaster, Platten) und als Straßendamm (Unterbau) mit wasserundurchlässiger Fahrbahndecke, mineralischer Oberflächenabdichtung $d > 0,5$ m und $k_f < 10^{-8}$ m/s im Böschungsbereich und darüber liegender Rekultivierungsschicht ▪ bei der Anlage von befestigten Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten (Parkplätze, Lagerflächen) sowie sonstigen Verkehrsflächen (z. B. Flugplätze, Hafenbereiche, Güterverkehrszentren) ▪ im Deponiebau als Stabilisierungs-, Gasdrän- oder Ausgleichsschicht ▪ in hydrogeologisch günstigen Gebieten als Lärmschutzwall mit mineralischer Oberflächenabdeckung $d > 0,5$ m und $k_f < 10^{-8}$ m/s und darüber liegender Rekultivierungsschicht ▪ Keine Verwendung in Dränschichten ▪ Der Einsatz bei Großbaumaßnahmen ist zu bevorzugen
Einschränkende Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatz nur an hydrogeologisch günstigen Standorten (2m mächtige Deckschichten aus Schluffen, Tonen oder Lehmen) ▪ Der Abstand zwischen der Schüttkörperbasis und dem höchsten zu erwartenden Grundwasserstand soll mindestens 1 m betragen
Ausschließende Kriterien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trinkwasserschutzgebiete (I – III B), die festgesetzt, vorläufig sichergestellt oder fachbehördlich geplant sind ▪ Heilquellenschutzgebiete (I – IV), die festgesetzt, vorläufig sichergestellt oder fachbehördlich geplant sind ▪ Wasservorranggebiete, die im Interesse der Sicherung der künftigen Wasserversorgung raumordnerisch ausgewiesen sind ▪ Gebiete mit häufigen Überschwemmungen (z. B. Hochwasserrückhaltebecken, eingedeichte Flächen, natürliche Überflutungszonen in Flußtälern) ▪ Karstgebiete ohne ausreichende Deckschichten und Randgebiete, die im Karst entwässern ▪ Gebiete mit stark klüftigem, besonders wasserwegsamem Untergrund ▪ Aus Vorsorgegründen Flächen mit sensibler Nutzung (z. B. Kinderspielplätze, Sportanlagen)

Als Vergleich zur LAGA (1994) dient beispielsweise der Runderlaß „Anforderungen an die Verwertung von aufbereiteten Altbaustoffen (Recycling-Baustoffe) und industriellen Nebenprodukten im Erd- und Straßenbau aus wasserwirtschaftlicher Sicht“ des MINISTERIUMS FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT UND DES MINISTERIUMS FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR VON NORDRHEIN-WESTFALEN (1991). Er beinhaltet detaillierte Ausführungen über die Anforderungen an den Verwertungsstandort und den Einsatz von MV-Schlacke.

3 Einführung in den Naturraum Unterfranken

Das Untersuchungsgebiet umfaßt den gesamten Regierungsbezirk Unterfranken im Freistaat Bayern. Die politische Gebietsgrenze wurde deshalb gewählt, weil sich ein Großteil der verfügbaren Daten hauptsächlich darauf beschränkt.

Die Einführung in das Untersuchungsgebiet hat zum Ziel, relevante naturräumliche Aspekte aufzuzeigen, die letztendlich als Grundlage der nachfolgenden Standortanalyse zu sehen sind. Auf eine umfassende Beschreibung des geowissenschaftlichen Rahmens wird dabei bewußt verzichtet; stellvertretend wird auf eine vielfältige Literatur verwiesen, die z. B. in neueren geowissenschaftlichen Lehrbüchern über Unterfranken (GEYER, im Druck; MÜLLER, 1995) zusammengefaßt wurde.

3.1 Räumliche Gliederung

Das Zusammenspiel aller physisch-geographischen Faktoren eines Raumes bezeichnet dessen Ökologie. Gebiete mit einer gleichartigen Ausstattung werden als Naturräume ausgewiesen (SPÄTH, 1978). Im Fall Unterfranken korreliert die naturräumliche Gliederung nach MEYNEN et al.(1961) weitestgehend mit den geologischen und morphologischen Gegebenheiten. Sie zeigt auch eine deutliche Anlehnung an die einzelnen Klimaprovinzen. Somit berücksichtigt diese Gliederung bereits jene Geofaktoren, die für eine Schlackeablagerung als relevant eingestuft werden können.

Untermainebene (Anlage Karte 1, 232)

Die Untermainebene gehört bereits zum Rhein-Main-Tiefland und fällt nach MÜLLER (1995) vor allem aus geologisch, klimatischer und landschaftsgenetischer Sicht aus dem allgemeinen landschaftlichen Schema Unterfrankens heraus. Kennzeichnend sind insbesondere das milde Klima mit geringen Jahresniederschlägen bis zu 600 mm und einer mittleren Jahrestemperatur von 9,5°, die flache Morphologie sowie überwiegend sandige Substrate mit geringer Basenversorgung. Es handelt sich entweder um Aueböden oder kalkfreie, tiefründige podsolige Böden (BAYSTLMU, 1994). Die Untermainebene birgt für die Region bedeutende nutzbare Grundwasservorkommen.

Odenwald, Spessart , Südrhön (Anlage Karte 1, 140-144)

Die Mittelgebirgsregionen Odenwald, Spessart und Südrhön sind im Verhältnis zu den Vorländern relativ hoch aufragend (400 bis max. 700m Höhenunterschied) und durch scharf abgesetzte, tiefe Kerb- und Kastentäler zergliedert. Die Regionen zeichnen sich durch einen sehr hohen Waldanteil aus. Das stärker ozeanisch ausgeprägte Klima sorgt zum einen für die geringsten mittleren Jahrestemperaturen (unter 7°) und zum anderen für die höchsten mittleren Jahresniederschläge (im Bereich der Höhenzüge 1000 mm) in Unterfranken. Als bestimmendes Landschaftselement muß der weit verbreitete Buntsandstein genannt werden, der nur im Nordwesten von kristallinen Gesteinen des Grundgebirges (Vorderspessart) und vereinzelt von basaltischen Vorkommen in der Südrhön abgelöst wird, wobei sich der kristalline Vorderspessart deutlich durch seine hohe Gewässerdichte vom Rest abhebt. Letztendlich sind die klimatischen und geologischen Verhältnisse für den hohen Waldanteil verantwortlich. Ackerbauwürdige Flächen finden sich vereinzelt in Gebieten mit ausreichendem Lößpolster und im Bereich der Ostabdachung, wo tonig-mergelige Gesteine des Oberen Buntsandsteins zu Tage treten. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht sind vor allem die Talräume von Interesse. Sie bieten nutzbare Grundwasservorkommen, die jedoch in wachsender Konkurrenz zu anderen Nutzungen (Wohn- und Industriebesiedlung, Verkehr, Sand- und Kiesabbau u. a.) stehen.

Kuppen¹⁾- und Hohe Rhön (Anlage Karte 1, 353-354)

Im äußersten Norden bildet der überwiegend aus Basalten aufgebaute Mittelgebirgszug der Kuppen- und Hohen Rhön die nördliche Bezirksgrenze zum Bundesland Hessen und hydrologisch betrachtet einen Teil der Wasserscheide zwischen Rhein und Weser. Während in der Kuppenrhön durch die härtlingsbildenden Schlotfüllungen eine Auflösung zu Einzelbergen (Kuppen) sowie eine kräftige Zerschneidung erfolgte, bietet sich für die Lange bzw. Hohe Rhön ein Vergleich zum westlich gelegenen Vogelsberggebiet an, wo die durch vulkanische Deckenergüsse entstandene, geschlossene Basaltdecke, infolge einer radialen Zertalung in Riedel und Rücken gegliedert ist. In der Hohen Rhön wird mit dem Kreuzberg (928m NN), die für Unterfranken höchste Erhebung verzeichnet. Die Jahresniederschläge steigen bis fast 1200 mm an, was unter anderem auch die Hochmoorbildung in der Hohen Rhön begünstigt. Die Jahresdurchschnittstemperaturen liegen in weiten Teilen unter 5°, so daß heute der Ackerbau zu Gunsten einer mäßigen Grünlandnutzung fast verschwunden ist (SPÄTH, 1978).

1) Der hier als Kuppenrhön bezeichnete Naturraum ist nach der standortkundlichen Gliederung Bayerns in weiten Teilen als Nördliche bzw. Östliche Vorrhön definiert.

Mainfränkische Platten (Anlage Karte 1, 130-139)

Charakteristisch für die Mainfränkischen Platten und weithin sichtbar sind nach MÜLLER (1995) insbesondere eine weiträumige Landschaft mit weitgespannten, flachwelligen Landschaftsformen. Unterbrochen wird dieses monotone Landschaftsbild vor allem durch die tiefe Einkerbung des Mains und seiner Nebenflüsse. Insgesamt fällt die intensive ackerbauliche Nutzung auf, die sowohl auf die Untergrundeigenschaften und das milde Klima zurückzuführen ist. Besonders hervorzuheben sind dabei die durchgehend carbonatischen Gesteine des Muschelkalkes und die überwiegend schluffig-tonigen, teils sandig, teils carbonatischen Gesteine des Unteren- und Mittleren Keupers, sowie eine weitverbreitete Löß- bereichsweise auch Flugsandüberdeckung. Das Klima trägt ebenso wesentlich zur naturräumlichen Abgrenzung der Mainfränkischen Platten bei. Neben der Untermainebene werden hier die geringsten Jahresniederschläge von 550 – 600 mm und im Maximum von 650 mm (Hesselbacher Wald) in Unterfranken beobachtet, bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8 – 8,5°. Weiterhin auffällig sind besonders im Bereich des Muschelkalks geringe Gewässerdichten, die neben dem Klima vor allem auf eine relativ hohe Wasserwegsamkeit des Untergrundes schließen lassen. Bei Anwesenheit von Löß spielt dabei sicherlich auch dessen hohes Wasserspeichervermögen eine Rolle. Im Gegensatz dazu zeichnen sich die Bereiche des Mittleren- und zum Teil auch des Unteren Keupers durch eine sehr hohe Gewässerdichte aus. Dies ist vornehmlich auf die stauende Wirkung der tonig-schluffigen Schichten, die in diesen Einheiten vermehrt auftreten, zurückzuführen.

Fränkisches Keuper-Lias-Land (Anlage Karte 1, 115-117)

Dieser Naturraum läßt sich weder geologisch noch klimatisch scharf von den westlich gelegenen Mainfränkischen Platten abgrenzen. MÜLLER (1995) spricht deshalb von einem Grenzsäum zwischen den beiden Landschaftseinheiten. Den markantesten Hinweis bietet mit der deutlichen Schichtstufe im Westen des Steigerwaldes bzw. der Haßberge die Morphologie. Dort verzeichnen die vorwiegend mit bewaldeten Sandsteinflächen gekrönten Höhenzüge im Vergleich zum Umland einen Anstieg der mittleren Jahresniederschläge auf 700 bis 750mm bei einer niedrigeren mittleren Jahrestemperatur von 7,5°. Jenseits der Höhenzüge nach Osten tritt der Waldanteil deutlich zugunsten von Grün- und Ackerland zurück, bei mittleren Jahresniederschlägen um 650mm und einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 8°. Ein sehr auffälliges Merkmal ist die hohe Gewässerdichte, die wiederum auf die Anwesenheit siltig-toniger Schichten hindeutet.

3.2 Klima und Wasserhaushalt

Unterfranken gehört zur Klimazone der gemäßigten Breiten im Übergangsbereich vom westlichen ozeanisch zum östlichen kontinental ausgeprägten Klima. Die Klimastruktur orientiert sich dabei, wie bereits erwähnt, weitestgehend an der Geländegestalt des Raumes. Die Abbildung 3-1 verdeutlicht die starke Bindung des Landschaftsreliefs an das Klima. Für Unterfranken herrschen mit wenigen saisonalen Ausnahmen humide Verhältnisse vor, so daß im Jahresmittel die Niederschlags- die Verdunstungsbeträge überschreiten. Zu den Ausnahmen zählen Bereiche des Schweinfurter Beckens und des südlichen Maindreiecks, wo in den trockenen Monaten subhumide bis semiaride Verhältnisse vorherrschen können.

Für die vorliegende Arbeit ist besonders das Wasserdargebot (Abfluß) als Funktion des Niederschlages und der tatsächlichen Verdunstung von Bedeutung. Dabei sorgt die ungleiche räumliche Verteilung der durchschnittlichen Niederschlags- und Verdunstungsraten für gebietsspezifische Abflußhöhen (vgl. Abb. 3-1).

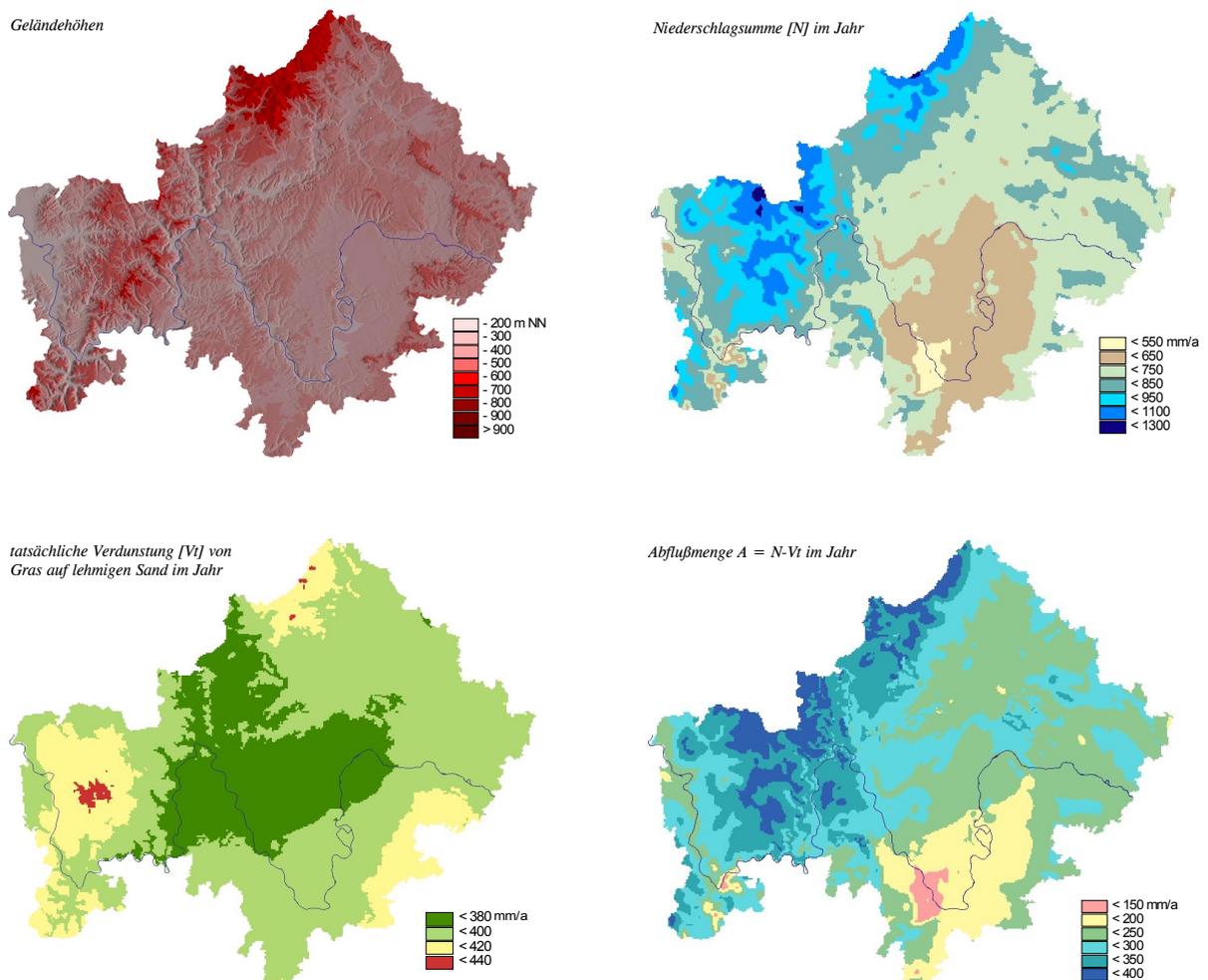


Abb. 3-1 : Klimatische Übersicht Unterfrankens im Vergleich zum Höhenrelief. Die Niederschlags- und Verdunstungskarte wurde aus den auf der CD-Rom des Klimaatlas Bayern (BAYFORKLIM, 1996) verfügbaren ASCii-Daten generiert. Die Verschneidung der beiden Karten ergab die Abflußkarte.

3.3 Geologisch-Hydrogeologischer Überblick

3.3.1 Geologie

Geologisch gesehen gehört das Gebiet Unterfrankens zur Süddeutschen Großscholle. Der Rheingrabenbruch im Westen der Scholle, sowie die damit verbundene Anhebung und Verkipfung der Grabenschultern, trugen im wesentlichen zum heutigen geologischen Bild Unterfrankens bei. Die ehemals horizontal gelagerten Sedimente wurden großräumig nach Süd-Osten verkippt, so daß folgerichtig im Westen heute die ältesten und im Osten von Unterfranken die jüngsten geologischen Ein-

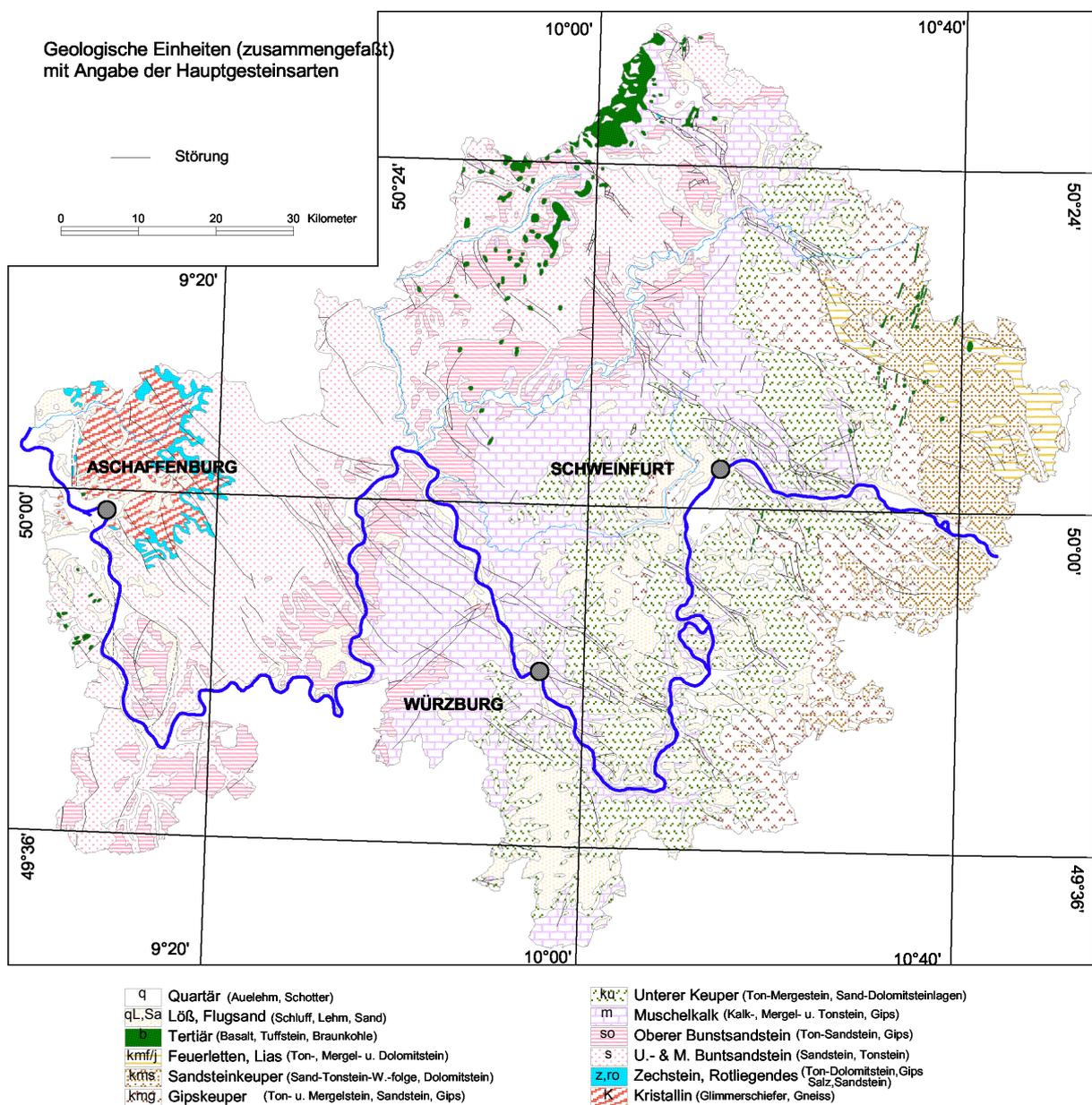


Abb. 3-2: Geologische Übersichtskarte von Unterfranken, verändert nach der digitalen Vorlage der Geologischen Karte von Bayern 1:500.000 (BAYGLA, 1998).

heiten ausstreichen. Modifiziert wird dieses generelle Schema durch Bruchzonen und Verbiegungen. Am weitesten verbreitet sind Sedimentgesteine der triasischen Einheiten Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper. Der Buntsandstein wird überwiegend aus Sandsteinen und Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen aufgebaut, wohingegen der Muschelkalk hauptsächlich durch Kalk- und Dolomitsteine im Wechsel mit mehr oder weniger tonig-mergeligen Halbfestgesteinen repräsentiert ist. Un-

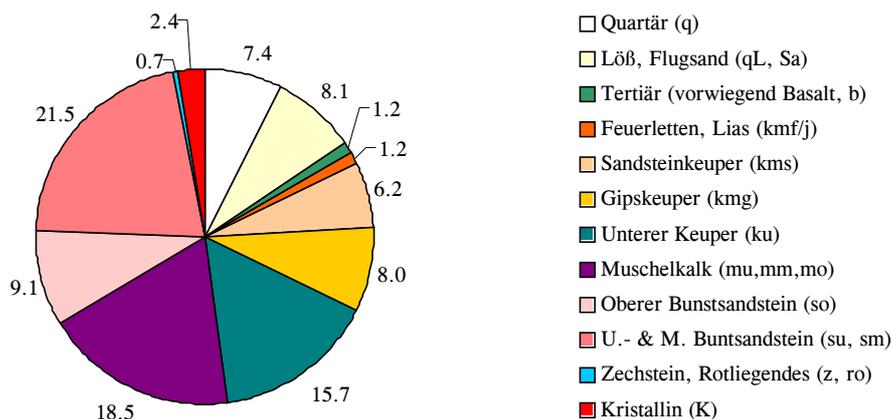


Abb. 3-3: Prozentuale Flächenanteile der geologischen Einheiten nach Abbildung 3-2 an der Gesamtfläche Unterfrankens

terdessen führt der Mittlere Muschelkalk lokal Steinsalz- und Sulfatlager. Die Schichten des Keupers umfassen Sand- und Tonsteinpakete, Sand-Tonsteinwechsellagen, mächtigere Gipseinschaltungen sowie auch carbonatische Gesteine. Als Besonderheit in der Geologie Unterfrankens sind die tertiären Vulkanite in der Rhön und vereinzelt an der nordöstlichen Bezirksgrenze (Heldburger Gangschar) sowie das überwiegend aus Gneisen und Glimmerschiefern zusammengesetzte Grundgebirge des Vorspessarts zu nennen. Als quartäre Gesteine überdecken vornehmlich im Bereich der Mainfränkischen Platten Löß und Flugsande weite Teile der älteren Gesteinsformationen. In den Talniederungen des Mains und untergeordnet der Fränkischen Saale treten vermehrt quartäre Schotter in Erscheinung.

3.3.2 Grundwasserlandschaften

Unterfranken ist hydrogeologisch in mehrere Grundwasserlandschaften gegliedert, die geologisch-tektonisch abgegrenzte Räume mit einheitlichem Landschaftsbild und typischen Grundwasserverhältnissen darstellen (REGIERUNG V. UFR., 1981). Dabei handelt es sich nach einem Raumordnungsverfahren der REGIERUNG VON UFR. aus dem Jahre 1981 um folgende Gebiete (vgl. Abb. 3-4):

- Aschaffener-Großostheimer Becken
- Kristalliner Vorspessart
- Buntsandstein-Spessart (Odenwald) und Rhön
- Fränkische Platten
- Fränkisches Gipskeuperland
- Fränkisches Sandsteinkeuperland
- Maintalquartär

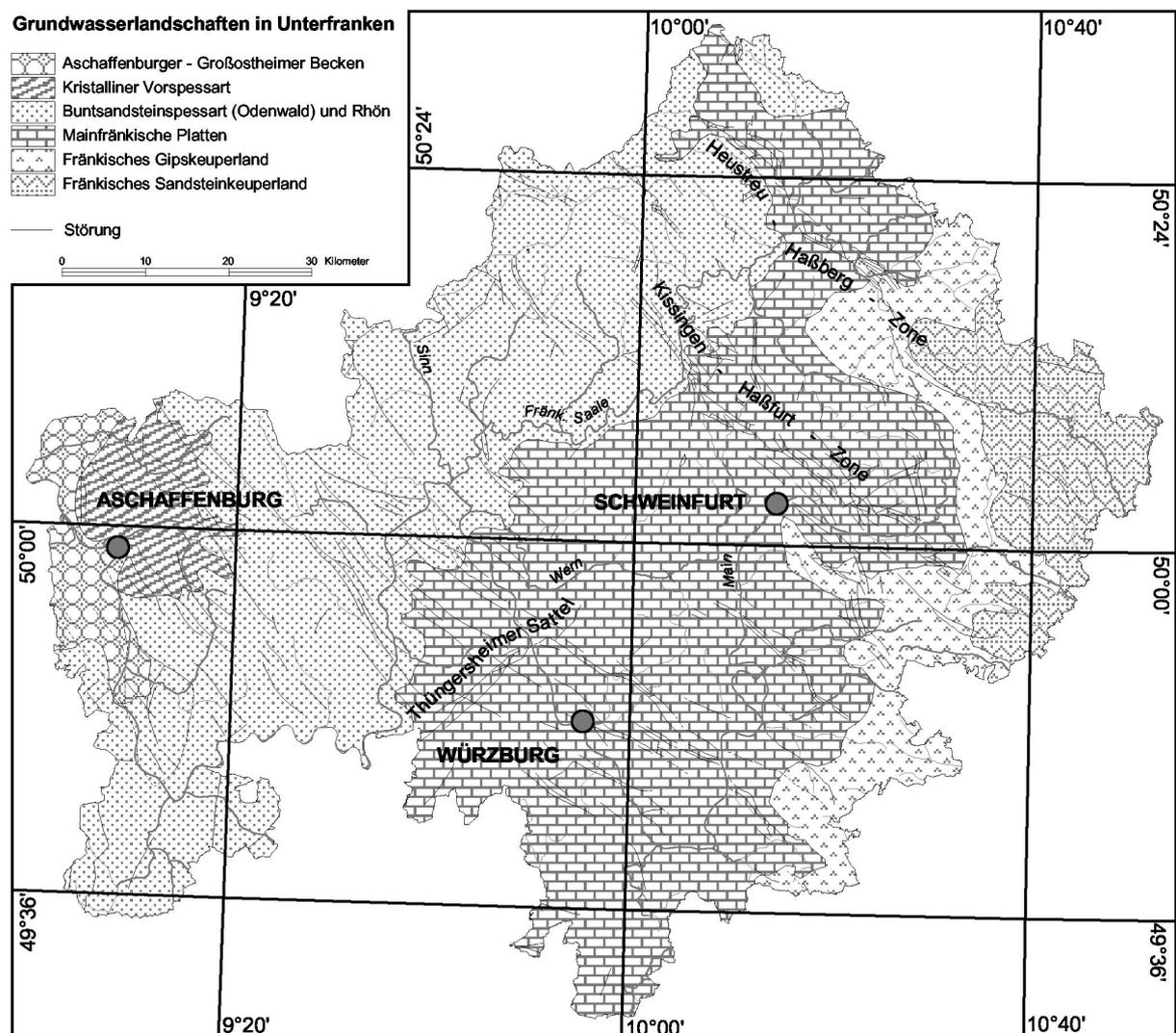


Abb. 3-4: Grundwasserlandschaften in Unterfranken, verändert und ergänzt nach REG. V. UFR. (1981) mit Darstellung der Störungszonen, verändert nach der Geologischen Karte von Bayern 1:500.000 (BAYGLA, 1998)

Aschaffener-Großostheimer Becken

Das Becken wird von gut durchlässigen jungtertiären und quartären Sand- und Kiesablagerungen beherrscht. Die mittleren Mächtigkeiten liegen zwischen 10 und 20 Meter, erreichen aber in Bereichen von Einbruchszonen oder Erosionsrinnen bis zu 50 m (STREIT & WEINELT, 1971). Aufgrund der überwiegend gut durchlässigen Deckschichten ist trotz der verhältnismäßig geringen Niederschläge mit vergleichsweise hohen Sickerwasser- bzw. Grundwasserneubildungsraten zu rechnen. Die relativ hohe Wasserwegsamkeit des quartären Untergrundes und die Gegenwart bedeutender Grundwasservorkommen sind entscheidende Faktoren bei der Standortbewertung im Hinblick auf Schlackeablagerungen.

Kristalliner Vorspessart

Der vorwiegend aus Glimmerschiefern und Gneisen aufgebaute, kristalline Vorspessart zeigt insgesamt eine geringe Wasserwegsamkeit und ein niedriges speicherwirksames Kluftvolumen. Dies führt im Vergleich zu den umliegenden Gebieten vor allem zur Ausbildung eines sehr dichten Gewässernetzes. Die hohe Anzahl der an Kluftzonen oder Gehängeschutt gebundenen Quellen unterstreichen mit ihren durchwegs geringen Schüttungen die Grundwassersituation. Die für Unterfranken relativ ergiebigen Niederschläge dringen offensichtlich schnell in den Untergrund ein und ergänzen nach kurzer Sickerzeit den Landoberflächenabfluß über die zahlreichen Quellaustritte. Nach der REGIERUNG V. UFR. (1981) liegen praktisch kaum nutzbare Grundwasservorkommen vor.

In Bereichen, in denen keine mächtigen Deckschichten ausgebildet sind, muß mit einer erhöhten Verschmutzungsempfindlichkeit des Naturraums gerechnet werden. Infolge fehlender wirksamer Puffersubstanzen in den Deckschichten steigt ebenso das Risiko der Gewässerversauerung.

Buntsandstein-Spessart und Rhön

Die Gebiete des Buntsandsteinspessarts und der Rhön werden hauptsächlich von Gesteinen aufgebaut, die als ausgesprochene Kluftgrundwasserleiter gelten. Aufgrund des geringen nutzbaren Kluftvolumens, z. B. in den Sandsteinen des Buntsandsteins zwischen 0,1 und 0,6 %, ist die Speicherfähigkeit des Untergrundes mitunter sehr gering. Nur in Bereichen mit aufgelockerter Klüftung oder in Verwerfungszonen wird eine erhöhte Wasserspeicherfähigkeit beobachtet, ein Umstand der zur lokalen Wasserversorgung beitragen kann. Insgesamt weist das Buntsandsteingebiet in der Regel einen mehrfachen Grundwasser-Stockwerksbau auf. Der geringleitende Bröckelschiefer²⁾ als Basis des

2) wird nach neuer Nomenklatur stratigraphisch dem Zechstein zugeordnet

Unteren Buntsandsteins begünstigt die Bildung von Quellhorizonten. Die darüber liegenden klüftigen Sand- und Schluffsteine fungieren als Grundwasserleiter. Der Mittlere und Untere Buntsandstein wird nach SCHWARZMEIER (1980) als zusammenhängender Grundwasserleiter angesehen mit dem Bröckelschiefer als Sohlschicht. Da die trennenden Schichten (Tonsteine) durch laterale fazielle Änderungen sowie durch Klüfte und Verwerfungen unterbrochen werden, kann die gesamte Abfolge als hydrogeologisch einheitliches System betrachtet werden. Im Bereich des Oberen Buntsandsteins stellt der Plattensandstein mit dem Chiroterienschiefer als Basis vielerorts ein eigenes Grundwasserstockwerk dar. Je nach den Mächtigkeitsverhältnissen bildet der zwischen den geringleitenden Unteren und Oberen Röttonfolgen eingelagerte Rötquarzit ein weiteres Grundwasserstockwerk.

Für den gesamten Buntsandsteinbereich können nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978a) 4 Quellentypen unterschieden werden:

Die im **Talniveau** austretenden Quellen, meist durch das vorgelagerte lehmige Talalluvium angestaut, weisen überwiegend starke Schüttungen auf und reagieren mit Verzögerung auf Niederschläge. An Störungszonen treten die sogenannten **Verwerfungsquellen** zu Tage. Hier treten infolge tiefgreifender Wasserbewegung Wässer verschiedener chemischer Zusammensetzung aus, die gegenüber dem Grundwasser der näheren Umgebung meist erhöhte Härten und höhere Sulfatgehalte aufweisen. In den Lagen über dem Talniveau treten zahlreiche **Schichtquellen** an der Grenze Sandstein/Tonstein aus. Ihre Schüttung ist meist gering und sehr von den Niederschlägen abhängig. Schließlich bleiben noch die **Schuttquellen**, die sich im Bereich der Verwitterungszone des Muttergesteins und der quartären Überdeckung bilden. Auch sie reagieren sehr stark auf Niederschläge.

Da in weiten Teilen des Buntsandsteingebietes nur geringmächtige und überwiegend gut durchlässige Deckschichten vorhanden sind und die Gebirgsdurchlässigkeiten vergleichsweise hoch sind, gelten die lokalen Grundwasserleiter generell als verschmutzungsempfindlich. Zudem besteht insbesondere in Waldgebieten ein erhöhtes Versauerungsrisiko, da dem Untergrund wenig Puffersubstanzen zur Verfügung stehen.

Fränkische Platten

Die Grundwasserlandschaft der Fränkischen Platten ist geprägt durch die massenhaft vorkommenden carbonatischen Sedimente des Muschelkalkes. Nach Osten überdecken allmählich die schluffig bis sandigen, mitunter carbonatischen Schichten des Unteren Keupers die Gesteine des Muschelkalkes und modifizieren den hydrogeologischen Charakter der Grundwasserlandschaft. An dieser Stelle sind auch die z. T. ausgedehnten Löß- und Flugsandareale als wichtiges hydrogeologisches Merkmal anzuführen.

Ohne Berücksichtigung regionaler Besonderheiten kann für den **Unteren Muschelkalk** festgelegt werden, daß er in nicht-überdecktem Zustand und insbesondere in Störungszonen einen mäßigen bis

guten Kluft- und Karstgrundwasserleiter darstellt. Diese Situation kann besonders im Norden und Nordosten (Rhön) Unterfrankens beobachtet werden. Im übrigen Bereich sind im allgemeinen der Grenzgelbkalk und die Schaumkalkbänke als Grundwasserleiter zu nennen. Der Grenzgelbkalk bildet mit den geringleitenden Röttonsteinen als Basis einen weit verbreiteten Quellhorizont.

Der **Mittlere Muschelkalk** besteht in der Primärausbildung aus Kalken, Dolomiten und Tonmergeln lokal mit Gips- und Steinsalzeinlagerungen. Aufgrund des raschen Wechsels von gut und gering durchlässigen Gesteinen kommt es zur Ausbildung einer kleinräumigen Stockwerksgliederung. Die Grundwasserleiter sind dabei die diversen Zellenkalksteine, Gips- und Anhydritschichten sowie die Dolomit- und Kalksteine. Sie können, je nach Ausbildung, als gut bis mäßig entwickelte Kluft- und Karstwasserleiter angesprochen werden. Nach EBHARDT (1971) führen Zerüttungs- und Auslaugungsvorgänge dazu, daß die Stockwerksgliederung häufig ganz aufgehoben ist. Durch intensive Verkarstung, insbesondere der lösungsanfälligen Salz- und Gipslager, hat sich örtlich ein bedeutender Grundwasserleiter ausgebildet. So stützt sich z. B. in Würzburg ein Großteil der Wasserversorgung auf die Grundwasservorkommen im Mittleren Muschelkalk.

Ein reger Wechsel von mehr oder weniger mächtigen Kalksteinbänken mit Tonmergelsteinzwischenlagen führt im Bereich des **Oberen Muschelkalkes** zu einem Grundwasser-Stockwerksbau. Örtlich entwickeln sich in den klüftigen, z. T. verkarsteten Kalksteinbänken hängende, für die Wasserversorgung jedoch meist unbedeutende Grundwasservorkommen. Als bekannter Grundwasserhorizont gilt beispielsweise die weitverbreitete Cycloidesbank, die von einem mächtigeren Tonsteinhorizont unterlagert wird. Bei einer geeigneten Schichtlagerung treten dort häufig Schichtquellen aus.

Die Grundwasserhöflichkeit der Muschelkalkareale ist generell als Funktion der Verkarstung und Klüftung zu sehen (REG. V. UFR., 1981). Im Bereich größerer tektonischer Störungen, wie z. B. im Münnerstädter und Bad Kissinger Grabenbruch, führt die starke Verkarstung und Klüftigkeit im ansonsten gering wasserleitfähigen Unteren Muschelkalk zu ergiebigen Grundwasservorkommen. Gleiches gilt für den Oberen Muschelkalk, z. B. inmitten der Kissinger-Haßfurter- oder Heustreuer-Störungzone (vgl. Abb. 3-4). GEORGOTAS & UDLUFT (1978a) sprechen davon, daß im Muschelkalk untereinander korrespondierende hydraulische Systeme bestehen, in denen das Grundwasser mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zirkuliert, dabei hat ein System bevorzugter Fließbahnen eine Dränfunktion innerhalb der normal geklüfteten, gewissermaßen homogenen Gesteinskörper.

Der **Untere Keuper** zeigt aufgrund seiner rasch wechselnden Lithologie von Sand-, Schluff-, Ton- und Mergelsteinen sowie Kalk- und Dolomitsteinbänken einen mehrfachen Grundwasser-Stockwerksbau. Nach GEORGOTAS & UDLUFT (1978a) bewegt sich das Wasser infolge der petrographischen Ausbildung fast ausschließlich auf den Klüften, wobei durch den sehr engmaschigen Fazieswechsel ein einheitlich hydraulisches Verhalten anzunehmen ist. Es kommt häufig zur Ausbildung flacher Grundwasserhorizonte, die aber oft nur verzögert auf Niederschlag reagieren. Damit verbunden ist das relativ häufige Auftreten von überwiegend gering aber meist ganzjährig schütten-

der Schichtquellen. Als mäßig ergiebiger Wasserhorizont können der Werksandstein und Grenzdomit gesehen werden.

Nutzbare Grundwasservorkommen im Bereich des Unteren Keupers sind aufgrund ihrer geringen Ergiebigkeit nur von geringer Bedeutung (REG. v. UFR., 1981).

Für die gesamte Region gilt, daß in Gebieten mit einer ausreichenden Lößauflage meist eine rasche Infiltration des Niederschlagswassers in tiefere Zonen auf Grund des hohen Wasserspeichervermögens der schluffig bis feinsandigen Lößmaterialien behindert wird. Zudem verfügt der Löß - dank seiner carbonatischen Anteile - über wirksame Puffersubstanzen gegenüber Säureinträgen aus dem Niederschlag. Wegen der prinzipiellen Neigung zur Verkarstung muß in den Muschelkalkarealen jedoch mit einer vergleichsweise raschen Versickerung des Niederschlags gerechnet werden. Besonders in Zonen intensiver Klüftung oder Verkarstung werden während oder nach ausgiebigen Regenfällen immer wieder Trübungen an einigen Quellaustritten beobachtet. Dies kann ein deutlicher Hinweis dafür sein, daß das Niederschlagswasser sehr schnell über bevorzugte Fließbahnen in das eigentliche Grundwasser gelangt und eine Selbstreinigungsfunktion des Untergrundes dann praktisch kaum vorhanden ist. Im Gegensatz zu den Lößauflagen kann es in Bereichen mächtigerer Flugsanddecken zu Versauerungserscheinungen im Sickerwasser kommen, da dem sandigen Material kaum Puffersubstanzen zur Verfügung stehen. Dabei sind ebenso die höheren Durchlässigkeiten zu beachten. Bei geringleitender Unterlage (z. B. stauende Schluff- und Mergelsteine des Unteren Keupers) bilden sich örtlich sehr flach liegende Quellhorizonte aus.

Fränkisches Gipskeuperland

Das Fränkische Gipskeuperland ist gekennzeichnet durch den hohen, am geologischen Untergrundaufbau beteiligten Anteil an geringleitenden Ton-Mergelstein-Wechselfolgen. Dies führt zu einer effektiven oberflächen- bzw. oberflächennahen Entwässerung und findet Ausdruck in der oftmals sehr hohen Gewässerdichte. Grundwasservorkommen zeigen sich vor allem in Bereichen ausgelaugter Gipslager und zwischengeschalteter Sandsteinvorkommen, sie können örtlich zu einer beachtlichen Quellendichte führen. Im allgemeinen liegen die Quellhorizonte sehr flach. Die Quellen aus den Sandsteinbereichen schütten in der Regel sehr schwach, wohingegen bei den Karstquellen Schüttungen bis zu mehreren Litern pro Sekunde nicht ungewöhnlich sind. In Niederungen sind dann oft auch stärker schüttende Quelltöpfe zu beobachten.

Da die Deckschichten sehr stark von den weitverbreiteten Ton-Mergelsteinen geprägt sind, kommt es in weiten Teilen zu keiner nennenswerten Tiefensickerung der Niederschläge. Der Großteil des Wasserumsatzes erfolgt oberflächennah und führt bezüglich einer Standortbewertung zu einem völlig anderen Bild als z. B. im Muschelkalk oder Buntsandstein.

Fränkisches Sandsteinkeuperland

Die entlang der östlichen Bezirksgrenze noch erfaßten kleinen Teilbereiche der Grundwasserlandschaft des Sandsteinkeupers werden von den tonigen und sandigen Sedimenten des Mittleren und Oberen Keupers aufgebaut. Durch den differenzierten Schichtaufbau haben sich zahlreiche, lokal begrenzte Grundwasservorkommen gebildet. Dabei fungieren die Sandsteine als Kluftwasserleiter und die tonigen Einschaltungen als Wassergeringleiter und Basis des jeweiligen Grundwasserleiters. Der Hauptwasserumsatz erfolgt oberflächennah, da ein dichtes Netz an Quellaustritten sowie eine hohe Gewässernetzdichte sehr charakteristisch für diese Gebiete erscheint. Die Quellen schütten meist ganzjährig und erreichen Werte zwischen 0,5 und 2 l/s. Dies läßt auf ein mäßiges Speichervolumen der Sandsteine schließen. Örtlich tragen Grundwasservorkommen im Blasen- bzw. Burgsandstein zur Sicherung der Wasserversorgung bei.

Die in ihrer Mächtigkeit und lateralen Ausdehnung unbeständigen Wechselfolgen erschweren eine allgemeine Einschätzung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit. Für die Grundwasserüberdeckung ist lokal eine unterschiedliche Pufferwirkung anzunehmen. So zeigen z. B. oberflächennahe Grundwässer aus dem Blasensandstein nach EMMERT (1985) mit geringem Gesamtmineralgehalt pH-Werte unter 7 andere mit höherem Mineralgehalt hingegen pH-Werte > 7 .

Zum Sandsteinkeuperland sind im Osten des Regierungsbezirktes auch noch die Feuerletten sowie die Rhät-Lias-Übergangsschichten zu zählen. Die Feuerletten können ausnahmslos als Grundwasserhemmer eingestuft werden. Sie fungieren als Trennschicht zwischen den grundwasserführenden Schichten des Sandsteinkeupers im Liegenden und dem Grundwasserstockwerk des Rhätsandsteins im Hangenden. Da der Rhätsandstein sehr starken Mächtigkeitsschwankungen unterliegt ist seine Bedeutung für die Grundwassergewinnung in Franken nur lokal von Bedeutung. Über dem Rhätsandstein können sandig-schluffig ausgebildete Schichten im Unteren Lias (meist Arietensandstein) weitere eigenständige, allerdings sehr begrenzte und unbedeutende Grundwasserstockwerke bilden.

4 Naturräumliche Standortkriterien und Bewertungsfaktoren

4.1 Standortkriterien

Bei der herkömmlichen Entsorgung oder Verwertung von Schlacke übernehmen die technischen Sicherungsmaßnahmen, wie z. B. eine Oberflächenabdeckung und Basisabdichtung bei der Deponierung oder eine Oberflächenversiegelung im Straßenbau, vornehmlich die Aufgabe, einen verstärkten Wasserzu- bzw. -austritt in und aus der Schlacke zu verhindern. Da technische Bauwerke eine begrenzte Lebenserwartung haben, kommt der Wahl der natürlichen Ablagerungsumgebung bei der Entsorgung oder Verwertung entscheidende Bedeutung zu, denn diese kontrolliert nach Versagen der Technik die wesentlichen Stoffflüsse.

Die Eignung der Umgebung bzw. die Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlackeablagerungen ist dann gegeben, wenn die folgenden, wesentlichen Standortkriterien erfüllt werden:

- **klimatisch günstige Position**
i. d. Regel Gebiete mit geringen Niederschlägen und gleichzeitig hohen Verdunstungsraten
- **geringer Wasserumsatz im potentiellen Ablagerungsbereich**
allgemein geringer Abfluß, ungesättigte Verhältnisse
- **hohe Säureneutralisationskapazität (Puffervermögen) des potentiellen Ablagerungsbereichs**
hohe Verteilungsdichte und Verfügbarkeit wirksamer Puffersubstanzen in der Grundwasserüberdeckung
- **hohe Lagerungsstabilität**
kein bis geringes Erosionspotential, keine Rutschungsgefahr, tektonisch ruhige Zonen

Das Schema der Abbildung 4-1 zeigt das Beziehungsgeflecht maßgeblicher, naturräumlicher Faktorengruppen, die aus den Standortkriterien hervorgehen und zur Standortanalyse herangezogen werden können.

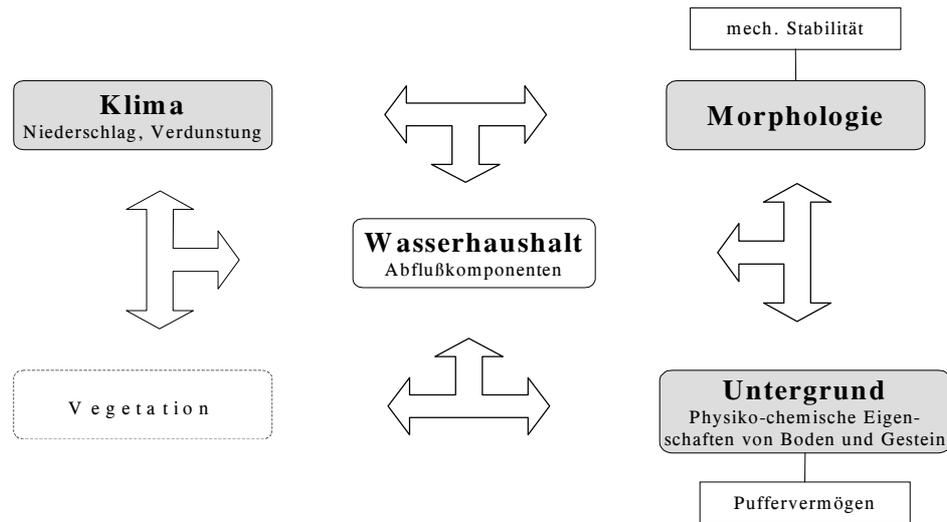


Abb. 4-1: Beziehungsgeflecht maßgeblicher naturräumlicher Standortfaktorengruppen.

In den folgenden Abschnitten sollen wesentliche Standortfaktoren und mögliche Alternativen im Rahmen großräumiger Untersuchungen aufgeführt und so weit möglich allgemein erläutert werden. Detaillierte qualitative und quantitative Bewertungen bleiben der regionalen Standortanalyse (Kap. 6) vorbehalten.

4.2 Bewertungsfaktoren

4.2.1 Klima und Wasserhaushalt

Wichtige voneinander abhängige Elemente des Wasserhaushaltes sind die Klimafaktoren Niederschlag [N] und Verdunstung [V] sowie der Abfluß [A]. Sie werden über die Bilanzgleichung des Wasserhaushaltes **Niederschlag [N] - Verdunstung [V] = Abfluß [A]** miteinander verknüpft. Die ungleiche räumliche Verteilung der Niederschlags- und Verdunstungsraten sorgt dabei für gebiets-spezifische Abflußhöhen. Mit hohen jährlichen Abflußraten steigt die potentielle Wassermenge, die im Bereich einer Ablagerung umgesetzt werden kann.

Die Formen des **Niederschlags** sind Regen, Schnee, Hagel und Nebel. Quantitativ effizient sind davon meist nur Regen und Schnee. Neben der durchschnittlichen Niederschlagsmenge für den Wasserhaushalt im Bereich einer Ablagerung kann die Niederschlagsintensität (Wassermenge pro Zeiteinheit eines Niederschlagsereignisses) eine erhebliche Rolle spielen, da unabhängig von der klimatischen Position eines Gebietes hohe Mengen an Wasser kurzfristig umgesetzt werden können. Dabei kann neben der Zunahme der potentiellen Infiltrationsmenge in den Abalgerungskörper auch

die mechanische Wirkung des Wassers von Bedeutung sein. In Abhängigkeit des Untergrundaufbaus, der Vegetation und Oberflächengestalt können weitreichende Erosionsschäden die Folge von Starkregenereignissen sein. Damit ist sowohl die Freilegung als auch der Abtrag bzw. die Verfrachtung von abgelagerten Materialien zu besorgen. Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Niederschlagsereignissen können keine entsprechende Durchschnittswerte der Niederschlagsintensität angegeben und damit für eine regionale Standortanalyse verwendet werden. So wird bei regionalen Betrachtungen prinzipiell auf durchschnittliche Niederschlagssummen zurückgegriffen. Abflußverhältnisse und das potentielle Erosionsrisiko für eine Ablagerung bei hohen Niederschlagsintensitäten sind im Spezialfall lokal zu untersuchen und abzuschätzen.

Die **Verdunstung** wird im wesentlichen durch den Wärmehaushalt auf der Erdoberfläche gesteuert. Dabei hängt der Verdunstungsbetrag von der Verfügbarkeit von Wasser ab. Die physikalisch maximal mögliche Verdunstungsmenge wird als potentielle Verdunstung bezeichnet und entspricht der Verdunstung über einer freien Wasserfläche. Für den Wasserhaushalt einer Ablagerung ist allerdings die aktuelle bzw. tatsächliche Verdunstung von Bedeutung. Diese setzt sich zusammen aus dem Anteil der direkt an der Erd- und Pflanzenoberfläche (Interzeption) sowie aus dem Anteil der über die Transpiration der Pflanzen verdunstet. Mit der Transpiration der Pflanzen wird dem Boden und Gestein bis zur Verwurzlungstiefe Wasser entzogen. Neben der Vegetationsart beeinflusst auch die Eigenschaft des Bodens bzw. des Gesteins den Verdunstungsbetrag über Transpiration. In Abhängigkeit des Porenraums wird Wasser zwischengespeichert und für Pflanzen verfügbar gehalten. Bei Böden und Lockergesteinen ist die nutzbare Feldkapazität [nFK] das Maß für die pflanzenverfügbare Wassermenge die im Untergrund gespeichert werden. Der Bewuchs hängt einerseits von den klimatischen Bedingungen ab, andererseits aber auch von den Untergrundverhältnissen. Bezogen auf die Verdunstungsverhältnisse kann bei entsprechenden Kombinationsformen von Bewuchs und Untergrund, die Ablagerungseignung einer Lokalität prinzipiell gesteigert werden. Für eine regionale Betrachtung eignen sich durchschnittliche Verdunstungsraten, lokale Verhältnisse sind im Spezialfall zu untersuchen und zu bewerten.

Das Risiko eines verstärkten Wasserumsatzes im Bereich einer Ablagerung steigt mit Zunahme des durchschnittlichen **Abflusses**. Steigt gleichzeitig die tatsächliche Infiltrations- und Durchflußrate im Ablagerungskörper, ist mit einer verstärkten Auswaschung und Auslaugung von toxischen Substanzen zu rechnen. Im Spezialfall der Schlacke wird vor allem die Auswaschung puffender Phasen zunehmen; dies bedeutet gleichzeitig eine Erhöhung des dynamischen Gefährdungspotentials.

Im allgemeinen wird zwischen einer oberirdischen und einer unterirdischen Abflußkomponente unterschieden. Die Bildung der Abflußkomponente ist dabei abhängig von der Niederschlagsmenge und -intensität, der Boden- bzw. Gesteinsbeschaffenheit (siehe auch Abschnitt 4.2.2), der Vegetation und der Geländegestalt (siehe auch Abschnitt 4.2.3).

4.2.2 Untergrund und Grundwasser

Die physiko-chemischen Eigenschaften des Untergrundes beeinflussen in starkem Maße den Wasserhaushalt und das Puffervermögen eines Naturraums. Zu diesen Eigenschaften zählen insbesondere die Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit sowie die Verteilung puffernder Substanzen (z. B. Carbonate).

4.2.2.1 Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit oder auch hydraulische Leitfähigkeit des Untergrundes ist mitbestimmend bei der Qualität, Quantität und Richtung des abfließenden Wassers. Dabei sorgen die Gesteins- und Gebirgseigenschaften regional und in vielen Fällen sogar lokal für erhebliche Durchlässigkeitsunterschiede. Die größten Streuungen werden i. d. Regel in Bereichen von klüftigen bzw. verkarsteten Gebirgsabschnitten beobachtet. Da insbesondere Schlackeablagerungen nicht in der gesättigten Zone des Grundwassers erfolgen werden, sind vor allem die schichtdifferenzierten **ungesättigten Durchlässigkeitsverhältnisse** in der Grundwasserüberdeckung von Bedeutung, da sie darüber entscheiden, wie hoch der Anteil des Abflusses sein wird, der im Ablagerungsbereich umgesetzt werden kann. Eine schichtdifferenzierte Bewertung der Durchlässigkeitsverhältnisse setzt allerdings voraus, daß Schichtaufbau und hydrologische bzw. hydrogeologische Position sowohl der Ablagerung als auch der Ablagerungsumgebung bekannt sind.

Anhand der bestehenden natürlichen Durchlässigkeitsverhältnisse lassen sich qualitative Aussagen treffen, über Neigung eines Gebietes entweder zur oberflächennahen Entwässerung bei geringen oder zur Tiefensickerung (Grundwasserneubildung, Grundwasserabfluß) bei hohen Durchlässigkeiten in der Grundwasserüberdeckung. Da vornehmlich das Grundwasser geschützt werden soll, zeigen geringe Durchlässigkeiten prinzipiell ablagerungsfreundliche Eigenschaften des Naturraums an. Geringe Durchlässigkeiten können insbesondere für Gebiete mit einem entsprechenden Anteil an schluffig-tonigen Schichten (z. B. Unterer- und Gipskeuper) in der Grundwasserüberdeckung angenommen werden.

Bei Übersichtsanalysen kann die **Gewässernetzdichte** als alternativer Faktor zur Abschätzung der Durchlässigkeitsverhältnisse für (quasi-)homogene Bereiche angesehen werden. Nach HÖLTING (1992) charakterisiert die Gewässerdichte die Durchlässigkeitsverhältnisse eines oberirdischen Einzugsgebiets. Vereinfacht gilt, je durchlässiger und für Niederschläge aufnahmefähiger der Untergrund, desto geringer ist die Gewässerdichte, da der versickernde Anteil des Niederschlages dem oberirdischen Gewässerabfluß fehlt. In Ergänzung dazu kann für MATTHESS & UBELL (1983) die **Quellendichte** ebenso ein wichtiges Indiz für die Durchlässigkeitsverhältnisse des Untergrundes sein. Sie beobachteten insbesondere bei Wechselfolgen gering- und gut leitender Schichten ein ver-

mehrtes Auftreten von Quellen. MÜLLER (1996) sieht die Gewässerdichte als Konsequenz aus der Wechselbeziehung zwischen der Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit und dem Niederschlagsangebot. Nach BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) haben z. B. eine geringe Gewässerdichte einmal im Flachland gelegene Gebiete mit gutem Bodenwasserspeichervermögen und zum anderen Karstgebiete. Eine geringe Gewässerdichte in humiden Gebieten deutet generell darauf hin, daß der Grundwasserabfluß die entscheidende Rolle spielt. Bei einer weiteren Betrachtung zeigt es sich, daß Gebiete mit einem dichten oberirdischen Gewässernetz auch ein dichtes Netz an Quellaustritten aufweisen. Dies ist kein Widerspruch, da die Quellen oft kleine Gerinne mit Wasser versorgen und somit die Gewässerdichte direkt beeinflussen. Zudem läßt sich feststellen, daß vorwiegend dort sichtbare Oberflächenentwässerung durch Quellen entsteht, wo der Untergrund unterhalb des Grundwasserhorizontes flächenhaft geringleitend ist, wenn auch die Ergiebigkeiten und saisonal bedingten Schüttungsschwankungen sowie generell die hydrologische Position auch eine maßgeblich Rolle dabei spielen.

Tab. 4-1: Maßgebliche naturräumliche Standortfaktoren und mögliche Alternativen

Faktorengruppe	Einzelfaktoren	Alternative Faktoren im Rahmen großräumiger Untersuchungen
Klima und Wasserhaushalt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niederschlag ▪ Verdunstung 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abfluß <ul style="list-style-type: none"> -oberirdischer Abfluß -Zwischenabfluß -Grundwasserabfluß 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässernetzdichte, Quellenposition und -dichte qualitativer Hinweis auf oberflächennahe Entwässerung
Untergrund und Grundwasser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ GW-Flurabstand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Talbereiche Annahme flachgründiger GW-Vorkommen ▪ Quellenposition qualitativer Hinweis auf Lage von GW-Vorkommen
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Durchlässigkeit <ul style="list-style-type: none"> -Gestein -Gebirge 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässernetzdichte qualitativer Hinweis auf die Durchlässigkeitsverhältnisse in oberflächennahen Schichten bezogen auf geologische Einheitsflächen
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesteinschemie <ul style="list-style-type: none"> -Puffervermögen -zeitliche Stabilität des Milieus ▪ Sicker- bzw. Grundwasserqualität <ul style="list-style-type: none"> -wässrige Milieubedingungen -Verfügbarkeit von Puffersubstanzen 	
Morphologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hangneigung <ul style="list-style-type: none"> -Lagerungsstabilität einer Ablagerung -Abflußbildung 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiefenbereiche <ul style="list-style-type: none"> -Akkumulation von Grund- und Oberflächenwasser 	

4.2.2.2 Grundwasserflurabstand

Der Grundwasserflurabstand gibt den Abstand zwischen der Geländeoberkante und dem ersten zusammenhängenden Grundwasserstockwerk an und definiert damit die Mächtigkeit des Raumes für Abbau-, Reaktions- und Sorptionsvorgänge kontaminierter Sickerwässer. Er ist ein wesentlicher Faktor bei der Standortbewertung von Ablagerungen und Gegenstand in fast allen Regelwerken und Empfehlungen der Länder zur Deponiestandorterkundung und Bewertung von Altlasten. Für das Ablagerungssystem Schlacke-Naturraum erscheinen geringe Flurabstände als ungünstig, da sie einen hohen oberflächennahen und damit im potentiellen Ablagerungsbereich von Schlacke stattfindenden Wasserumsatz andeuten.

Grundlage für die Ermittlung regionaler Grundwasserstände und Grundwasserflurabstände ist ein regional einheitlicher Grundwassergleichenplan. Dies ist jedoch im regionalen Maßstab und unter starken Vereinfachungen nur für das Hauptgrundwasserstockwerk möglich. So hat z.B. Barthel (2000) einen Grundwassergleichenplan für einen Teil Unterfrankens mit Hilfe von Bohrungsdaten und morphologischen Elementen konstruiert. Hangende Stockwerke, lokale Besonderheiten sowie kleinräumige Vorkommen können auf diese Weise jedoch nicht erfaßt werden.

Quellaustritte, Flachbrunnen und Gewässerursprünge deuten auf Lage und Vorkommen u. a. von hangenden Grundwasserstockwerken hin. Bei besonders geringdurchlässigen Schichten in oberflächennahen Bereichen können auch flachgründige Dränsysteme entwickelt sein.

Über die räumliche Position dieser hydrologischen Informationspunkte können mit Hilfe der Geländemorphologie Lage und Ausdehnung potentieller Grundwasserbereiche abgeschätzt werden; sie geben einen Hinweis auf die Tiefenlage lokaler, oberflächennaher Grundwasserleiter und ergänzen somit das Bild über die hydrologischen bzw. hydrogeologischen Eigenschaften einzelner geologischer Einheiten. Folgende qualitative Bewertungsstufen sind dabei denkbar:

- Grundwasserbereiche mit geringer Überdeckung deuten auf einen hohen oberflächennahen Wasserumsatz hin, mit einer deutlich lateralen Abflußkomponente.
- Grundwasserbereiche mit mächtigerer Überdeckung weisen auf eine wirksame Abführung der Infiltrationswässer zur Tiefe hin.
- Fehlende Grundwasserbereiche im Hangenden unterstützen die Annahme, daß die Sickerwässer weitestgehend ungehindert zum jeweiligen Hauptgrundwasserstockwerk vordringen, besonders dann, wenn wasserspeicherfähige Deckschichten fehlen.

4.2.2.3 Hydrogeochemische Faktoren

Die hydrogeochemischen Bewertungsfaktoren ergeben sich aus der Art und Verteilung der geologischen Materialien, die am Aufbau des ungesättigten Untergrundes beteiligt sind. Als Lösungs- und Transportmittel zwischen den beteiligten Schichten fungiert das Wasser. So stellt sich beispielsweise in silikatreichen Verwitterungsdecken (z. B. aus Graniten, Sandsteinen) ein schwach mitunter stark saures Milieu im Sickerwasser ein, wohingegen bei carbonatreichen vorzugsweise ein neutrales bis schwach alkalisches Milieu in der wässrigen Phase beobachtet wird. Besondere Bedeutung kommt dabei den wirksamen Puffersubstanzen zu, die sowohl in der Lage sind den niederschlagsbedingten Säureeintrag sowie die in der Bodenzone gebildeten Säuren bei der Tiefenverlagerung mit dem Sickerwasser zu neutralisieren.

Als maßgebliche, standortspezifische Größen können die chemische Zusammensetzung der Gesteinsmaterialien, oder in einer Vereinfachung ihre petrographische Ausbildung, sowie die chemische Zusammensetzung oberflächennaher Grundwässer bzw. quellnaher Oberflächenwässer herangezogen werden. Während die Gesteinschemie prinzipiell nur punktuelle Informationen liefert, bietet sich z. B. über den chemischen Inhalt der Quellwässer ein hydrochemischer Summenparameter an, bezogen auf die hydrogeochemische Eigenschaft des zugehörigen Einzugsgebiets. So kann für jede quasi-homogene geologische Einheit der hydrogeochemische Charakter anhand von mehreren Quellwasseranalysen eingeschätzt und im Bezug auf das Ablagerungssystem Schlacke –Naturraum bewertet werden. Die Quellwässer spiegeln aber nur den Augenblickszustand der Deckschichten wieder. Um Aussagen über die zeitliche Stabilität treffen zu können, muß der Anteil potentieller Puffersubstanzen (z. B. Carbonate) am Aufbau der Deckschichten abgeschätzt werden. Je höher der Anteil an Puffersubstanzen, desto günstiger und zeitlich stabiler sind die Milieubedingungen für eine Schlackeablagerung anzusetzen. Anders ausgedrückt, nimmt mit steigendem Anteil der Puffersubstanzen am Aufbau der Deckschichten die Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlackedepositionen zu. Da sich gerade im Carbonatpuffersystem ein für die Schlacke sehr günstiges und vor allem stabiles Milieu bietet, gilt der Verteilung und der Verfügbarkeit carbonatischer Phasen in den Deckschichten besondere Aufmerksamkeit.

4.2.3 Morphologie

Als besonders verschmutzungsempfindlich gelten im allgemeinen die Talräume, da sie als Sammelstellen aller möglichen Verunreinigungen des Einzugsgebietes anzusehen sind. So wurden ihnen, z. B. nach den Risikostudien von Kiemstedt (1997) und Albinet & Margat (1970), rein nach ihrer hydrologischen Positionen die höchste Verschmutzungsgefährdung zugeordnet.

Gleichzeitig kennzeichnen die Talräume aber auch jene Gebiete, in denen sich Grund- und Oberflächenwasser sammelt. Besonders gefährdet ist der **Tiefenbereich**, der sich ausgehend von der Tal- bzw. Beckenachse bis zur ersten Hangversteilung ausdehnt. Zur Definition des Tiefenbereichs siehe auch AG BODEN (1994). In den reliefbedingten Tiefenbereichen ist trotz unregelmäßiger und zeitlich kaum quantifizierbarer Abflußereignisse daher langfristig und im Vergleich zur unmittelbaren Umgebung mit einem vergleichsweise hohen oberflächennahen Wasserumsatz zu rechnen.

Die Tiefenbereiche sind infolge ihrer hydrologischen Position gegenüber Ablagerungen von Materialien, insbesondere von Schlacken, kritisch zu bewerten. Das Risiko einer Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwasser steigt dort zudem durch sporadisch, in Hauptflußtälern episodisch auftretender Überflutungen.

Der rein mechanischen Materialverlagerung, z. B. durch unvermittelte Massenbewegungen oder durch kontinuierliche erosive Vorgänge, ist durch die Wahl geeigneter Naturräume vorzubeugen. Als einfacher Bewertungsfaktor kann die **Hangneigung** berücksichtigt werden. Mit ihr können einerseits die Bewertung der Lagerungsstabilität einer naturnahen Ablagerung festgelegt, andererseits auch die Abflußeigenschaften eines Gebietes modifiziert werden. So ist nach Scheffer & Schachtschabel (1992) bei zunehmenden Hangneigungen mit einem Anstieg der relativen Erosion zu rechnen, gleichbedeutend mit dem Risikozuwachs des flächenhaften Abtrags oberflächennaher Schichten. Gleichzeitig verändert sich jedoch auch der oberflächennahe bzw. oberirdische Abfluß mit den Gefälleverhältnissen, wobei der Anteil dieser Abflußkomponenten am Gesamtabfluß nach Baumgartner & Liebscher (1995) generell mit steigenden mittleren Gefälleverhältnissen eines Gebietes zunimmt.

5 Datengrundlage, -verarbeitung und Bewertungsmodell

Als Grundlagen der Standortanalyse dienen in dieser Arbeit einerseits geowissenschaftliche Daten bzw. Informationen und andererseits die zur Datenauswertung notwendige Software. Beide unterliegen bestimmten Organisationsformen, die als Voraussetzung für die Zusammenführung und gemeinschaftliche Analyse aller für die Standortbewertung relevanter Informationen gelten. Mit anderen Worten erfordern Standortbewertungsprozesse ein umfassendes Datenmanagement. Hierbei bilden Geoinformationssysteme (im folgenden nur noch mit der gebräuchlichen Abkürzung GIS bezeichnet) den Kern des Datenmanagements, sie dienen vor allem zur Analyse und Präsentation raumbezogener Daten, darüber hinaus zur Archivierung der Objektgeometrien.

Generell unterscheidet man nach den **Datengrundlagen**, verstanden als unveränderte Datenbestände (Primärdaten, Rohdaten), der **Datenverarbeitung**, im Sinne der benutzten Software und Datenformate, den **Basisdaten** (Sekundärdaten) sowie dem methodischen Bewertungsansatz, als wesentlichste Grundlagen der nachfolgenden Standortanalyse (vgl. Abb. 5-1 und 5-2).

5.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage dienen neben den bereits zur Verfügung stehenden digitalen Datenbeständen analoge, insbesondere in Form von geowissenschaftlichem Kartenmaterial und den dazugehörigen Erläuterungen sowie Dissertationen, Diplomarbeiten und sonstige über den Untersuchungsraum publizierte Literatur. Ebenso erweisen sich geowissenschaftliche Gutachten und analoge Datenbestände der Ämter als wertvolle Datenquellen, sind aber im ersten Fall überwiegend aus privat- und im zweiten aus datenschutzrechtlichen Gründen nur schwer zugänglich. Zudem wird die Einarbeitung solcher Daten, durch vergleichsweise hohe Zeitabstände zwischen Antragsstellung auf Dateneinsicht und Genehmigung, erschwert. In vielen Fällen muß auf diese Datenquellen wegen der Einhaltung einer vernünftigen Bearbeitungszeit komplett verzichtet werden.

Zu Beginn der Datenerhebung muß i. d. R. eine Entscheidung getroffen werden, in welchen Maßstäben gearbeitet wird, also welche Genauigkeit die einzelnen Datenobjekte bezüglich ihrer räumlichen Lage bzw. Ausdehnung vorzuweisen haben. Für jedes kartographisch dargestellte Ergebnis bestimmt prinzipiell das kleinmaßstäblichste Datenobjekt, das zur Erstellung der Karte herangezogen wurde, die maximale Auflösung. Um nun nicht von vorne herein einen Ausschluß möglicherweise brauchbarer Daten aufgrund ihrer reduzierten Genauigkeit zu bewirken, wurden für diese Arbeit generell alle verfügbaren Daten unabhängig vom Maßstab in Betracht gezogen. Die Tabelle 5-1 gibt

eine erste Übersicht der verwendeten Datenbestände für den Regierungsbezirk Unterfranken und zugehöriger Quellen.

Tab. 5-1: Datenbestände, die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen bzw. erhoben wurden.

Topographie der TK 25 (Gewässer, Siedlung, Waldflächen, Verkehrswege etc.)	- ATKIS 25 – Vorstufe der bayerischen Vermessungsverwaltung ^{1.1)}
Daten zur Geländehöhe im Rasterabstand von 50 m (Digitales Geländemodell DGM)	- x,y,z-ASCII-Datensatz der bayerischen Vermessungsverwaltung ^{1.2)}
Klimadaten (Niederschlag, Verdunstung)	- Bayerischer Klimaatlas (1996) - Agrarmeteorologischer Klimaatlas Bayern (1997)
Geologische Daten	- GÜK 1:500.000 Bayern ^{2.1)} - GÜK 1:200.000 Bamberg ³⁾ - GÜK 1:200.000 Erfurt ³⁾
Hydrochemische Daten	- Datenbank des LFW Bayern ⁴⁾ - Dissertationen, Diplomarbeiten - Erläuterungen zur Geologischen Karte - Datenbank des GLA Bayern ^{2.2)} - eigene Analysen
Geochemische Daten	- Dissertationen, Diplomarbeiten
Hydrologische Daten (Quellen)	- TK 25 ⁵⁾
<p>1.1) Daten wurden vom StLMU gemäß der dortigen Nutzungsbedingung vom 31.05.1995, AZ.:1/513C, für die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens F151 „Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum“ zur Verfügung gestellt 1.2) wie 1.1 jedoch unter der Nutzungsbedingung vom 09.11.1994, Az.:Vm2255B-4718 2.1) Daten wurden vom GLA Bayern gemäß der Nutzungsbedingung vom 22.01.1998, Nr. 303.2.1-1-1121 für die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens F151 „Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum“ zur Verfügung gestellt 2.2) wie 2.1 jedoch unter der Nutzungsbedingung 28.09.1998, Nr. 504.3-122-4022 3) Daten wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zur Verfügung gestellt 4) Daten wurden gemäß der Nutzungsbedingung vom 04.12.1998, Az.:D22-1074.400/Z09 vom LFW Bayern für die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens F151 „Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum“ zur Verfügung gestellt 5) Die Daten wurden unter freundlicher Mitwirkung des Herrn Dipl.-Geol. B. Schäfers digital erhoben</p>	

Dissertationen, Diplomarbeiten und die Erläuterungen zu den Geologischen Karten 1:25.000 sowie Fach-, Informations- und Tätigkeitsberichte des Landesamtes für Wasserwirtschaft und Geologischen Landesamtes Bayern sind als analoge Datengrundlagen besonders hervorzuheben. Des Weiteren sind hierbei auch Unterlagen zum Raumordnungsverfahren Trinkwasserversorgung Unterfranken der REGIERUNG V. UNTERFRANKEN (1981) und den wasserwirtschaftlichen Rahmenuntersuchungen Donau und Main des BAYERISCHEN STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (BAYSTLMU, 1994) anzuführen. Bei der Literatur- und Datenrecherche stellte sich heraus, daß nicht auf alle im Institut für Geologie der Universität Würzburg verzeichneten Diplomarbeiten, die im Bearbeitungsraum durchgeführt wurden, zurückgegriffen werden konnte. Gleiches gilt für die hydrogeologisch ausgerichteten Dissertationen, die nicht ausnahmslos am Würzburger Institut entstanden sind.

Um mögliche Folgearbeiten in der Region zu erleichtern, soll eine Übersicht der gesichteten Regionalliteratur, sowie ein Hinweis auf hydrogeologisch (auch hydrologisch und hydrogeochemisch)

verwertbare Daten (vgl. Anlage, Karte 3) gegeben werden. Die Gliederung erfolgte in Übersichtsliteratur (vgl. Tab. 5-2) und Spezialarbeiten (Diplomarbeiten & Dissertationen), bezogen auf die Blattsnitte der TK25. Die vollständigen Zitate sind jeweils dem Literaturverzeichnis zu entnehmen.

Tab. 5-2: Hydrogeologisch relevante Übersichtsliteratur für den Regierungsbezirk Unterfranken

Quelle	Jahr	Titel (z. T. in gekürzter Fassung)
BAYLFW	1978	Das Mainprojekt
	1996	Grundwasserneubildung in Bayern
	1998	Grundwasser in Bayern, Wasserbeschaffenheit
UDLUFT, P.	1978a	Das Grundwasser Frankens und angrenzender Gebiete
WITTMANN, O.	1991	Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern
REGIERUNG V. UNTERFRANKEN	1981	Trinkwasserversorgung in Unterfranken
BAYSTLMU	1985	Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Donau und Main
	1994	Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main
HOFMANN, M.	1989	Tiefengrundwässer Unterfrankens
GATTENLÖHNER, H.	1996	Ermittlung geogener Stoffkonzentrationen im Grundwasser v. Ufr.

5.2 Datenverarbeitung - GIS

Die digitale Erfassung, Haltung und Verarbeitung der Datenbestände erfolgte mit kommerziell erhältlichen Softwareprodukten, die über integrierte Schnittstellen einen gegenseitigen Datenaustausch ermöglichten (vgl. Abb. 5-1). Ein GIS übernahm dabei zentrale Funktionen. GIS sind rechnergestützte Systeme und dienen zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von raumbezogenen Informationen (BILL & FRITSCH, 1991). GIS zeichnen sich durch gemeinsame Verwaltung und Analyse von graphischen und alphanumerischen Daten aus (MOEGERLE & SCHÜLLER, 1994).

Bei der Haltung, Homogenisierung und z. T. auch Auswertung alphanumerischer Daten wurde des Weiteren auf standardisierte Datenbank- bzw. Tabellenkalkulationssoftware zurückgegriffen. Die Digitalisierung raumbezogener Datenobjekte wurde mit wenigen Ausnahmen außerhalb des GIS mit anderen Anwendungsprogrammen durchgeführt.

Datenstrukturen

Grundsätzlich stehen in einem GIS Geometriedaten und Fachdaten als Datentypen zur Verfügung. BILL & FRITSCH (1991) nennen an dieser Stelle auch noch Graphikdaten, die i. d. Regel die graphische Ausprägung oder Beschreibung eines Objektes (z. B. Polygon), meist in Verbindung mit bestimmten Objektattributen (Fachdaten) definieren.

- **Geometriedaten**

Bei den Geometriedaten unterscheidet man zwischen **Vektordaten** und **Rasterdaten**. Folglich gibt es in der Praxis entweder mehr vektor- oder rasterorientierte GIS, der Trend geht jedoch hin zum hybriden System, wo beide Datentypen gleichermaßen behandelt, analysiert und dargestellt werden können.

Vektordaten

In Vektormodellen ist der Punkt der Träger der geometrischen Information (FRANK, 1983). Alle höheren Strukturen (Linien, Flächen usw.) bauen auf dem Punkt auf. Ebenso lassen sich aus den Koordinaten der Punkte sämtliche geometrische Aussagen für höhere Strukturen ableiten, wie etwa die Länge von Verbindungen, der Flächeninhalt, der Abstand zweier geometrischer Figuren und ähnliches mehr (BARTELME, 1995). Letztendlich unterscheidet man bei Vektordaten zwischen den Grundelementen Punkt, Linie, Polygon. Flächenobjekte (z. B. geologische Einheiten), Linienobjekte (z. B. Flußlauf) und Punktobjekte (z. B. Bohrung) können durch das „Anhängen“ von Attributen neben den geometrischen, beliebige sachliche Informationen bereitstellen. Darüber hinaus sind die GIS so konzipiert, daß eine Verknüpfung zwischen einem Vektorobjekt und weiteren zugehörigen Attributen, die in einer externen Datenbank abgelegt sind, über einen gemeinsamen Schlüsselcode jederzeit gewährleistet ist.

Die derzeitigen GIS verfügen über eine vielfältige Funktionalität zur Behandlung von Vektordaten. Somit können in vielen Anwendungen Vektordaten mit dem Vorteil ihrer Lagengenauigkeit und mannigfaltigen Attributierung in vollem Umfang genutzt werden.

Rasterdaten

Rasterdaten beziehen sich auf Flächen. Das geometrische Grundelement ist die Rasterzelle bzw. Rastermasche, welche zeilen- und spaltenweise in einer Matrix gleichförmiger, im allgemeinen quadratischer, seltener rechteckiger Elemente angeordnet ist. Jede Rastermasche besitzt eine Eigenschaft in Form eines Attributwertes (z. B. Farbwert). Über die Abmessungen einer Rasterzelle und ihrem Bezugspunkt sind Positionen, Distanzen und Winkel einfach in ganzzahlige Vielfache der elementaren Maschenweite umzurechnen. Zudem ist eine Rasterzelle immer eine flächige Struktur, wodurch anhand von Summation, Differenz oder logischer Vergleiche von Elementarzellen geometrische Abfragen, die die Fläche betreffen einfach durchgeführt werden können.

- **Sachdaten**

Sachdaten repräsentieren alle nichtgeometrischen Eigenschaften (z. B. Nummern, Namen, Meßwerte usw.) von Objekten. Sie werden auch als beschreibende Daten, Fachdaten oder Attri-

bute bezeichnet und meist in einer externen Datenbank vorgehalten und bei Bedarf über Abfragen für spezielle GIS-Anwendungen verfügbar gemacht. So erhält z. B. ein punktförmiges Objekt, neben seiner geometrischen Information, eine Reihe zusätzlicher Sachinformationen über die Verknüpfung mit der Fachdatenbank. Als Beispiel sei hier eine Quelle angeführt, die Attribute zum Ausbau (z. B. „gefasst“), Schüttung (z. B. 1 l/s) und zur Wasserbeschaffenheit (z. B. 100 mg/l Ca⁺⁺) über eine Datenbankabfrage erhalten kann.

Genauigkeit geometrischer Daten (Maßstab)

Bestimmend für die Genauigkeit der geometrischen Daten sind insbesondere der Aufnahmemaßstab, d. h. der minimale Abstand der noch unterscheidbaren Objekte, die benutzten Aufnahmeverfahren sowie die eingesetzten Datenmodelle- und -strukturen (z. B. Vektor- oder Rasterdatenmodelle). Häufig wird schon beim Aufnahmeverfahren die Konvertierung zwischen unterschiedlichen Datenmodellen nötig, was die Zahl der Fehlerquellen erhöht. Die Ableitung von Vektordaten aus eingescannten Karten, die pixelweise gespeichert werden, ist solch ein Fall, in dem die Konvertierung von Raster zu Vektormodell und entsprechend zwischen zwei verschiedenen Datenstrukturen durchgeführt wird.

Die Frage nach dem Maßstab bzw. der Auflösung der verwendeten Daten, stellt bei der raumbezogenen Analyse ein grundlegendes Problem dar. Werden eigens neue Daten erhoben, so kann bereits im Entstehungsprozeß ein über das gesamte Datenspektrum hinweg vereinbarter Maßstab eingehalten werden, sofern die entsprechenden Datengrundlagen (z. B. Karten) in gleichen Maßstäben vorliegen. In diesem Fall liegen die möglichen Genauigkeitsfehler einerseits in der Datengrundlage selbst und andererseits bei der digitalen Erfassung. Letzteres ist von den Kenntnissen des Bearbeiters und den Einschränkungen des technischen Erfassungssystems abhängig.

Für die vorliegende Arbeit wurden jedoch, im Bezug auf den Maßstab bzw. der Genauigkeit, sehr unterschiedliche Datenquellen herangezogen. So stammen beispielsweise die geologischen Daten vorzugsweise aus der digital erfaßten Geologischen Karte von Bayern 1:500000. Werden nun Objekte, deren Geometrie einem größeren Maßstab zu Grunde liegen, mit den Geologischen verschnitten, liefert das Ergebnis immer nur Daten mit der Genauigkeit des kleinsten Maßstabes aller verwendeten Daten, in diesem Falle also der Geologischen.

GIS-Software

Die Softwareauswahl erfolgte nach den Gesichtspunkten der Datenkompatibilität, Hardwarevoraussetzung, Hybrides System und nicht zuletzt nach den Anschaffungskosten. Für die gis-spezifischen Aufgaben wurde auf die Software ARCVIEW, Version 3.0a und 3.1 mit dem Erweiterungsmodul SPATIAL ANALYST, Version 1.1 der Firma ESRI zurückgegriffen. In dieser Ausführung bietet die Software sowohl für die Verarbeitung von Vektor- als auch von Rasterdaten gleichermaßen hohe

Funktionalitäten. Zudem kann die Bandbreite der Anwendungen über die systemeigene Programmiersprache AVENUE erheblich erweitert werden. Die Software kann ohne weiteres auf DOS/WINDOWS basierende PC-Systeme implementiert werden, wobei sich dabei die Systemressourcen im weitesten nach dem zu verarbeitenden Datenumfang richten müssen. Die Datenkompatibilität ist in den meisten Fällen gewährleistet, da entweder die Daten schon in den mittlerweile weit verbreiteten Datenformaten von ARCVIEW vorliegen oder über zahlreiche Konvertierungswerkzeuge in ein für ARCVIEW lesbares Format umgewandelt werden können. Ein problemloser Datenaustausch mit gebräuchlicher PC-Datenbanksoftware (z. B. MS ACCESS) ist über die standardisierte Datenbankabfragesprache SQL (Structured Query Language) möglich.

Die Erhebung, Haltung und statistische Auswertung alphanumerischer Daten (z. B. hydrochemische Daten) wurde mit Tabellenkalkulations- und Datenbanksoftware durchgeführt. Sie dienten ebenso zur Homogenisierung von bereits digital vorliegenden und neu digitalisierten Datenbeständen. Als Datenbanksoftware wurde dem Produkt ACCESS 97 aus der Microsoft Office Gruppe Vorzug gegeben, da zum einen ein verlustfreier Datenaustausch mit ARCVIEW gewährleistet ist und zum anderen das Programm eine relativ kurze Einarbeitungsphase erfordert. ACCESS wurde im wesentlichen zum Aufbau einer hydrochemischen Datenbank eingesetzt. Daneben wurden auch Tabellenkalkulationsprogramme wie EXCEL (Version 97) und SPSS (Version 8.0) zur Auswertung und Darstellung der vielfältigen Daten verwendet. Bei der Eingabe von mehreren Datensätzen aus der gleichen Quelle hat sich das Programm EXCEL bewährt. Gegenüber ACCESS können hier die Daten wesentlich effizienter in eine digitale Form und anschließend in ein gemeinsames Format überführt werden. Dabei sei jedoch erwähnt, daß im Vergleich zu Datenbankapplikationen bei der Dateneingabe in EXCEL keine Eingabeüberwachungsfunktion, die sogenannte Fehlertriggerung, zur Verfügung steht. Das Programm SPSS ergänzt die Funktionalitäten der beiden Microsoft Produkte durch weitere Auswertungsalgorithmen im Bereich der Statistik (z. B. Clusteranalysen).

5.3 Erfassung der Basisdaten

Zur Digitalisierung geometrischer Daten können wurde das auf DOS basierende Programm POLYPLOT (Version 4.1) verwendet. Das Programm wurde am Institut für Geographie der Universität Hamburg erstellt und speziell für geowissenschaftliche Fragestellungen konzipiert. Die uneingeschränkte Kompatibilität mit ARCVIEW, die einfache Handhabung sowie die geringen Ansprüche an das PC-System waren die ausschlaggebenden Aspekte für die Wahl des Programmes. Neben der Digitalisierungssoftware wurden digitale topographische Raster-Kartenwerke (1:50000 und 1:25000), integriert in speziell für die Darstellung entwickelte Software (GISCAD®, CD-Atlas 25

Bayern Nord; TOPO 50, Ausgabe Bayern Nord), zur Digitalisierung von Punktobjekten und zur Überprüfung der Lagengenauigkeit bereits digital vorliegender Punktobjekte (z. B. Quellen), herangezogen. Darüber hinaus bietet der CD-Atlas von GISCAD über den standardisierten ASCII-Code eine Exportfunktion für digitalisierte Punktobjekte. Ein wesentlicher Vorteil dieser Kartenwerke liegt in ihrer georeferenzierten Darstellung. Somit lassen sich die Koordinaten sogenannter *Ground Control Points*, die z. B. für die Referenzierung eingescannter Karten notwendig sind, relativ einfach onscreen ermitteln.

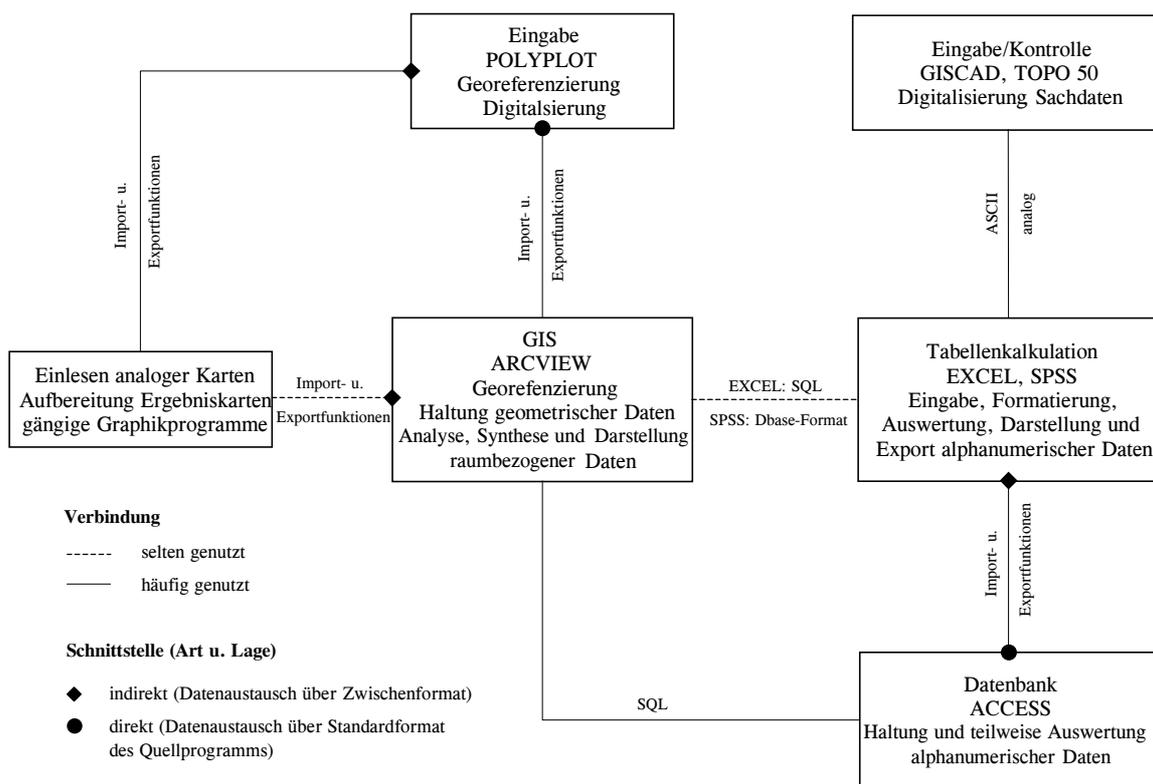


Abb. 5-1: Konfiguration des Arbeitsplatzes

Bei den in (Geo-)Informationssystemen genutzten Daten wird nach SBRESNY (1997) grundsätzlich zwischen Basisdaten und abgeleiteten Daten unterschieden. Dabei stellen die Basisdaten nicht abgeleitete Daten dar, die entweder in einer Datenbank des benutzten Systems vorgehalten oder von anderen, außen stehenden Informationssystemen zugeführt werden. Werden die Daten von außen zugeführt, kann es sich bereits um abgeleitete Daten handeln, sie werden aber im Rahmen des benutzten Systems dennoch als Basisdaten gehalten. Werden auf den Basisdaten Methoden angewendet, spricht man beim Resultat von abgeleiteten Daten.

In der vorliegenden Arbeit wurden die zugeführten Rohdaten durch Anwendung unterschiedlicher Methoden aufbereitet und bildeten die Basis- bzw. Eingangsdaten für das Modell Standortanalyse. Alle Daten, die durch Anwendung der Methoden des Modells entstanden, wurden als abgeleitete Daten oder Ergebnisdaten geführt (vgl. Abb. 5-2).

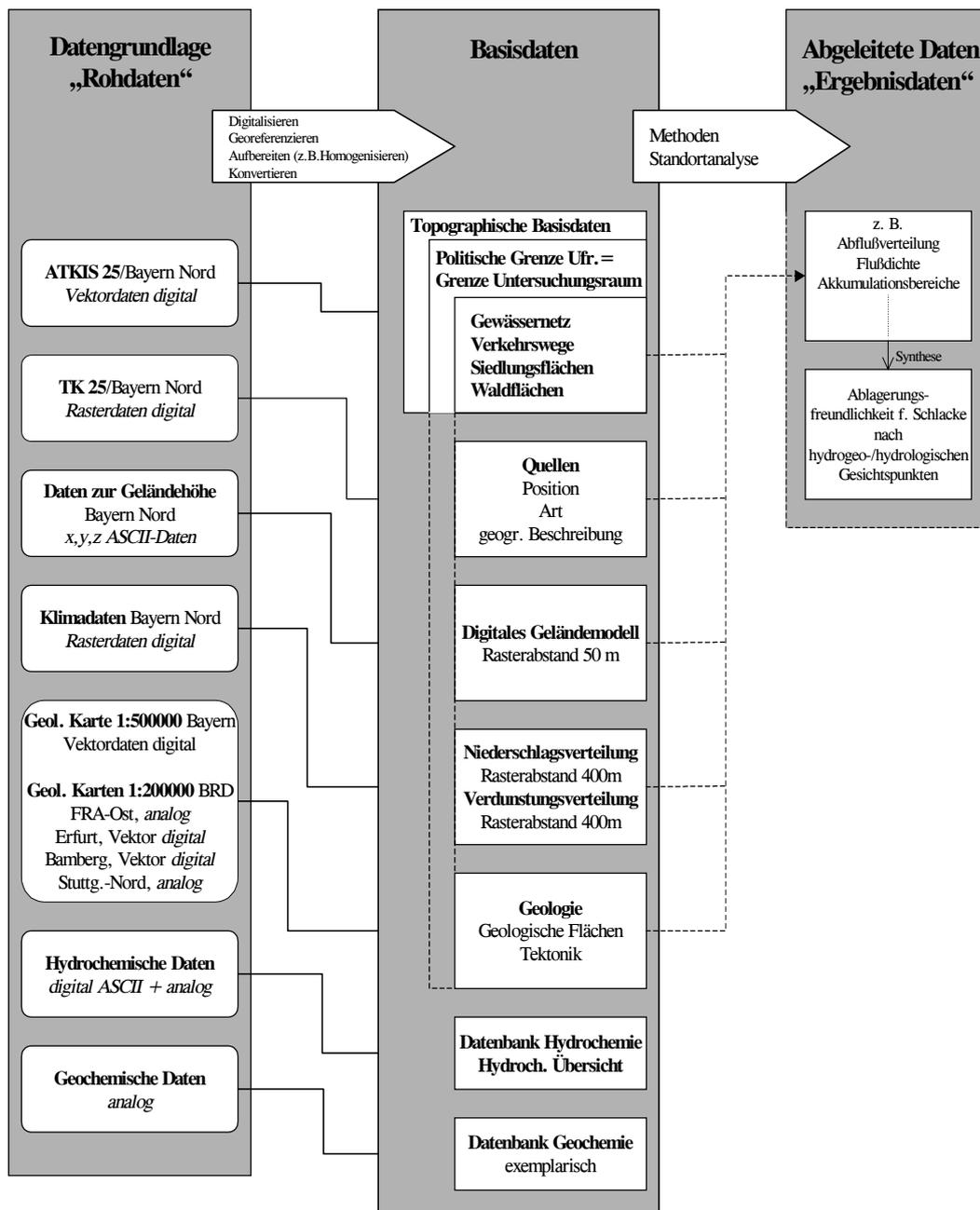


Abb. 5-2: Schematisches Datenmodell

Im vorliegenden Kapitel gilt das Hauptaugenmerk den Basisdaten, für deren Erhebung, Haltung und Aufbereitung ein vergleichsweise hoher Aufwand betrieben werden muß. Da bereits ein Großteil der vorhandenen Daten auf den 4. Hauptmeridian des Gauß-Krüger-Bezugssystem abgebildet ist, wird dieses als gemeinsames geodätisches Bezugssystem für alle weiteren Aufgaben festgelegt.

5.3.1 Topographie

Die topographischen Basisdaten entstammen dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS 25-Vorstufe) der bayerischen Vermessungsverwaltung. Die Rohdaten wurden für den Bereich Nordbayern als Coverages (Vektordatenformat von ARC/INFO) vom BAYSTLMU zur Verfügung gestellt. Sie sind ausnahmslos auf den 4. Hauptmeridian des Gauß-Krüger-Bezugssystems abgebildet. ARC/INFO-Coverages können direkt von ARCVIEW verarbeitet werden, es empfahl sich jedoch eine Konvertierung aller zur Verwendung kommender Coverages in SHAPE-Themen (SHAPE = Standardvektorformat von ARCVIEW) durchzuführen, um sowohl die gesamte Funktionalität des GIS ARCVIEW nutzen zu können, als auch die nachfolgenden Arbeitsschritte zu beschleunigen und effizienter zu gestalten.

Grundlegender und für viele weitere Basisdaten notwendiger Arbeitsschritt war die Festlegung und Erstellung der Arbeitsbereichsgrenze, die sich mit der Regierungsbezirksgrenze von Unterfranken deckt. Die bayerischen Regierungsbezirke stehen nach der Konvertierung als Polygone zur Verfügung und können über den Regierungsbezirkcode abgefragt und im konkreten Fall Unterfranken als eigenständiges Polygon abgespeichert werden. Dieses steht dann für folgende Ausschneideschritte zur Verfügung. Über die sogenannte CLIP-Funktion, die bereits in verschiedenen Erweiterungen von ARCVIEW als Option enthalten ist, können nun alle relevanten Themen (Gewässer, Siedlungsflächen, Verkehrswege, Waldflächen), unabhängig vom Typ (*point*, *line*, *polygon*), für das Arbeitsgebiet ausgeschnitten und als neue Themen gespeichert werden. Die Attributierung des ATKIS 25 bleibt dabei vollständig erhalten. Somit stehen topographische Basisdaten, bezogen auf den Regierungsbezirk Unterfranken, für weitere Arbeitsschritte zur Verfügung.

5.3.2 Quellen

Zur Erhebung der topographischen Basisdaten von Quellen stehen im Prinzip nur die topographischen Karten 1:25000 zur Verfügung, da sie die einzigen flächendeckenden Grundlagen darstellen, die relativ genaue Informationen zum Auftreten und zu Positionen von Quellen bereitstellen. Für die

Lokalisation, die Art der Quelle (z. B. Brunnen) und eine geographische Beschreibung stand mit der Software GISCAD ein digitales Kartenwerk auf der Basis der TK 25 bereit. Die einzelnen Karten liegen dort als Bildraster vor und sind blattschnittfrei aneinander gefügt. Als Bezugskordinaten können neben geographischen auch Gauß-Krüger (hier bezogen auf den 4. Hauptmeridian) gewählt werden. Über einfach zu handhabende Werkzeuge können die Quellen als Punkobjekte digitalisiert und mit ihren Lagekoordinaten und zusätzlichen Attributen als ASCII-Code gespeichert werden. Die ausgegebene Datentabelle zeigt folgenden Inhalt:

Tab. 5-3: Datentabelle der Quellen; Daten erhoben aus der TK 25 im Digitalen Kartensystem GISCAD

Feldbezeichnung	Feldinhalt
RW	Rechtswert (Gauß-Krüger, 4. Hauptmeridian)
HW	Hochwert (Gauß-Krüger, 4. Hauptmeridian)
Nummer	laufende Nummer
Bezeichnung	Qi: Quelle intermittierend; Anfangspunkt aller gestrichelten Gewässerlinien Qp: Quelle perenierend; Anfangspunkt aller durchgezogenen Gewässerlinien Qg: Quelle gekennzeichnet mit blauem Punkt oder Kreis, meist mit „Qu“ bezeichnet Br: Brunnen gekennzeichnet als blauer Kreis, Quadrat oder Kreis mit Punkt, meist mit „Br“ bezeichnet; entspricht in den meisten Fällen einer Quelle oder einem oberflächennahen Q-Horizont
Folie	Foliename in GISCAD
Darstellung	gewählte Darstellungsart in GISCAD
Blattnummer	Blattnummer des jeweiligen topogr. Blattes auf dem die einzelnen Punkobjekte liegen
Ortsbezeichnung	Name der einzelnen Lokalitäten, falls vorhanden
Bemerkungen	zusätzliche Bemerkungen zu den einzelnen Punkobjekten

Auf die in der Tabelle 5-3 und der Abbildung 5-3 dargestellten Weise wurden für den Raum Unterfranken insgesamt 7556 Punkobjekte als Quellen digitalisiert. Wie aus der Tabelle 8-4 ersichtlich, treten die als Brunnen gekennzeichneten Lokalitäten (Br), wie auch die Anfangspunkte der Gewässerläufe mit intermittierender Wasserführung (hier: Qi), stark zurück.

Tab. 5-4: Statistik der digitalisierten Quellpunkte für den Raum Unterfranken

Bezeichnung	Anzahl	Anteil [%]
Br	342	4,53
Qg	2659	35,19
Qi	127	1,68
Qp	4428	58,60
Summe	7556	100

thema dargestellt und anschließend als eigenes Thema vom Punkt-Typ abgespeichert, welches gleichzeitig den Basisdatensatz für die weiteren Arbeiten bildet.

5.3.3 Digitales Geländemodell

Zur Erstellung des digitalen Geländemodells standen für den Bereich der Regierungsbezirke Unter-, Mittel- und Oberfranken x,y,z-Koordinaten im Abstand von 50 Meter im ASCII-Datenformat zur Verfügung. Der gesamte Datensatz umfaßte 19.992.000 Koordinatentripel. Die x,y-Komponenten entsprechen den Rechts- und Hochwerten des 4. Hauptmeridians des Gauß-Krüger-Bezugssystems und müssen daher nicht mehr transformiert werden. Um Speicherplatz zu sparen, wurde bei den x,y-Komponenten jeweils die 1. Stelle (also die Zahl 4 bei x und 5 bei y) weggelassen. Die z-Komponente enthält die Höhenangabe in [m NN] jeweils als ganze Zahl.

Da auf PC-Ebene und insbesondere unter WINDOWS-Umgebung ein derartiger Datenumfang nicht bearbeitet werden kann, wurde zur Haltung und Sortierung der Daten auf UNIX-Systeme des Rechenzentrums der Universität Würzburg zurückgegriffen. Der entscheidende Vorteil der UNIX-Umgebung liegt im sequentiellen Zugriff auf Datenbestände beliebigen Umfangs. Die Aufbereitung des Datensatzes für die GIS-Anwendung erfolgte in den Schritten

- Addition von 4000000 zur x-Komponente und 5000000 zur y-Komponente,
- Sortierung in der Reihenfolge x_{\min}, y_{\max} (1. Zeile) und x_{\max}, y_{\min} (letzte Zeile),
- Extraktion der sortierten z-Komponente,
- Erstellung einer für ARCVIEW spezifischen Kopfzeile.

Für die ersten drei Schritte wurde mit freundlicher Unterstützung des Rechenzentrums (HR. RUFF) ein UNIX-Script entwickelt, welches durch die Angabe der entsprechenden Eckkoordinaten das Ausschneiden frei definierbarer, rechteckiger Bereiche ermöglicht.

Die extrahierten und sortierten z-Werte werden unter hinzufügen der folgenden Kopfzeile in ARCVIEW eingelesen:

```
ncols [Anzahl Spalten]
nrows [Anzahl Reihen]
xllcenter [xmin]
yllcenter [ymin]
cellsize [Zellengröße]
nodata_value [Wert]; optional
```

Für den gesamten Datensatz und eine Zellengröße von 50 Meter ergibt sich die folgende Spalten- und Zeilenanzahl:

$$(x_{\max} - x_{\min}) / \text{cellsize} = (4525000 - 4280000) / 50 = 4900 \text{ Spalten}$$
$$(y_{\max} - y_{\min}) / \text{cellsize} = (5610000 - 5406000) / 50 = 4080 \text{ Zeilen}$$

Die eingelesenen x,y,z-Daten werden als binäres Grid in ARCVIEW verwaltet und stellen ein Geländemodell (im weiteren nur noch als DGM bezeichnet) für den Raum Gesamtfranken dar. Das entsprechende DGM für den Untersuchungsraum Unterfranken wurde durch Anwendung einfacher Kartenalgebra aus dem ursprünglichen DGM-Franken herausgeschnitten. Hierfür wurde das Polygon [Unterfranken], das als Basisvektordatensatz bereits erstellt wurde, in ein Grid [Unterfranken] konvertiert. Allen Zellen, die innerhalb der Untersuchungsgrenzen lagen, wurde der Wert 1 zugewiesen, allen außerhalb der Wert *NoData*. Schließlich erhält man durch Multiplikation der beiden Grids [DGM-Franken] und [Regierungsbezirk] das Geländemodell für den Untersuchungsraum Unterfranken (vgl. Karte 1, DGM 50).

5.3.4 Niederschlag und Verdunstung

Als Grundlage der Basisdaten des Niederschlags und der Gesamtverdunstung wurden Daten des Agrarklimatologischen Atlas von Bayern (RÖTZER et al., 1997) herangezogen. Sämtliche, dort verwendete agrarmeteorologischen Größen liegen als unregelmäßig über Bayern verteilte Stationswerte vor. Die Abbildung 5-4 zeigt die für den Untersuchungsraum relevanten Klimastationen. Die Regionalisierung der einzelnen Größen (hier: Niederschlag und Gesamtverdunstung) erfolgte nach WÜRLÄNDER (1997) im Rahmen des Atlas über die Geofaktoren Höhe über NN, geographische Länge und Breite, Geländeneigung, Strahlungsexposition, Landnutzung, relative Lage zu Höhenzügen (Luv-/Lee-Effekt), Größe von Kaltlufteinzugsgebieten und Nebelhäufigkeit. Der raumbezogene Einfluß der einzelnen Geofaktoren auf die agrarklimatologischen Größen wurde über multiple Regressionsanalysen ermittelt. Alle Berechnungen beziehen sich auf ein 400 x 400 Meter Raster. Weitere Einzelheiten zu den agrarklimatologischen Größen und Geofaktoren finden sich auf der CD-ROM des Agrarklimatologischen Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997).

Niederschlag

Der Niederschlag liegt als langjähriges Mittel für die Jahre 1961-1990 vor. Die Regionalisierung wurde in Abhängigkeit der Geofaktoren Höhe über NN und relative Lage zu den Höhenzügen durchgeführt. Dies erklärt beispielsweise die geringen Jahresniederschläge für die Region Mainfranken, die sich einerseits im Lee der Mittelgebirge befindet und andererseits vergleichsweise geringe Höhen erreicht. Die Niederschlagsdaten lagen in einem für ARCVIEW lesbaren Format vor und wurden für die Folgearbeiten nicht mehr weiter verändert.



Abb. 5-4: Die Regierungsbezirke Unter-, Mittel- und Oberfranken mit der Position der für Unterfranken im Rahmen des Agrarklimatologischen Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997) benutzten, relevanten Klimastationen.

Gesamtverdunstung ¹⁾

Die Gesamtverdunstung wird nach dem Agrarklimatologischen Atlas als die Summe aus der tatsächlichen Verdunstung und der Interzeption unter Berücksichtigung der Landnutzung verstanden. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgte dort nach der Methode von Penman unter Verwendung saisonaler Pflanzenfaktoren nach ERNSTBERGER (1987) und WENDLING (1995). Zur Berechnung der tatsächlichen aus der potentiellen Verdunstung wurde beispielsweise für landwirtschaftliche Kulturen auf die Gleichungen von SLABBERS (1980) und LÖPMEIER (1983) zurückgegriffen, bei den forstwirtschaftlichen Kulturen wurde nach ELLING et al. (1990) vorgegangen.

Die Interzeption wurde bei landwirtschaftlichen Kulturen nach der Methode von BREUCH-MORITZ & HÄCKEL (1989) abgeschätzt, bei forstwirtschaftlichen Kulturen nach ELLING et al. (1990).

1) alle aufgeführten Literaturstellen zur Gesamtverdunstung sind im Agrarklimatologischen Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997) zitiert

Da die Bodenart einen großen Einfluß auf den Wasserhaushalt und damit auf die Verdunstung ausübt, erfolgte für jede Landnutzungsclass nach Abbildung 5-5 die Zuweisung entsprechender Bodenarten nach Tabelle 5-5.

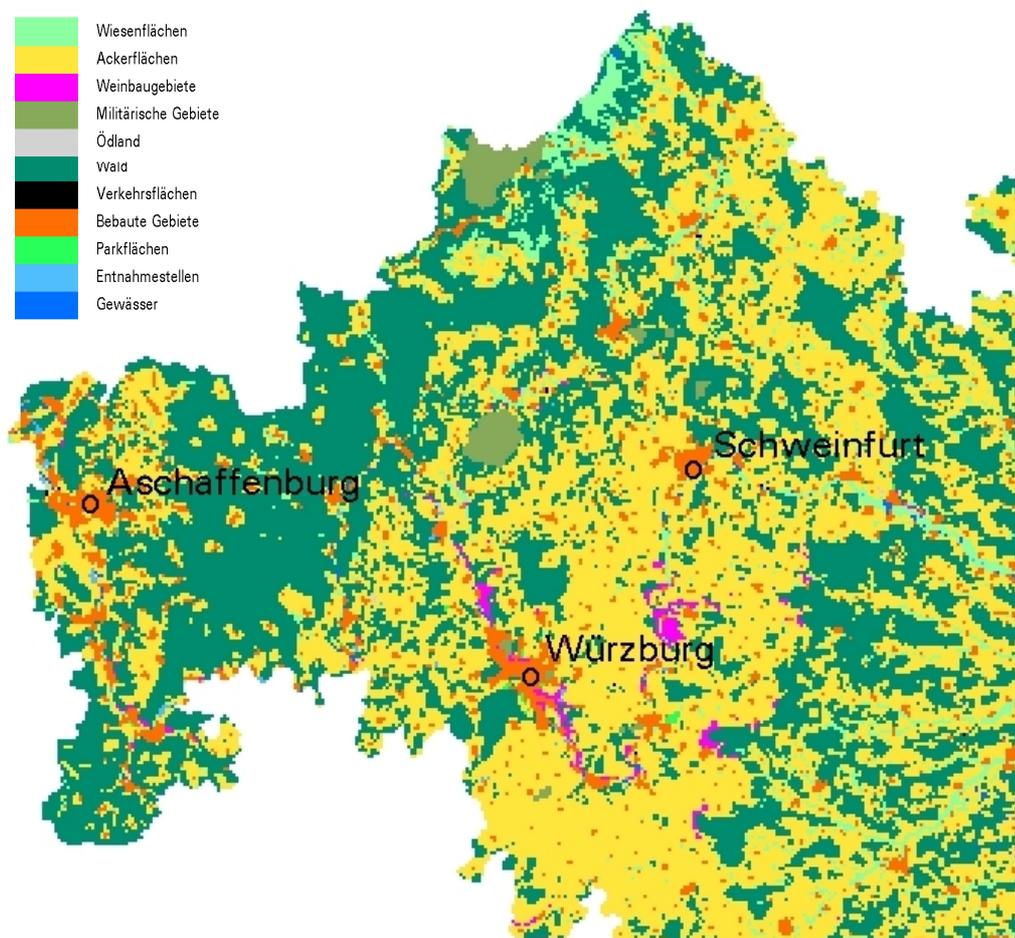


Abb. 5-5: Landnutzungsclassen im Untersuchungsraum unverändert nach Agrarklimatologischen Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997).

Die Gesamtverdunstung berechnet sich letztendlich in Abhängigkeit der Landnutzungsclassen, die sowohl die Information zum Pflanzenbewuchs als auch der Bodenbeschaffenheit beinhalten und der klimatologischen Größen. Eine detaillierte Beschreibung der angewandten Methoden ist bei RÖTZER (1997) nachzulesen.

Wie aus der Tabelle 5-5 ersichtlich, erfolgte für die Landnutzungsclass Weinbau keine Berechnung. Da gerade im Untersuchungsraum Unterfranken der Weinbau stark vertreten ist, wurde die Gesamtverdunstung der nicht berücksichtigten Flächen (Rasterzellen) unter Verwendung von Nachbarschaftsanalysen und Literaturwerten ergänzt.

Tab. 5-5: Landnutzungsklassen nach Agrarklimatologischem Atlas Bayern (RÖTZER et al., 1997)

Landnutzung	weitere Unterteilung	Anmerkungen zu den Wasserhaushaltsberechnungen
Wald		80% Fichte, 20% Rotbuche
Wiesen	Grasbrache Grünland Trockenrasen Feuchtwiesen	Grasbrache auf Lehm Grünland auf lehmigem Sand Grünland auf Sand Grasbrache auf Moor
Acker	nach Erzeugungsgebieten und Ertragsklassen	Fruchtfolge 1 ¹⁾ auf lehmigem Sand / sandigem Lehm / Lehm / Löß Fruchtfolge 2 ²⁾ auf lehmigem Sand / sandigem Lehm / Lehm / Löß Fruchtfolge 3 ³⁾ auf lehmigem Sand / sandigem Lehm / Lehm / Löß Fruchtfolge 1 und 3 auf lehmigem Sand / sandigem Lehm / Lehm / Löß
Weinbau		keine Berechnung
Militär. Gelände		10% versiegelte Flächen, 30% Wald, 30% Wiesen, 30% Ödland
Ödland		50% Grasbrache auf lehmigem Sand, 50% unbewachsener Boden
Verkehrsflächen		70% versiegelte Flächen, 30% Grasbrache auf lehmigem Sand
Bebaute Gebiete		60% versiegelte Flächen, 30% Grasbrache auf lehmigem Sand, 10% Wald
Parkflächen		60% Grasbrache auf lehmigem Sand, 40% Wald
Entnahmestellen		70% unbewachsener Boden, 30% Grasbrache auf Sand
Gewässer		100% Wasser
1) Fruchtfolge 1: Silomais - Winterweizen - Sommergerste 2) Fruchtfolge 2: Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste 3) Fruchtfolge 3: Spätkartoffel - Winterweizen - Sommergerste		

Gesamtverdunstung Weinbau

Als Datengrundlage zur Berechnung der Gesamtverdunstung der Weinbauflächen stehen die Gesamtverdunstung des Agrarklimatologischen Atlas (RÖTZER et al., 1997), die Hangneigung als Ableitung aus dem DGM sowie Vergleichsdaten aus der Literatur zur Verfügung. Zunächst werden alle Zellen im Rastermodell [Gesamtverdunstung], die keinen Wert enthalten (für den Untersuchungsraum alle Flächen die unter die Landnutzungs-kategorie „Weinbauggebiete“ fallen), durch die Werte der nächsten Nachbarn belegt. Dabei sind diejenigen, die auf einer Nachbarschaft zu Wasserflächen beruhen, herauszufiltern und getrennt zu berechnen, da sie sonst Werte erhalten, die der potentiellen Gebietsverdunstung (Verdunstung über Wasserflächen) entsprechen und demnach zu hoch sind.

Auf die oben beschriebene Weise erhält man für die Weinbergsflächen Verdunstungswerte, welche die lokalen klimatischen Gegebenheiten des Agrarklimatologischen Atlas berücksichtigen, jedoch mit Landnutzungsfaktoren, die nicht der angebauten Kultur (Weinreben) entsprechen, sondern der sie jeweils umgebenden Landnutzungs-kategorie. Da der Weinbau vorzugsweise an Steillagen erfolgt, sind ebenso andere Hangneigungsfaktoren zu berücksichtigen.

Informationen zur Interzeption und Transpiration von Weinreben lagen nicht vor. Der Bodenwasserhaushalt an bewirtschafteten Rebhängen in Mainfranken wurde von BÄRLE & UDLUFT (1995) im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens untersucht. Die Werte aus der Nachbarschaftsanalyse

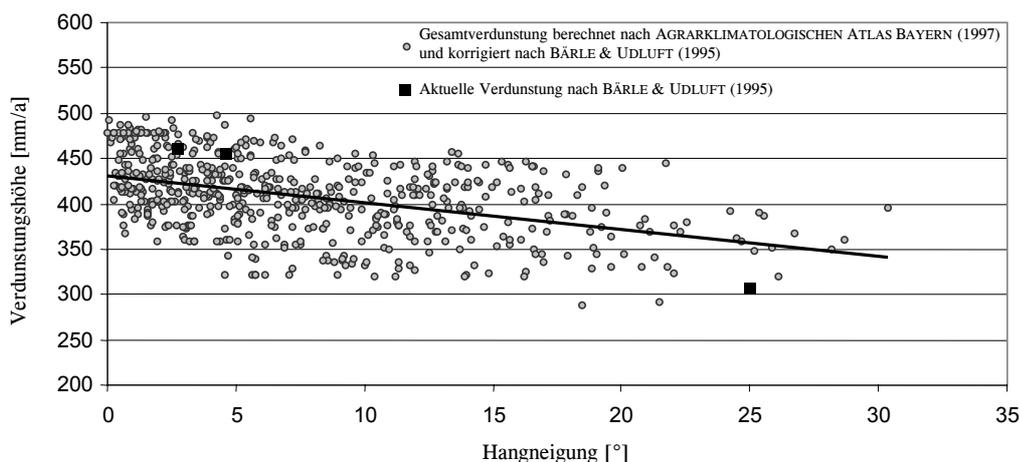


Abb. 5-6: Gesamtverdunstung und Aktuelle Verdunstung an Rebhängen Mainfrankens in Abhängigkeit der Hangneigung

wurden mit den Ergebnissen der Wasserhaushaltsberechnungen nach BÄRLE & UDLUFT (1995) abgeglichen. Merkbliche Abweichungen zwischen den Verdunstungswerten gab es nur in Bereichen steilerer Lagen. Dort wurden die aus der Nachbarschaftsanalyse stammenden Gesamtverdunstungswerte durch entsprechende, von der Hangneigung abhängige Reduktionsfaktoren korrigiert. Die Abbildung 5-6 zeigt die ermittelten korrigierten Gesamtverdunstungswerte im Vergleich zu den von BÄRLE & UDLUFT (1995) berechneten aktuellen Verdunstungshöhen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Ermittlung der Werte nicht auf den gleichen klimatischen Jahresreihen beruht und die Berechnungsverfahren nicht identisch sind. Ebenso ist zu beachten, daß im Rahmen des Klimaatlas allein durch die Auflösung in ein 400 x 400 m Raster eine Generalisierung erfolgen muß, bei der kleinräumige Verhältnisse wie bei den Berechnungen von BÄRLE & UDLUFT (1995) nicht einbezogen werden. Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, daß die Genauigkeit der für die Weinbergsflächen ermittelten Gesamtverdunstungswerte in der Verwendung als langjährige Jahresmittel für die vorliegende Arbeit ausreichend ist.

5.3.5 Geologie

Als geologische Grundlage lagen für diese Arbeit bereits digitale Daten vor. Dabei handelt es sich vorwiegend um die digitale Vorlage der Geologischen Karte 1:500.000 (GUK 500) von Bayern (BAYGLA, 1998). Weiteres digitales Kartenmaterial im Maßstab 1:200.000 wurden für die Blätter 6326 Bamberg und 5526 Erfurt von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

zur Verfügung gestellt. Des Weiteren wurde von BARTHEL (2000) eine *abgedeckte* (ohne Quartär) digitale Karte für den Raum Unterfranken aus den analogen Vorlagen der GUK 200 Blatt 6318 Frankfurt-Ost, Blatt 6326 Bamberg und Blatt 7118 Stuttgart-Nord, erstellt.

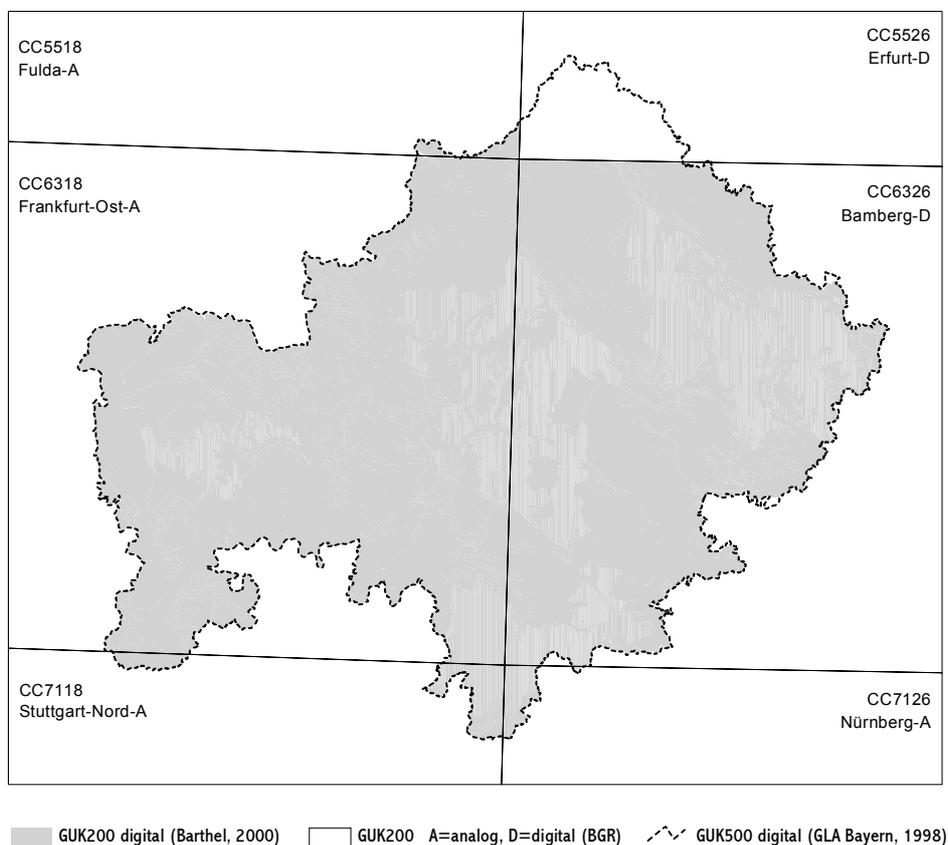


Abb. 5-7: Verwendete geologische Kartengrundlagen

Die geologischen Informationen der digitalen GUK500 von Bayern liegen in der Rohfassung im ARCINFO-Vektorformat, bezogen auf den 4. Hauptmeridian des Gauß-Krüger-Koordinatensystems, vor. Diese wurden in einem ersten Schritt in das Vektorformat von ARCVIEW konvertiert und in einem zweiten Schritt für den Untersuchungsraum Unterfranken ausgeschnitten. Die originale Attributierung bleibt während der Konvertierung vollständig erhalten.

5.3.6 Hydrochemie

Daten zur Beschaffenheit oberflächennaher Grund- und Oberflächenwässer wurden sowohl aus der Literatur entnommen als auch digital vom BayLFW und BayGLA zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden nach Eingabe homogenisiert und in einer Datenbank vorgehalten. Tabelle 5-6 gibt eine

Übersicht zur Datenherkunft und Zeitraum der Probenahme bzw. -analyse. Insgesamt standen für 1625 Entnahme- bzw. Beprobungsstellen 3169 Analysen (Stand: Dezember 2000) für die hydrochemische Auswertung zur Verfügung.

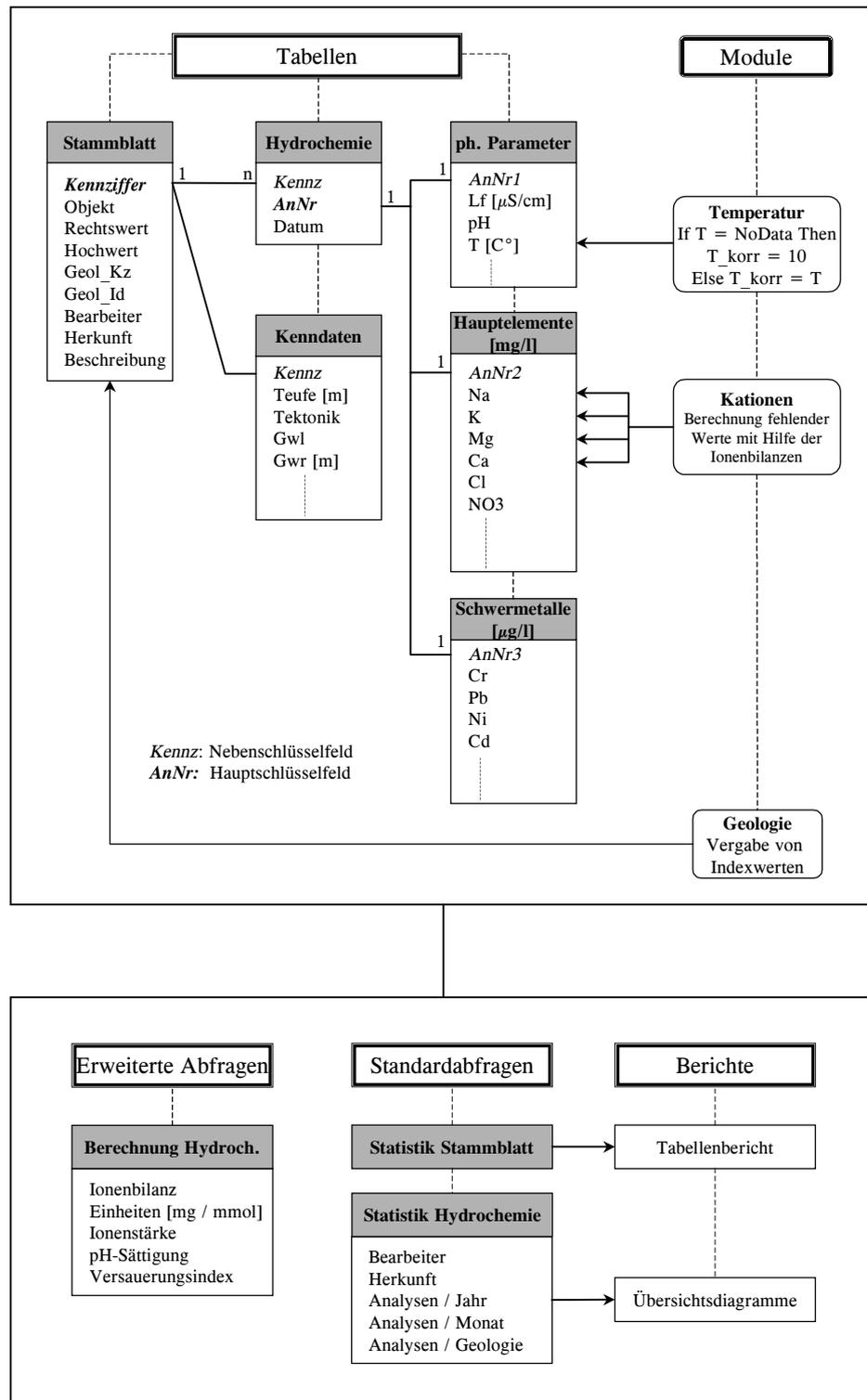


Abb. 5-8: Struktur der Datenbank mit Angabe der Verbindungstypen zwischen den einzelnen Tabellen, verwendeten Modulen und Abfragen. Bei einer Verbindung des Typs 1:n können einem Datensatz der Tabelle A mehrere Datensätze der Tabelle B zugeordnet sein. Bei einer 1:1-Beziehung ist jedem Datensatz in Tabelle A ein passender Datensatz in Tabelle B zugeordnet und umgekehrt.

Tab. 5-6: Herkunft der hydrochemischen Daten. Die Anzahl bezieht sich auf die Entnahmestellen.

Herkunft	Bearbeiter	Anzahl	Zeitraum	Herkunft	Bearbeiter	Anzahl	Zeitraum
Dipl	Ayad	4	1980	Dbank	LFW	191	1971 -1999
Dipl	Barthel	18	1994	Dipl	Mahmod	10	1983
Dipl	Bernerker	4	1978	Diss	März	70	1974
Diss	Bittersohl	88	1973	Dipl	Moghimi	21	1972 -1973
Dipl	Brandis	20	1998	Dipl	Nnani	5	1984
Dipl	Breitner	7	1984 -1985	Diss	Rajab	43	1975
Dipl	Buchner	16	1991	Dipl	Roda	11	1984
Dipl	Döpfner	28	1996 -1998	Dipl	Sabbagh	9	1981
Dipl	Feix	14	1998	Diss	Schmitt	155	1973
Diss	Georgatas	89	1970	Dipl	Scholz	5	1982
Dipl	Gholami	6	1984	Dipl	Schultheiss	18	1998
Erl	GLA	406	1954-1999	Dipl	Springer	3	1985
Dipl	Glaser	21	1992 -1993	Diss	Stamatis	70	1980
Dipl	Gold	19	1992-1993	Dipl	Stumpf	10	1996 -1997
Dipl	Herold	7	1981	Diss	Udluft	84	1968
Dipl	Hüggenberg	11	1982 -1983	Dipl	Walter	15	1993 -1994
Dipl	Keller	24	1984 -1985	Dipl	Weid	9	1984
Dipl	Koch	19	1999	Dipl	Woinack	3	1981
Dipl	Kraus	2	1995 -1997				
Diss	Kus	90	1999				
Summe						1625	

Dbank:Datenbank BAYLFW

Dipl:Diplomarbeit, vorwiegend Universität Würzburg

Diss:Dissertation

Erl:Erläuterungen GK25 (z. T. auch Datenbank), BAYGLA

Für die Haltung und Aufbereitung der hydrochemischen Daten wurde eine ACCESS-Datenbank angelegt. In der Abbildung 5-8 ist der Aufbau der Datenbank dargestellt. Dabei gilt das Hauptaugenmerk den hydrochemischen Parametern; weitere Kenndaten zu den einzelnen Objekten, wie z. B. die Tiefe oder Grundwasserspiegellhöhe bei Bohrungen oder Brunnen, die Schüttung bei Quellen, wurden nur schemenhaft in die Datenbank integriert, da nur für eine geringe Anzahl der behandelten Objekte hierfür Daten vorlagen. Ungeachtet dessen wäre es für hydrogeologische oder verwandte Betrachtungen nicht ohne Belang, derartige Informationen und Daten zu recherchieren und in die vorliegende Datenbank aufzunehmen.

Bei der Erstellung der Datenbank wurde auf die referenzielle Integrität der Datenbankelemente geachtet, die eine Weitergabe von Veränderungen (z. B. Löschen eines Datensatzes) in einer Tabelle an alle verbundenen Tabellen gewährleistet. Referenzielle Integrität bedeutet auch, daß kein Datensatz innerhalb der Datenbank gelöscht werden kann, der bereits eine Verknüpfung zu anderen Da-

tenbankelementen aufweist. Eine ebenso wichtige Forderung an die Datenbank ist die Redundanzfreiheit, d. h. jedes Element soll nur genau einmal auftreten.

Die angelegte Datenbank unterliegt einer hierarchischen Struktur, wodurch beliebig viele Datenbankobjekte (z. B. Tabellen) gemäß ihrer hierarchischen Stellung hinzugefügt werden. An der Spitze stehen die Stamminformationen eines einzelnen Objektes (z. B. geographische Lage, Beschreibung, Kurzbezeichnungen) mit einer für jedes Objekt einmaligen Identifikationsnummer (Datenfeld Kennziffer). Die Identifikationsnummer wurde so konzipiert, daß eine Zuordnung zum topographischen Blatt (Blattnummer der TK 25) jederzeit nachvollzogen werden kann. Je nach Aufnahme in die Datenbank erhält das Objekt zusätzlich eine laufende Nummer für den jeweiligen Blattschnitt. Somit setzt sich die Identifikationsnummer (z. B. 5526003) aus der vierstelligen Blattnummer und der dreistelligen laufenden Nummer zusammen. Hieraus ergibt sich für das gewählte Format der Kennziffer eine maximale Objektanzahl von 999 pro topographischem Blatt. Bei Bedarf kann durch einfache Programmieretechnik die laufende Nummer z. B. in eine Vierstellige umgewandelt werden. Da nun für ein einzelnes Datenobjekt (z. B. Quelle) mehrere Analysen existieren können, eine Identifikationsnummer jedoch stets eindeutig sein muß, wurde den einzelnen Analysen eine Analysennummer zugewiesen. Diese setzt sich aus der Kennziffer des Stammblasses und einer zweistelligen Ziffer zusammen (z. B. 552600304: Analyse Nr. 4 des Datenobjektes 5526003). Daraus ergibt sich zunächst eine maximale Analysenanzahl von 99 pro Datenobjekt. Wie aus der Abbildung 5-8 ersichtlich, erfolgt die Verknüpfung des Datenobjektes mit den zugehörigen Analysen über das Hauptschlüsselfeld *AnNr* und Nebenschlüsselfeld *Kennz* des Datenblattes Hydrochemie. Das Nebenschlüsselfeld *Kennz* ist mit dem Hauptschlüsselfeld *Kennziffer* des Stammblasses über eine 1:n Verbindung verknüpft, d. h. jedem Datensatz (Datenobjekt) des Stammblasses können mehrere Datensätze der Tabelle Hydrochemie zugehören. Die Analysetabellen *ph. Parameter*, *Hauptinhaltsstoffe* und *Schwermetalle* sind über ihr Nebenschlüsselfeld *AnNr1..3* mit dem Hauptschlüsselfeld *AnNr* der Tabelle Hydrochemie über eine 1:1 Verbindung verknüpft, was bedeutet, daß zu jedem Datensatz in Hydrochemie genau ein Datensatz in den Tabellen *ph. Parameter*, *Hauptelemente* und *Schwermetalle* existiert.

Die Datenbank wurde gemäß der Abbildung 5-8 durch Abfragen, Berichte und Module erweitert. Die Funktionen der Abfragen liegen insbesondere in der Kontrolle (Übersichtsdarstellung, Zustandsbericht und Fehleridentifikation) und in der Zusammenfassung einzelner Tabellen, inclusive spezieller Berechnungen.

Da in einem zeitlich relativ kurz angelegten Projekt wie diesem und unter der Voraussetzung, daß ein Großteil des Datenmaterials erst in einem fortgeschrittenen Stadium zur Verfügung steht, die systematische Entwicklung einer Datenbank auf Grundlage des zu Beginn vorliegenden Datenmaterials nicht durchführbar erscheint, gilt möglichen Veränderungen in der Datenbank durch programmiertechnische Eingriffe zu einem späteren Zeitpunkt große Beachtung. Zum Zeitpunkt der Datenbankentstehung ist es kaum möglich, alle Eventualitäten zu berücksichtigen. Die Module erlauben

Modifikationen an einzelnen Tabellen, basierend auf individuellen VISUAL-BASIC- Scripten. Am Beispiel des Moduls **Temperatur** wurden fehlende Temperaturwerte durch einen Jahresdurchschnittswert von 10°C ersetzt, bei gleichzeitiger Übernahme bereits vorhandener Temperaturwerte. Anschließend standen wesentlich mehr Analysen, z. B. für die Ermittlung des Carbonat-Sättigungsindex, zur Verfügung. Gleiches gilt für die Abschätzung fehlender Ionenwerte (hier Kationen) nach MATTHESS (1973) über das Modul **Kationen**.

Hilfreich ist der Einsatz von Modulen im Bereich der Zuordnung von Indexwerten bzw. Kennziffern. Für die hydrogeochemische Auswertung dieser Arbeit ist insbesondere der räumliche Bezug bzw. der geologische Hintergrund von Bedeutung. Bei der Mehrzahl der Rohdaten wird durch Angabe der geologischen Kurzzeichen der Bezug zur Geologie hergestellt. Fehlen diese Angaben, so muß über die Lage der Entnahmestelle im Bezug zu den geologischen Einheiten das entsprechende Kurzzeichen nachträglich ermittelt und in die Datenbank aufgenommen werden. Wie bereits erwähnt handelt es sich in jedem Falle um eine Buchstabenfolge, die je nach Bearbeiter mehr oder weniger detailliert auf die geologische Herkunft der Wasserprobe eingeht. Da weder eine Buchstabenfolge für spätere Analysenzwecke geeignet erscheint noch eine zu detaillierte Aufschlüsselung aus statistischen Zwecken sinnvoll ist, sind den einzelnen Datenobjekten in Gruppen zusammenfassende Indexwerte zuzuweisen. Reproduzierbare Lösungen werden durch individuell angepaßte VB-Scripten erreicht, die ohne großartigen Aufwand für beliebige Indizierungen modifiziert werden können.

Die nachfolgenden Diagramme der Abbildungen 5-9 bis 5-11 vermitteln eine Inhaltsübersicht der Datenbank (Stand: Dezember 2000). Während die Verteilung der Analysen auf die einzelnen Jahre eine besonders hohe Anzahl in den neunziger Jahren demonstriert, zeigt die Verteilung auf die Mo-

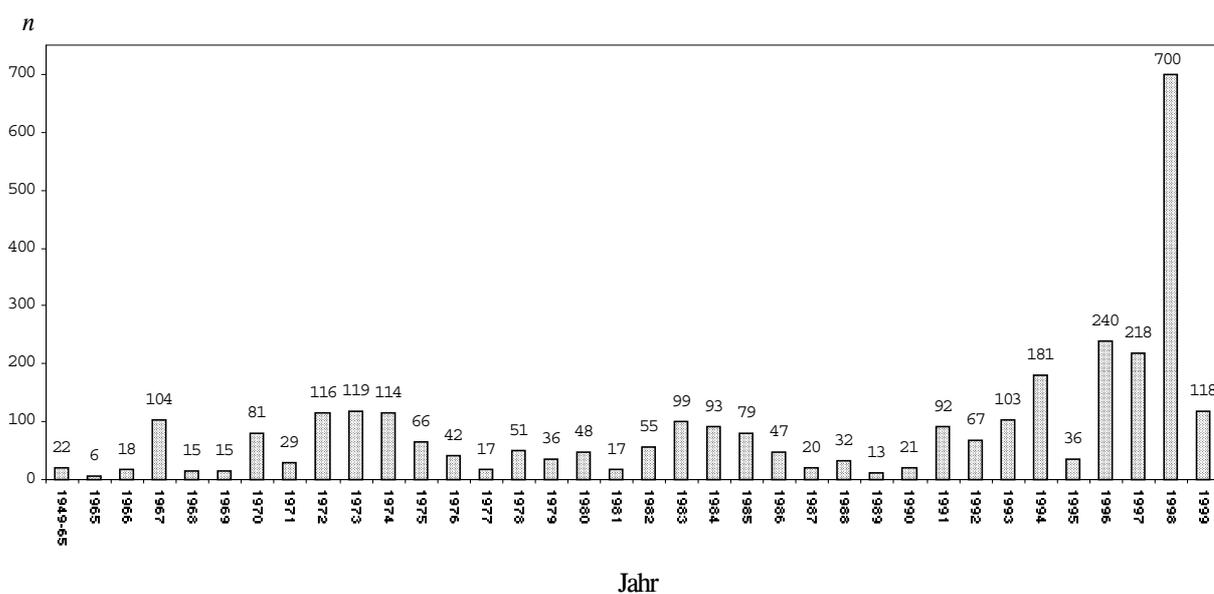


Abb. 5-9: Anzahl n der Analysen der Datenbank, bezogen auf das Jahr der Probennahme

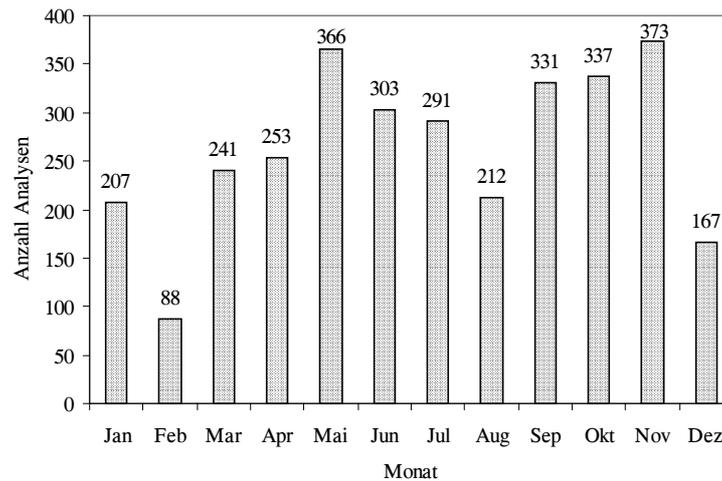


Abb. 5-10: Analysen der Datenbank bezogen auf den Monat der Probennahme

nate ein relativ ausgewogenes Bild. Die geologiebezogene Verteilung der Analysen deutet naturgemäß auf einen hohen Anteil der flächenmäßig weit verbreiteten Einheiten des Keupers, Muschelkalkes und des Buntsandsteins hin. Die Analysen aus dem Kristallin sind im Hinblick auf die Verbreitung kristalliner Gesteine im nordwestlichen Bereich des Untersuchungsraumes sowie auf die vergleichsweise große Zahl der dort anzutreffenden, natürlichen Grundwasseraufschlüsse (Quellen) unterrepräsentiert.

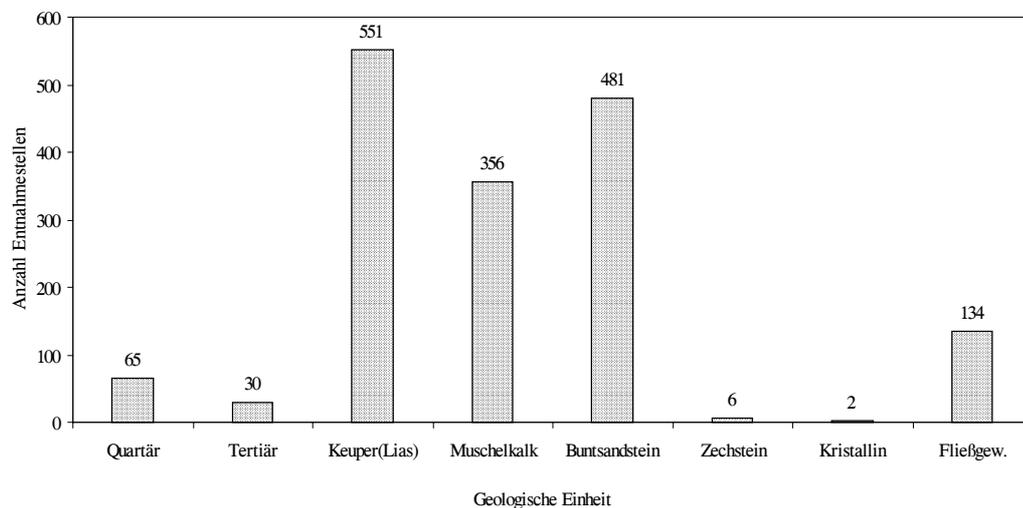


Abb. 5-11: Anzahl der Entnahmestellen, bezogen auf die geologischen Einheiten

Die Datenbank ist über SQL-Abfragen jederzeit mit dem GIS ARCVIEW verknüpfbar. Somit können Verbindungen zwischen dem GIS und einzelner Tabellen oder Abfragen hergestellt werden und stehen als Basisdaten für eine vielfältige Auswertung zur Verfügung.

5.4 Bewertungsmodell

Es sind eine Vielzahl von verschiedenen Bewertungsmodellen bekannt, die im Rahmen GIS-gestützter Standortanalysen angewendet werden können (z. B. in: BARTELME, 1995; BONHAM-CARTER, 1994; BURROUGH, 1986; EASTMANN, 1997). Einfach aufgebaute Entscheidungsverfahren (z. B. nach dem Booleschen Prinzip) oder kompliziertere, und dann meist auch unübersichtlichere Punktbewertungssysteme, oder gar sich ständig durch Expertenwissen verändernde Verfahren (so genannte Expertensysteme) bieten allesamt einen sehr breiten Spielraum für den eigentliche Entscheidungsprozeß. All diesen Verfahren ist gleich, daß sie meist dann zum Einsatz gelangen, wenn es darum geht unterschiedlichste und in ihrem Wesen nicht durch eindeutig definierbare naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten zusammenführbare Faktoren in einem einheitlichen Schema gemeinsam zu bewerten. Die Auswahl und Konzeption des Bewertungsmodells sowie die Integration der einzelnen Faktoren und ihre Gewichtung unterliegen immer einer gewissen subjektiven Einschätzung des jeweiligen Bearbeiters. Barthel (2000) bemerkt hierzu: *Letztlich bleibt bei allen Bewertungsanalysen wohl immer eine starke, durch subjektive Einschätzung des Bearbeiters bestimmte Komponente erhalten, die sich nicht durch "wissenschaftlich korrekt" formulierbare Zusammenhänge beschreiben läßt.*

5.4.1 Bewertungsmodelle zur Grundwassergefährdung

Bei der konkreten Frage nach der Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlackedepositionen spielt naturgemäß die Grundwassergefährdung eine entscheidende Rolle. Sieht man von der speziellen Fragestellung ab, so könnte zunächst eine vom abzulagernden Material unabhängige und allgemeine Betrachtung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Naturraums erfolgen. Somit zeigen die im Rahmen dieser Fragestellung entworfenen Bewertungskonzepte zahlreiche Möglichkeiten auf, wie man ein entsprechendes Modell zur Bewertung unterschiedlichster naturräumlicher Faktoren aufbauen kann.

Es erscheint wichtig, daß zumindest einige Autoren, die sich ausgiebig mit dem Thema der kartographischen Umsetzung von Empfindlichkeitspotentialen - meist zum Grundwasser - auseinandergesetzt haben, an dieser Stelle anzuführen.

Insbesondere in den letzten zwei Jahrzehnten gab es intensive Bestrebungen, das natürliche Schutzpotential eines bestimmten Naturraumes gegenüber anthropogenen Schadstoffeinträgen zu erfassen und mit Hilfe von GIS-Techniken in kartographischer Form für Planungszwecke verfügbar zu machen. DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1998) fordert generell eine räumlich differenzierte Klassifizierung von Grundwasservorkommen entsprechend ihrer Belastungsemp-

findlichkeit, wobei im einzelnen die hydraulischen und hydrogeochemischen Zusammenhänge im Untergrund darzustellen sind, um anschließend durch Verschneidung mit der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung regionale Belastungsempfindlichkeiten aufzeigen zu können.

Neben den Methoden zur Abschätzung der allgemeinen Verschmutzungsempfindlichkeit eines Naturraums und im Besonderen des Grundwassers, z. B. in ALLER et al. (1987), DIEPOLDER (1995) HÖLTING et al. (1995), HAERTLE & JOSOPAIT (1982), MERKEL (1993), VILLUMSEN et al. (1982), VRBA & ZAPOROZEC (1994), wiesen u. a. FOSTER (1987) und SCHLEYER (1993) auf die Bedeutung einer schadstofforientierten Abschätzung hin, die sie mit dem Auftreten einer Vielzahl unterschiedlicher potentieller Schadstoffquellen begründen.

Eine Zusammenstellung existierender Kartenwerke und eine Übersicht über die wichtigsten Bewertungsmodelle finden sich in VRBA & ZAPOROZEC (1994). Eine neuere Zusammenfassung und Gliederung unterschiedlichster Verfahren bietet die Arbeit von MAGIERA (2000). Der Autor unterteilt dort die einzelnen Bewertungsmodelle in 4 wesentliche Kategorien:

- Hydrogeologische Systembetrachtungen und Analogieschlüsse
- Matrix- oder Punktbewertungsverfahren
- Mathematische Modelle
- Statistische Ansätze

Zur detaillierten Beschreibung der Kategorien und tabellarischen Zusammenstellung bekannter Verfahren siehe ebenso MAGIERA (2000). Interessant dabei ist sicherlich die statistische Erfassung und Auswertung der benutzten Parameter aller Bewertungsverfahren, hier zusammengefaßt in Faktorengruppen (vgl. Abb. 5-12). Nach o. g. Autor wurde der Einzelparameter *Grundwasserneubildungsrate* in 29 von 81 Arbeiten am häufigsten benutzt. Die Gesamtzahl der Einzelparameter aller untersuchten Verfahren lag bei 356, wobei nicht ersichtlich ist, ob diese Parameter direkt in die Bewertungsverfahren eingingen oder auch nur zur Berechnung anderer Bewertungsparameter verwendet wurden.

Einige Beispiele aus der Literatur machen jedoch deutlich, daß sich nicht alle Modelle einfach auf spezielle Fragestellungen übertragen lassen. Kritische Anmerkungen zu einzelnen Verfahren geben beispielsweise KUS, UDLUFT & WIJNEN (2000) bei der Beurteilung der Verschmutzungsempfind-

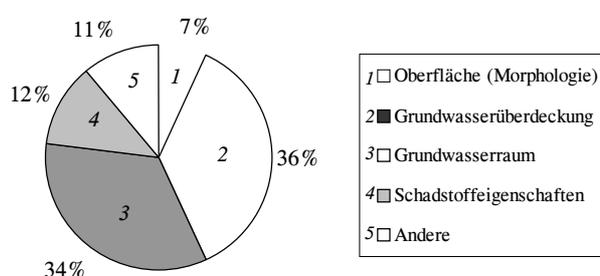


Abb. 5-12: Verwendete Faktorengruppen bei Verfahren zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers, zusammengefaßt nach MAGIERA (2000). Die prozentuale Verteilung ermittelt sich aus der Zahl von 356 verwendeten Einzelparametern und ihrer Zugehörigkeit zur entsprechenden Faktorengruppe.

lichkeit eines Grundwasservorkommens in Paraná (Brasilien). So zeigt beispielsweise das empirisch angelegte Bewertungsmodell GOD nach Foster (1987) zwar ein übersichtliches, sehr anwendungsfreundliches und aus hydrogeologischer Sicht durchaus anwendbares Modellschema, das jedoch durch die gewählte Berechnungsmethode größtenteils "unsinnige" Bewertungszahlen berechnet.

Häufig wird die Bewertungsmethode nach HÖLTING et al. (1995) zur Ermittlung der allgemeinen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung verwendet. Dort werden verschiedenen bodenphysikalische (z. B. nutzbare Feldkapazität) bzw. hydrogeologisch-geologische Parameter (Grundwasserneubildung, Durchlässigkeitsverhältnisse, Schichtmächtigkeiten) auf einheitliche Flächen bezogen und im Rahmen eines empirisch angelegten Punktsystems bewertet. Diese Methode orientiert sich ausschließlich an den naturräumlichen Gegebenheiten und nicht an spezifische Materialien von denen eine Gefahr für die Umwelt ausgehen könnte. Das Bewertungsmodell ist als Matrixmethode konzipiert und eignet sich daher sehr gut für die Umsetzung in einem GIS. Das Verfahren wurde bereits vielfach in der Praxis angewendet, jedoch meist unter Anpassung an spezielle geologisch-/hydrogeologische Fragestellungen. BRAUN (1999) hat das Bewertungsverfahren für den Einsatz zur Visualisierung der Gefährdung von Grundwasser durch Ablagerungen entsprechend modifiziert. Ähnliches gilt für die Autoren GOLDSCHNEIDER et al. (2000), die das Bewertungssystem, insbesondere zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit von Grundwasser in Karstgebieten, verändert und ausgebaut haben. In ursprünglicher Fassung wurde es z. B. von MARGANE et al. (1999) bei der Kartierung der Grundwasserverschmutzungsempfindlichkeit im nördlichen Jordanien eingesetzt.

Bei den meisten Methoden erfolgen die einzelnen Berechnungsschritte durch einfache Summen- und Produktbildung. Durch logische Operatoren (UND, ODER etc.) und Entscheidungsabfragen (z. B. WENN - DANN) können sich diese durchaus komplex gestalten, wie es sich am Beispiel einer Standortanalyse für geothermische Nutzung des Untergrundes von BARTHEL (2000) zeigt.

5.4.2 Bewertungsmodell Ablagerungsfreundlichkeit

Für einen gewählten Untersuchungsraum existiert nun prinzipiell die Menge der für Schlacke ablagerungsfreundlichen Bereiche (im weiteren als AF abgekürzt). Welcher Gebietsabschnitt zu dieser Menge gezählt werden kann oder nicht, hängt letztendlich von der relativen Bewertung der einzelnen Standortfaktoren ab. Vereinfacht kann die Mengenzugehörigkeit anhand der Booleschen Logik bestimmt werden. Dabei gibt es für jeden Gebietsabschnitt nur zwei mögliche, scharf voneinander abgrenzbare Zustände, nämlich zur Menge AF gehörend oder nicht. Die Übergänge in der Natur sind jedoch selten scharf, sondern meist fließend. So gehört jeder Gebietsabschnitt, z. B. aufgrund seiner hydrogeochemischen Eigenschaften, mehr oder weniger zur Menge AF. Jeder einzelne Be-

wertungsfaktor beeinflusst den Grad der Zugehörigkeit entweder in positiver oder negativer Richtung.

In der Praxis werden derartige Bewertungen, Abschätzungen oder Abstufungen meist unter Zuhilfenahme umgangssprachlicher Beschreibungen durchgeführt, wie es am Beispiel der Beurteilung der Verschmutzungsempfindlichkeit bedeutender Grundwasservorkommen in der BRD (AUST et al., 1979) deutlich wird.

In der Mathematik wird diese Mengenzugehörigkeit mit der Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik) beschrieben.

5.4.2.1 Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik)

Die Begriffe Fuzziness (Unschärfe) und Crispness (Schärfe) wurden im Jahre 1965 von ZADEH (1965) eingeführt. Im Gegensatz zur klassischen Mathematik, wo generell scharfe Mengen betrachtet werden, wird mit der Fuzzy-Logik ein mathematisches Verfahren beschrieben, daß die gleitenden Übergänge zwischen und innerhalb von Mengen erfaßt.

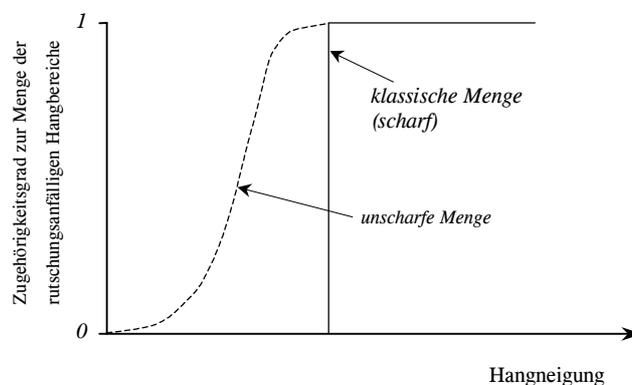


Abb. 5-13: Graphische Darstellung einer scharfen und unscharfen Menge

Vorzugsweise wird das reelle Einheitsintervall $I = [0..1] = \{0 \leq x \leq 1\}$ als Menge der verallgemeinerten Zugehörigkeitswerte für unscharfe Mengen gewählt (BANDEMER & GOTTWALD, 1993). Der Zugehörigkeitsgrad eines Elementes zu einer unscharfen Menge wird mathematisch durch eine spezifische Zugehörigkeitsfunktion definiert und kann beispielsweise als dreieckige, trapezoidale oder exponentielle Funktion dargestellt werden. Ebenso sind frei und abschnittsweise definierbare Funktionen möglich. Prinzipiell gilt, daß bei den extremen Zugehörigkeitsgraden 0 keine und bei 1 vollständige Zugehörigkeit zur unscharfen Menge vorliegt (vgl. Abb. 5-13).

Die Modellierung verschiedenartigster Systeme und Prozesse in Technik und Ökonomie unter Heranziehung unscharfer Mengen und die Versuche zur direkten Verarbeitung unscharfer, umgangssprachlich formulierter Informationen (z. B. hoch – mittel - niedrig, geeignet - bedingt geeignet - ungeeignet) sind momentan die hauptsächlichen Trends in den anwendungsorientierten Untersuchungen zu unscharfen Mengen (BANDEMER & GOTTWALD, 1993). In den Geowissenschaften wurden beispielsweise bei der Bodenschätzung (HEINRICH, 1997; BURROUGH, 1989), Deponiestandorterkundung (BONHAM-CARTER, 1994), Abschätzung der Hangstabilität (ORLIC, 1994; KUS & BARTHEL, 2000) und bei der Regionalisierung von Durchlässigkeitsbeiwerten (PIOTROWSKI et al., 1997) Fuzzy-Bewertungsansätze bzw. Fuzzy-Expertensysteme erfolgreich eingesetzt. Bei allen wurde gezeigt, daß die Bewertung und Analyse natürlicher, zum Teil anthropogen beeinflusster Systeme unter Einbindung unscharfer Mengen wesentlich flexibler und der Realität näher kommend gestaltet werden können.

5.4.2.2 Modellansatz Ablagerungsfreundlichkeit

Im Bewertungsmodell werden alle einzelnen Faktoren zunächst getrennt voneinander bewertet und im Rahmen einer Synthese einer Gesamtbewertung zugeführt. Über individuell angepaßte Zugehörigkeitsfunktionen werden die Wertematrizen der einzelnen Faktoren dabei in das reelle Einheitsin-

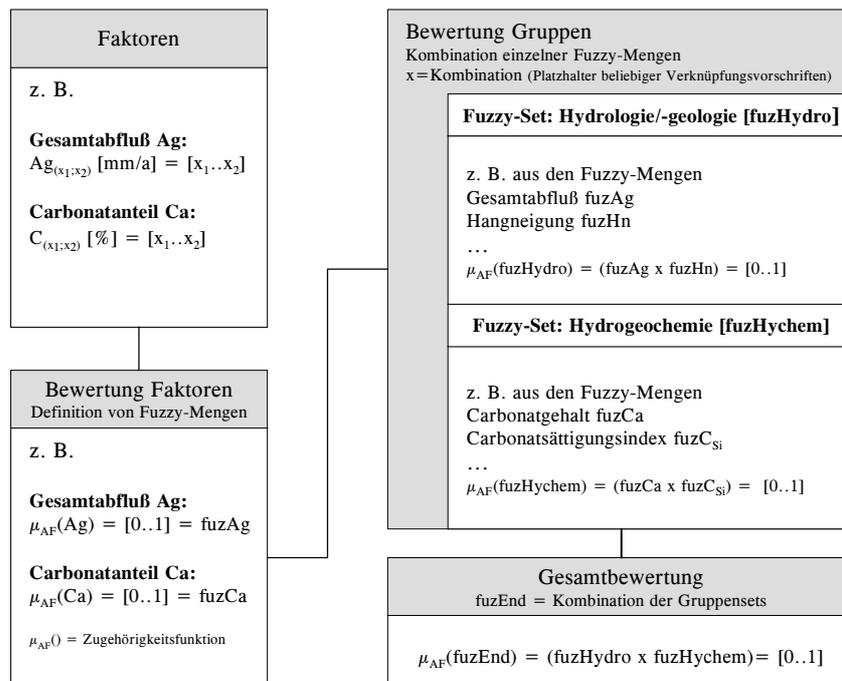


Abb. 5-14: Schema des Bewertungsmodells Ablagerungsfreundlichkeit

tervall $I = [0..1]$ und damit in sogenannte dimensionslose Fuzzy-Sets oder auch Fuzzy-Mengen überführt. Die Definition geeigneter Funktionen stellt einen wichtigen Teilschritt in der Bewertung dar und sollte durch entsprechendes Expertenwissen und falls möglich durch statistische Begleitanalysen gestützt werden. Die Anwendung individueller Zugehörigkeitsfunktionen stellt die erste Bewertungsstufe dar und erlaubt bereits unterschiedliche Formen der Bewertung jedes einzelnen Faktors im Modellansatz. Die anschließende Kombination der unterschiedlichen Fuzzy-Mengen erfolgt in zwei Schritten nach dem Schema der Abbildung 5-14 und führt letztendlich zur Gesamtbewertung. Das vorgestellte Modellschema beinhaltet somit drei wesentliche Bewertungsstufen.

6 Standortanalyse

In Anlehnung an Kapitel 5 werden für die Standortanalyse die hydrologisch-/hydrogeologischen und hydrogeochemischen Bewertungsfaktoren getrennt voneinander betrachtet. Wie schon erwähnt, erfolgte die Auswahl der Faktoren nicht alleine nach ihrer Bedeutung für eine naturraumorientierte Bewertung, sondern auch nach den ihnen zu Grunde liegenden Daten und deren Verfügbarkeit.

6.1 Hydrologisch-/hydrogeologische Faktoren

Zur Einführung gibt die Tabelle 6-1 einen Überblick der Faktoren, die zugrunde liegende Ermittlungsverfahren sowie potentielle Einflußfaktoren und qualitative Bewertungsaussagen zur Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlacke aus hydrologisch-/hydrogeologischer Sicht.

Tab. 6-1: Schematischer Ansatz zur qualitativen Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit eines Naturraumes gegenüber Schlackedepositionen anhand hydrologisch-/hydrogeologischer Bewertungsfaktoren

Faktoren	Ermittlung / Berechnung	beeinflusst von	Bewertungsgrundlage	relative Beziehung zwischen Ablagerungsfreundlichkeit (AF) und Milieufaktoren
Gesamtabfluß	$A_g = N - V_g$ N: Niederschlag V _g : Gesamtverdunstung	Höhe über N.N. Hangneigung Hangexposition Landnutzung Bodenart (nFK)		
Hangneigung	Ableitung aus DGM	Morphologie		
Akkumulation (Tiefenbereiche)	Ableitung aus DGM	Gewässernetz Morphologie		
Flußdichte	Flußlängen pro definierter Einheitsfläche	kf-Wert Gebirge u. Boden Niederschlag Morphologie Stratigraphie Vegetation		
Quellenposition	Lage theoretischer Grundwasserbereiche im Bezug zur GOK	Stratigraphie bzw. Pedo-Lithologie Tektonik		

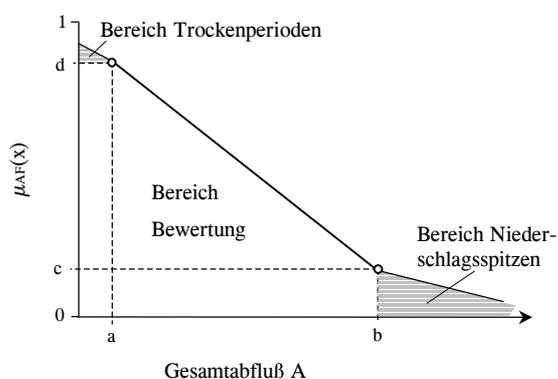
6.1.1 Gesamtabfluß

Der Gesamtabfluß [Ag] ermittelt sich aus dem Niederschlag [N] und der Gesamtverdunstung [Vg]. Niederschlag und Gesamtverdunstung liegen als mittlere, jährliche, dem Agrarklimatologischen Atlas (1997) zugrunde liegende Werte in Form von Raster- bzw. Griddaten vor (vgl. Abschnitt 5.3.4). Durch Anwendung einfacher Kartenalgebra im Rahmen des *MapCalculators* von ARCVIEW erfolgt die Verschneidung der beiden Grids nach der folgenden Gleichung:

$$[Ag] = [N] - [Vg]$$

[Ag] bildet das Ausgangsgrid für die Bewertung des Zugehörigkeitsgrades einer einzelnen Modellzelle (Rasterzelle) zur Menge AF (vgl. Abb. 6-2).

Aus den Niederschlags- und Verdunstungsmodellen leiten sich bei einer langjährigen Datenaufzeichnung charakteristische Minimal- und Maximalwerte für den Gesamtabfluß einer Region ab und bilden somit die Randextrema bei der Bewertung der Ablagerungsfreundlichkeit dieser gegenüber Schlacke. Bei einer generalisierten Betrachtung wird davon ausgegangen, daß bei steigendem Gesamtabfluß der Wasserumsatz im Untergrund linear zu- und damit die Zugehörigkeit des betreffenden Gebietsabschnittes zur Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche abnimmt. Die Ermittlung der entsprechenden Zugehörigkeitsfunktion erfolgt durch die Anwendung einer linearen Regression mit den bekannten Randextrema, wobei weder der Minimalwert den Zugehörigkeitsgrad 1 noch der Maximalwert des Gesamtabflusses den Grad 0 erreicht. Dies wird damit begründet, daß bei Verwendung langjährig gemittelter Klimadaten sowohl Niederschlagsspitzen als auch Trockenzeiten unberücksichtigt bleiben. Die Randparameter a bis d der Zugehörigkeitsfunktion in Abbildung 6-1 werden unter Berücksichtigung der regionalen Gegebenheiten des Untersuchungsraumes festgelegt.



$$\mu_{AF}(x) = -\frac{d-c}{b-a} \cdot x + c$$

- AF: Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche
 a: minimaler mittlerer jährlicher Abfluß
 b: maximaler mittlerer jährlicher Abfluß
 c: Zugehörigkeitsgrad maximaler mittlerer jährlicher Abfluß
 d: Zugehörigkeitsgrad minimaler mittlerer jährlicher Abfluß

Abb. 6-1: Zugehörigkeitsfunktion Gesamtabfluß mit Darstellung des Funktionsgraphen

$$a = 50 \text{ mm/a}$$

$$b = 774 \text{ mm/a}$$

$$c = 0,2$$

$$d = 0,9$$

Die Parameter a und b leiten sich aus dem Minimal- und Maximalwert des Gesamtabflusses (Grid [Ag]) ab, c und d sind die individuell zu vergebenden, mini- bzw. maximal möglichen Zugehörigkeitsgrade. Durch die Integration des niedrigst- und höchstmöglichen Gesamtabflußwertes für Unterfranken in die Zugehörigkeitsfunktion, wird der gesamte Wertebereich des Untersuchungsraumes erfaßt. Die anschließend für die Berechnung der Fuzzy-Menge bzw. des Fuzzy-Sets [fuzAg] zur Anwendung kommende Regressionsgleichung läßt sich nach Einsatz der obigen Werte wie folgt definieren:

$$\mu(x) = -0,001x + 0,9483$$

Der Funktionswert hängt sehr stark von den Randbedingungen ab, insbesondere von a und b. So verschiebt sich der Zugehörigkeitsgrad für einen mittleren jährlichen Gesamtabflußwert nach Anwendung der Regressionsgleichung deutlich durch verändern der Wertebereiche (Niedrig- und Höchstwert des Gesamtabflusses). Dies hat zur Folge, daß einzelne Modellzellen, die beispielsweise aus getrennt voneinander betrachteten Untersuchungsräumen mit unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen stammen, aber den gleichen Abflußwert aufweisen, voneinander abweichende Zugehörigkeitsgrade erhalten können. Auf diese Weise ermittelte Zugehörigkeitsgrade können nur auf das zugehörige Untersuchungsgebiet bezogen werden.

Ergebnis

Die Karten in Abbildung 6-2 zeigen sowohl beim Gesamtabfluß als auch beim zugehörigen Fuzzy-Set eine deutliche Zonierung, die sich erwartungsgemäß an der Verdunstungs- und Niederschlagsverteilung orientiert. Dabei haben die bereichsweise dispers verteilten Abflußwerte ihre Ursache vor allem in der von den Landnutzungsklassen abhängigen Verdunstungsverteilung. Dieser Effekt paust sich bei dem berechneten Fuzzy-Set durch. Betrachtet man die statistische Verteilung der Fuzzy-Werte bezogen auf die Grundwasserlandschaften Unterfrankens (vgl. Abb. 6-3), so vermitteln insbesondere weite Teile der Mainfränkischen Platten und der Untermainebene Ablagerungsfreundlichkeit. Als bedingt ablagerungsfreundlich sind das Fränkische Gips- und Sandsteinkeuperland zu sehen, welche jeweils eine mittlere Zugehörigkeit zur Menge AF erreichen. Naturgemäß sind die niederschlagsreichen Höhenzüge des Spessarts und der Rhön aufgrund ihrer klimatischen Extremposition nur gering ablagerungsfreundlich.

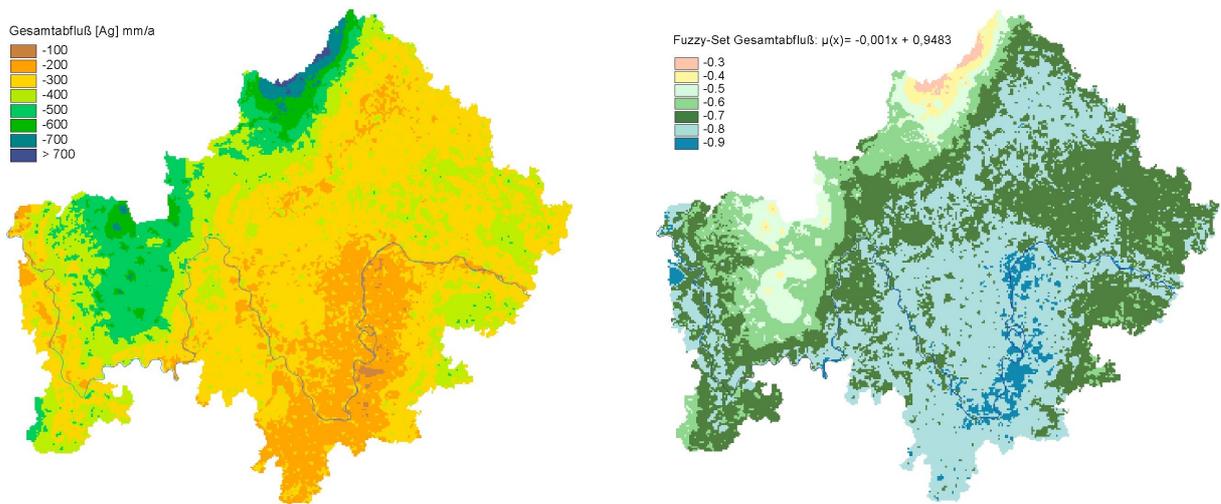


Abb. 6-2: Durchschnittlich jährlicher Gesamtabfluß und zugehöriges Fuzzy-Set berechnet nach der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$

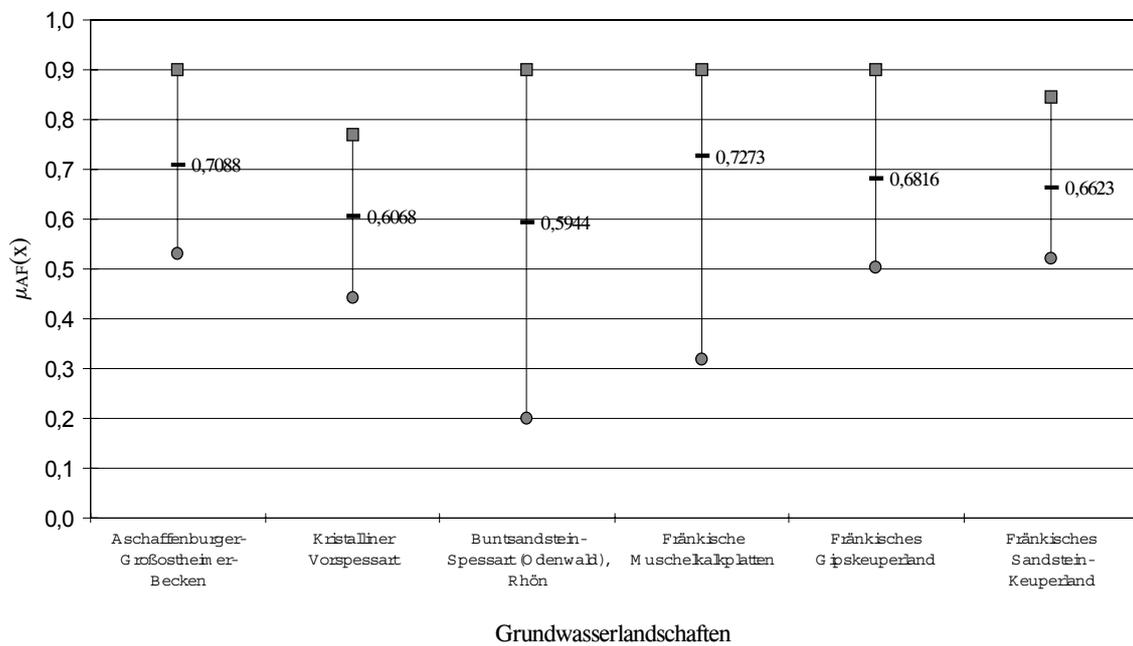


Abb. 6-3: Spannbreiten mit Angabe der Mittelwerte der Zugehörigkeitsgrade einer Grundwasserlandschaft zur Menge AF, in Abhängigkeit des durchschnittlichen jährlichen Gesamtabflusses von Unterfranken.

6.1.2 Hangneigung

Die Hangneigung [Hn] läßt sich aus dem DGM ermitteln. In ARCVIEW wird zur Berechnung der Hangneigung in [°] der Algorithmus nach BURROUGH (1986) eingesetzt (vgl. Abb. 6-4).

Es kann generell davon ausgegangen werden, daß ein Geländeabschnitt mit einem steilen Gefälle

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$(dz/dx) = ((a + 2d + g) - (c + 2f + i)) / (8 * \text{Zellenweite})$$

$$(dz/dy) = ((a + 2b + c) - (g + 2h + i)) / (8 * \text{Zellenweite})$$

$$\text{Hangneigung}[\text{°}] = \sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}$$

Abb. 6-4: Verfahren zur Berechnung der Hangneigung aus dem DGM nach BURROUGH (1986). Das Verfahren entspricht der sogenannten *3x3 Zellen Nachbarschaftsanalyse* unter Verwendung des durchschnittlichen Maximalwertes. Im obigen Beispiel erfolgt die Berechnung der Zelle e.

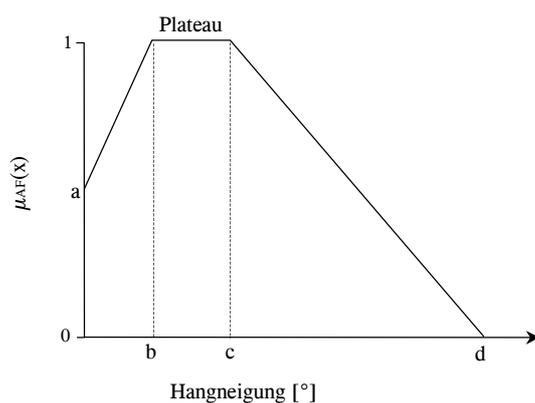
nicht mehr für ein naturnahes Ablagerungssystem geeignet ist, da u. a. aus Stabilitätsgründen aufwendige technische Maßnahmen zur Sicherung der Ablagerung notwendig wären. Das andere Extrem stellen im Sinne der Abflußbildung flach ausgeprägte Bereiche dar, deren Neigungen gegen 0 Grad tendieren. Infolge eines Neigungsanstiegs sind zunächst günstigere Abflußbedingungen für das Ablagerungssystem anzunehmen, ab einem bestimmten Neigungswert wird die Ablagerungsfreundlichkeit durch die starke Zunahme der relativen Erosion nach Tabelle 6-2 jedoch vermindert.

Tab. 6-2: Zunahme der relativen Erosion mit steigender Hangneigung (modifiziert nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1992).

Hangneigung [% / °]	5 / 2,25	10 / 4,5	15 / 6,75	20 / 9
Relative Erosion	100	293	500	806

Es wird Hangneigungsbereiche geben, wo ein (quasi-)Bewertungsgleichgewicht zwischen günstiger Abflußbildung und zunehmender Denudation herrscht. Dieser Bereich kann beispielsweise durch eine Plateaubildung bestimmt werden, wo die Zugehörigkeit zur Menge AF den Grad 1 erreicht. Der allgemeine Zugehörigkeitsgrad der einzelnen Geländeabschnitte kann nun in Abhängigkeit ihrer Hangneigungen wie in Abbildung 6-5 dargestellt definiert werden.

Mit a wird der minimale Zugehörigkeitsgrad eines flachen Gebietsabschnittes festgelegt. Da das Gefälle nur als hinreichende Bedingung bei der Bildung von Landoberflächen- und Zwischenabfluß gilt (DYCK & PESCHKE, 1995), wird über den Wert a verhindert, daß flache Bereiche nicht automatisch auch gleich als ungünstige Bereiche ausgeschieden werden. Das heißt für die Zugehörigkeit eines Gebietsabschnittes zur Menge AF, daß geringe Hangneigungen zu einer Abschwächung und nur bei Neigungen größer als der Wert d theoretisch zu einem Ausschluß führen können.



$$\mu_{AF}(x) = \begin{cases} \frac{1-a}{b} \cdot x + a & \text{für } x < b \\ 1 & \text{für } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{für } c < x \leq d \\ 0 & \text{für } x > d \end{cases}$$

- AF: Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche
 a: minimaler Zugehörigkeitsgrad flacher Gebietsabschnitte
 b: minimale Hangneigung Plateaubereich
 c: maximale Hangneigung Plateaubereich
 d: maximale Hangneigung

Abb. 6-5: Zugehörigkeitsfunktion Hangneigung mit Darstellung des Funktionsgraphen

Die Definition der Randbedingungen nach der unter Abschnitt 6.2.2 angegebenen Zugehörigkeitsfunktion zur Ermittlung der Ablagerungsfreundlichkeit einer Modellzelle, unterliegt zunächst der Vereinbarung, daß sowohl flache (ebene) wie auch steile Gefälleverhältnisse ungünstigere Voraussetzungen für eine Schlackeablagerung bedeuten. In Anlehnung an die Tabelle 6-2 werden nun die folgenden Randbedingungen der Zugehörigkeitsfunktion festgelegt:

$$a = 0,5$$

$$b = 3^\circ$$

$$c = 5^\circ$$

$$d = 15^\circ$$

Der Parameter a weist mit einem Wert von 0,5 einen mittleren Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF für ebene Bereiche zu, somit bedingt geeignete Verhältnisse. Anhand der Parameter b und c wird im vorliegenden Fall bezüglich der Hangneigung der geeignetste Bereich zwischen 3° und 5° vorgeschlagen. Dort werden einerseits günstige Abflußbedingungen und andererseits eine eingeschränkte Denudation vorausgesetzt. Nach verschiedenen Autoren (z.B. HAMMER, 1985; KANY & HAMMER, 1985) nimmt aus statistischer Sicht das Risiko flächenhaften Abtrags bis hin zu Rutschungen an

Hängen, welche steiler als 5° sind, zu. HAMMER (1985) wies für das fränkische Schichtstufenland schon bei Hangneigungen zwischen 4° und 8° historische Rutschungen nach, allerdings erfolgten diese auch unter bestimmten geologischen Voraussetzungen. Damit kann angenommen werden, daß bei Hangneigungen größer 5° die Bedingungen für eine Schlackeablagerung naturgemäß ungünstiger erscheinen und bei Erreichen eines Schwellenwertes praktisch zum Ausschluß der betreffenden Modellzelle führen. Der Schwellenwert d wurde mit 15° angesetzt. Die Umsetzung der abschnittsweise definierten Zugehörigkeitsfunktion zur Berechnung des Fuzzy-Sets im GIS veranschaulicht das Schema in Abbildung 6-6.

Die Bedingungen gravitativer Materialverfrachtung bzw. Massenverlagerung sind weitaus komplizierter als hier dargestellt. Für Hangbewegungen z. B. sind die lokalen Scherfestigkeiten im Gesteinsverband ausschlaggebend. Maßgeblich ist der Scherwiderstand entlang von Flächen, an denen eine Verschiebung stattfinden kann. Er setzt sich zusammen aus dem Reibungswinkel, der bei nicht bindigen Böden und Lockergesteinen der Scherfestigkeit gleichgesetzt werden kann und der Kohäsion, die die Haftkräfte zwischen den Körnern angibt. Während im Lockergestein und Boden Korngrößenverteilung, Kornform, Kornrauhigkeit und Lagerungsdichte die Scherfestigkeiten bestimmen, sind im Festgesteinsverband besonders die räumliche Anordnung und Ausbildung von Trennfugen von Bedeutung. Diese und weitere Einflußfaktoren auf Materialabtrag und Hangbewegungen können nur im lokalen Maßstab untersucht werden und deshalb hier nicht dargestellt.

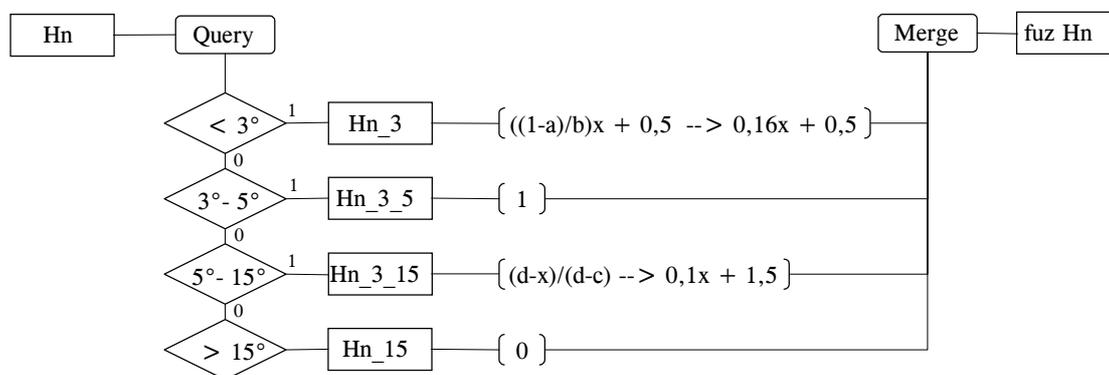


Abb. 6-6: Modellschema zur Berechnung des Fuzzy-Sets [fuzHn] aus der Hangneigung [Hn], mit der in Abbildung 6-5 abschnittsweise definierten Zugehörigkeitsfunktion und der oben definierten Randbedingungen a, b, c und d.

Ergebnis

Die Mittelgebirgsregionen der Rhön, des Spessarts und Odenwalds sowie des Steigerwalds und der Haßberge sind auf Grund ihrer morphologischen Ausprägung in weiten Teilen gering ablagerungsfreundlich. Zu dieser Gruppe stoßen naturgemäß alle steileren Talflanken entlang des Mains und

seiner größeren Nebenflüsse Saale und Wern. Als bedingt ablagerungsfreundlich fallen insbesondere die flachen Gebiete am Untermain sowie die Verebnungen östlich des Maindreiecks ins Auge. Hier wird der Annahme Rechnung getragen, daß bei flachen Landschaftsformen ein hoher Anteil der Niederschläge versickert und damit der Wasserumsatz in einer oberflächennahen Ablagerung zwangsläufig erhöht wird. Abgesehen von den Hanglagen und den bereits genannten Ausnahmen (Talflanken etc.) zeigt die Landschaft der Mainfränkischen Platten insgesamt die größte Ablagerungsfreundlichkeit.

Am Diagramm der Abbildung 6-7 werden die morphologischen Positionen der einzelnen Geologischen Einheiten, bezogen auf ihre Zugehörigkeit zur Menge AF deutlich (zur morphologischen Po-

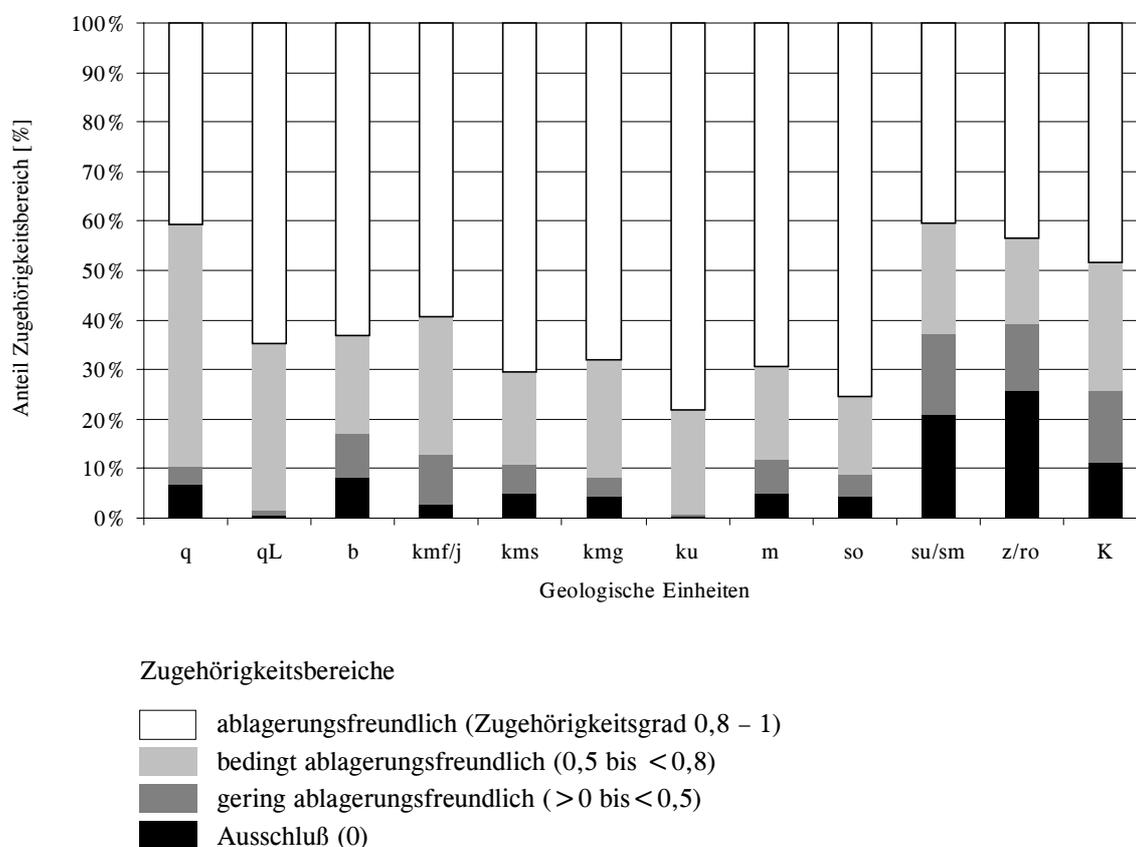


Abb. 6-7: Verteilung der Zugehörigkeitsgrade zur Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche bezogen auf die geologischen Einheiten nach Abb. 3-2.

sition der geologischen Einheiten vgl. auch Anlage Karte 2). So fällt auf, daß ca. 50% der Gesamtfläche der ebenen, vorwiegend aus quartären Schottern und Sanden aufgebauten Talniederungen des Mains eine bedingte Ablagerungsfreundlichkeit gegenüber Schlackedepositionen erreichen. Ebenso herauszustreichen ist der bei den Einheiten Oberer Buntsandstein, Muschelkalk, Unterer,-Gips- und Sandsteinkeuper bedeutende Flächenanteil der ablagerungsfreundlichen Bereiche. Die

Löß- bzw. Sandlößareale sowie die Austrichgebiete des Unteren Keupers zeigen zudem weniger als 2% Ausschlußflächen. Die morphologische Ausprägung der Einheiten Unterer- und Mittlerer Buntsandstein sowie Zechstein (untergeordnet Rotliegendes) und Kristallin ist im Hinblick auf Ablagerungsfreundlichkeit in mehr als 50% aller Fälle bedingt günstig bis ungünstig.

6.1.3 Gewässernetzdichte

Als Basisdaten zur Ermittlung der Gewässernetz- bzw. Flußdichte dienen die Fließgewässervektoren der Vorstufe des Atkis 25 von Unterfranken. Nicht mit einbezogen wurden der Main und dessen größere Nebenflüsse.

Grundsätzlich wird die Flußdichte als Gesamtlänge aller Flußläufe bezogen auf ein oberirdisches Einzugsgebiet oder einen Blattschnitt der topographischen Karte berechnet. BORGHEIMER & KREUTZ (1988) ermittelten Taldichten in der Pfalz, in Hessen und Mainfranken, bezogen auf ein mindestens 4 km² großes und einheitliches Gesteinsareal. Die Ausbildung des Gewässernetzes von Unterfranken (vgl. Abb. 6-8) zeigt eine Abhängigkeit von der Geologie an. Dies schließt die Wirkung klimatologischer und morphologischer Faktoren jedoch nicht aus, ebenso die Bedeutung der Vegetation. Nach der Abbildung 6-8 läßt sich bezüglich der Gewässernetzdichte ohne weitere Analyse eine Trennung in Kristallinen Vorspessarten mit einer hohen, in Buntsandsteingebieten mit einer geringen bis mittleren, in Muschelkalkarealen mit einer geringen und in Keuperlandschaften mit einer mittleren bis hohen Dichte vollziehen.

Eine direkte Verschneidung der Geologie mit dem Gewässernetz ist jedoch mit Fehlern behaftet, da eine bestimmte geologische Einheit regional durchaus sehr unterschiedliche Flußdichten aufweisen kann. Dies hängt nicht, wie vielleicht zu vermuten wäre, ausschließlich mit den oben genannten Einflußfaktoren Klima, Morphologie und Bewuchs zusammen, sondern ebenso mit der Position und Größe der Austrichfläche innerhalb des Entwässerungsregimes. Kleinflächige Austrichbereiche werden - abgesehen von verkarsteten Untergründen oder bei besonderer tektonischer Konstellation - die Dichte eines Gewässernetzes nicht wesentlich verändern. Zudem wird selbst ein karstfähiger Untergrund, der z. B. im Bereich des Vorfluters austreicht, keine abrupte Reduzierung der Gewässernetzdichte nach sich ziehen, wenn sich im Quellgebiet eine effektive Oberflächenentwässerung aufgrund toniger Böden und Gesteine durchgesetzt hat. Die Bedingung ist dann aber, daß die Durchlässigkeit des karstfähigen Untergrundes zumindest ein Gleichgewicht zwischen Zufluß und Sickerwasserverlust zuläßt. Liegt das Gerinne auf Vorfluterniveau oder ist gar selbst die Vorflut, dann spielt der Grundwasserzustrom für die Wasserführung eine entscheidende Rolle. So legt der

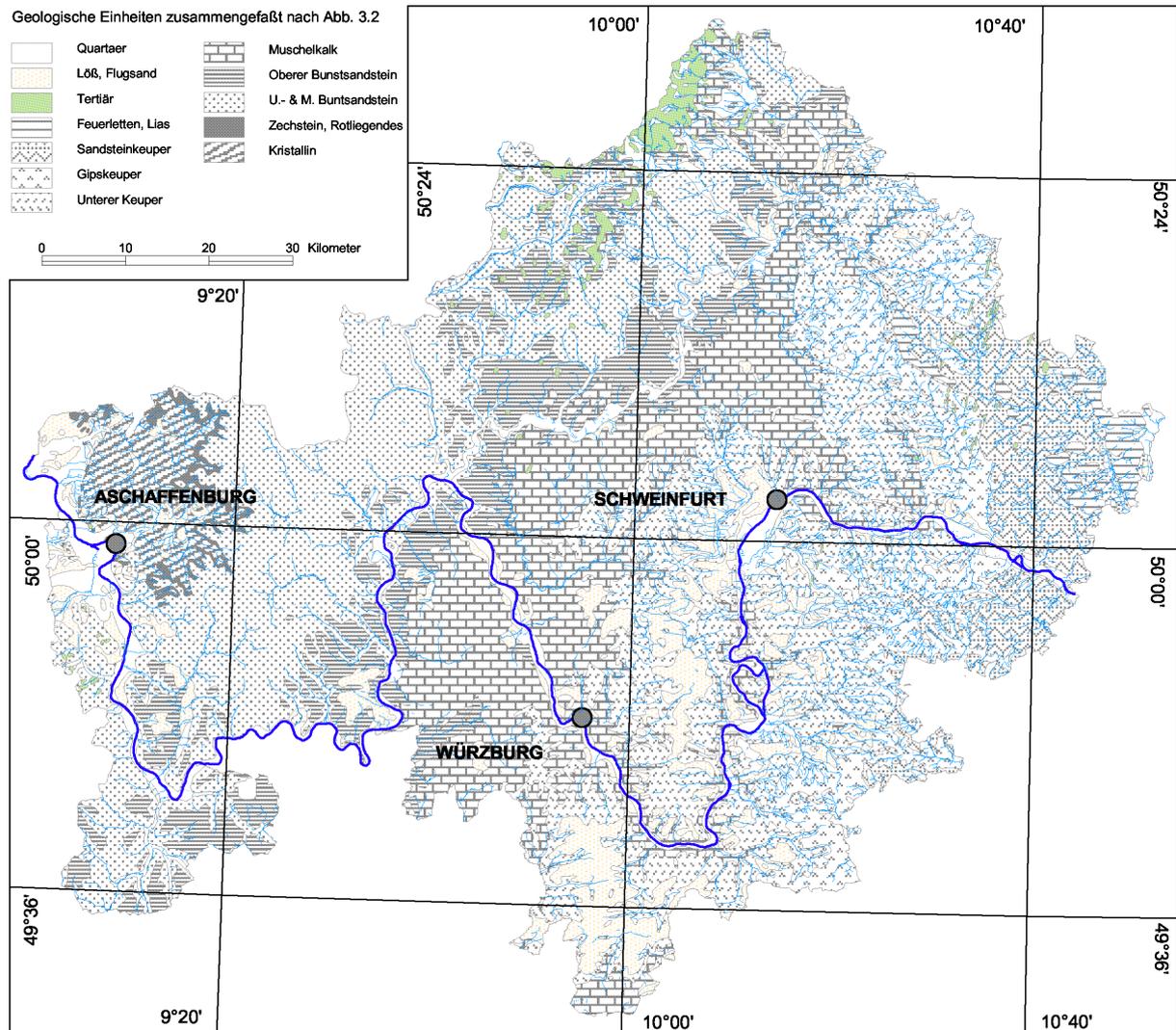


Abb. 6-8: Zusammengefaßte geologische Einheiten nach Abb. 3-2 und Gewässernetz der TK25. Nicht berücksichtigt sind Flüsse breiter 6 m und alle Stillgewässer. Der Main wurde nur als Orientierungshilfe in die Darstellung aufgenommen.

Main zwar eine große Strecke im Muschelkalk zurück, nicht aber der geringen Durchlässigkeit des Muschelkalkes wegen, sondern aufgrund dessen Position im Bereich der Vorflut.

Am Beispiel des Einzugsgebiets der Lauer - im Grenzbereich der Landschaftseinheiten Grabfeld und Hesselbacher Wald - ist der direkte Einfluß der Geologie auf die Gewässernetzdichte deutlich sichtbar (vgl. Abb. 6-9). Während im östlichen Teileinzugsgebiet eine hohe Gewässernetzdichte im Wirkungsfeld der Keuperausstriche beobachtet werden kann, findet im Bereich des Muschelkalkes keine nennenswerte Oberflächenentwässerung statt. Läßt man die Karstwasserzuflüsse außer Betracht, so erfolgt die Speisung der Lauer ausschließlich über die Zuflüsse aus dem Keuper. SCHMITT (1982) stellte bei seinen Untersuchungen zudem fest, daß bis zum Pegel Poppenlauer (vgl. Abb. 6-9) Sickerwasserverluste von mehr als 300 l/s zu verzeichnen sind. Dies spricht für eine (Karst-) Grundwasser Oberfläche unterhalb des Lauerspiegels. Demnach erfüllt die Lauer - zumindest bereichsweise

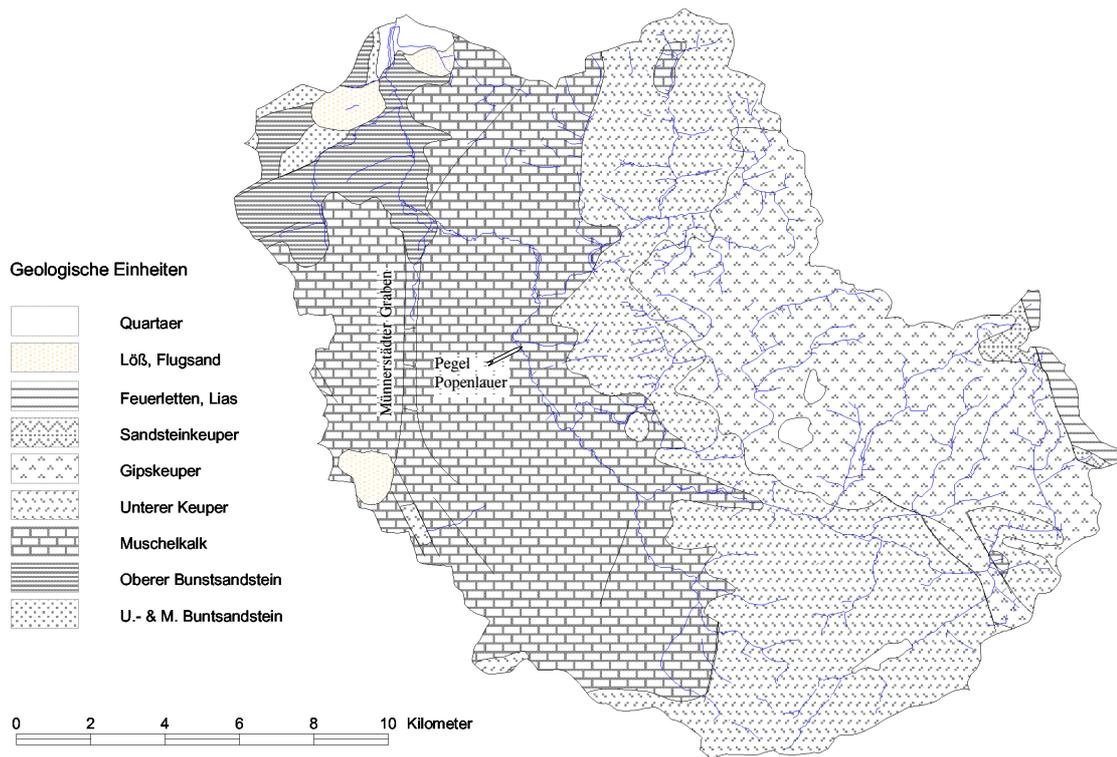


Abb. 6-9: Einzugsgebiet der Lauer mit der Geologie der GUK 500 v. Bayern und dem Gewässernetz des AT-KIS 25-Vorstufe. Weitere Erläuterungen siehe Text.

– nicht die Bedingungen einer Grundwasservorflut. Die Untergrunddurchlässigkeiten entlang der Lauer sind offensichtlich gering genug, so daß der Sickerwasserverlust insgesamt unter der Zuflußmenge aus den Einzugsgebieten bleibt. Erfolgt nun in diesem Beispiel die Berechnung der Flußdichte bezogen auf die geologischen Ausstrichflächen, ergibt sich für den Muschelkalk ein Wert, der nicht nur auf seine petrographische und strukturelle Ausbildung zurückgeht, sondern ebenso auf seine hydrogeologische Position. Abnehmende Zuflüsse aus dem östlichen Einzugsgebiet wird zu einem Rückgang des Oberflächenabflusses im Muschelkalkniveau der Lauer führen. Der Münnerstädter Graben im westlichen Teileinzugsgebiet begründet diese Annahme, ihm fehlen im Vergleich zur Lauer die Zuflüsse aus der Oberflächenentwässerung, so daß sich, der Untergrunddurchlässigkeit wegen und verstärkt durch die tektonische Situation, keine dauerhafte Oberflächenentwässerung entwickeln konnte. Erst im unteren Drittel des Grabens kommt es infolge der horstartigen Hebung der Röttonen des Oberen Buntsandsteins zu einem Aufstau des nach Norden abfließenden Kluft- bzw. Karstwasser und führt nach Austritt an ergiebigen Quellen (z. B. Riedbrunnen nach GEORGOTAS & UDLUFT, 1978) zu einer wirksamen Oberflächenentwässerung.

Infolge der obigen Erläuterungen erscheint es notwendig, die Flußdichten zunächst unabhängig von der Geologie, z. B. anhand eines gleichmäßigen Flächenrasters, zu analysieren. Bei einer nachfolgenden Verschneidung mit den geologischen Flächen erfolgt eine statistische Analyse.

6.1.3.1 Flußdichte bezogen auf ein gleichmäßiges Flächenraster

Als Rasterzelle wurde eine einheitliche Fläche von 2 x 2 km gewählt. Die Zellen dürfen nicht zu groß gewählt werden, da sonst Details nicht berücksichtigt werden können. Im Gegensatz dazu führt die Wahl zu kleiner Zellen zur Bildung vieler Einzelflächen mit keinem Gewässernetz und damit zu einem Flußdichtewert 0 m/km². Das Gesamtbild bestimmter Einheiten - vor allem in Gebieten allgemein höherer Flußdichten - kann bei der statistischen Auswertung dadurch stark verfälscht werden. Die Generierung des Flächenrasters und die anschließende Verschneidung mit dem Gewässernetz wurde auf Vektorbasis durchgeführt. Die Ausführung (vgl. Abb. 6-10, links) erfolgte über die

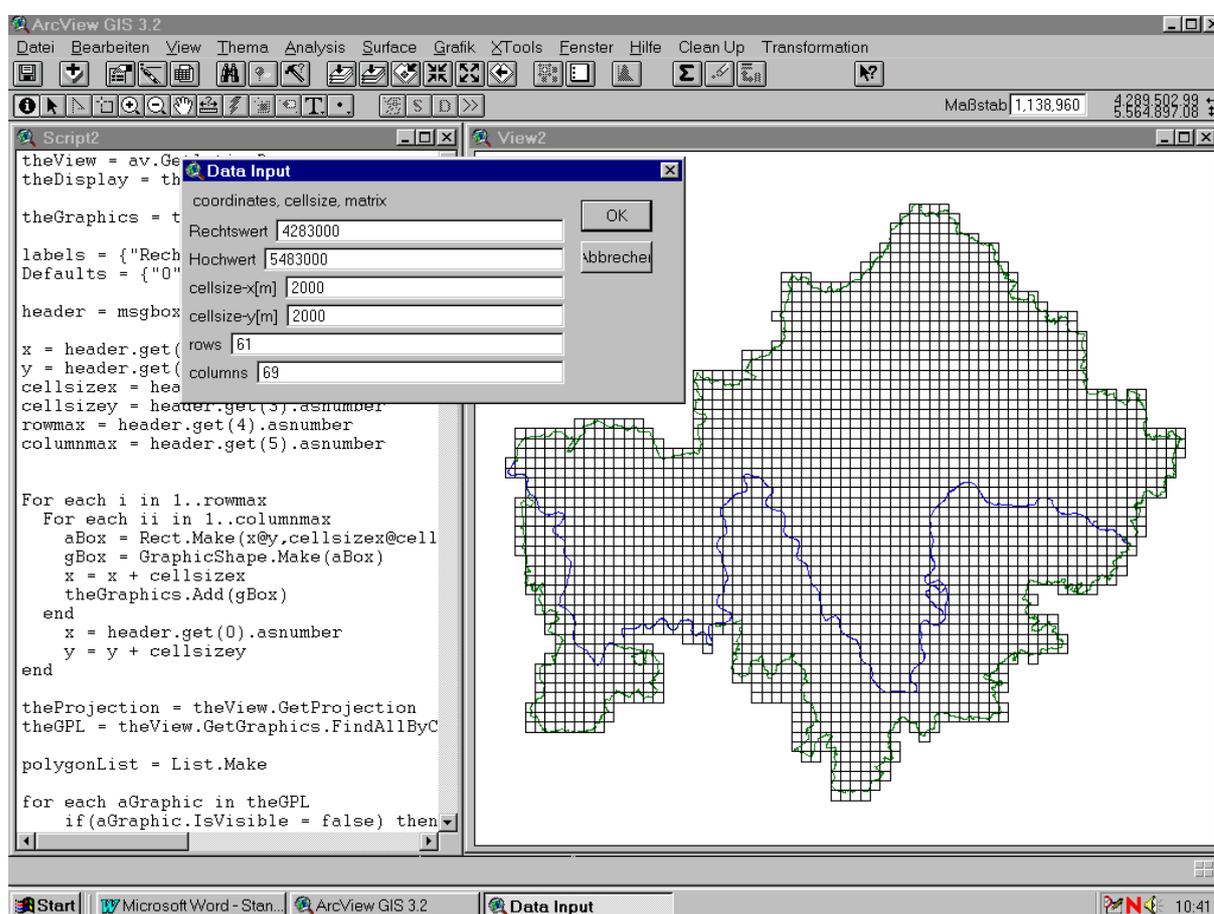


Abb. 6-10: Screen dump von ARCVIEW bei der Ausführung AVENUE-Skripts *polynet.ave* (linkes Teilfenster). Rechtes Teilfenster zeigt das unter der Angabe der Koordinaten im eingblendeten Fenster *Data Input* erzeugte Polygongrid, angepasst an den Untersuchungsraum Unterfranken.

selbst erstellten AVENUE-Skripten *Polynet.ave* und *Density.ave*. Das Script *Polynet.ave* erzeugt ein Polygon-Grid mit frei wählbarer Polygongröße, Gridgröße und -position (vgl. Abb. 6-10, rechts). *Density.ave* verändert die Attributtabelle des bei der Verschneidung (*intersect*) der Vektorkarten von Gewässernetz und Polygongrid resultierenden Polygonthemas [flussint]. Bei der Anwendung der

AVENUE-Routine *intersect* wird jedem Teilabschnitt eines Gewässers die ID des jeweils überlagernden Polygons vererbt. Um nun die Gesamtlänge aller, innerhalb eines Polygons auftretender Gewässerabschnitte zu erhalten, müssen alle Gewässerabschnitte mit der gleichen Polygon-ID aufsummiert werden. Dies wird durch Ausführen des Scripts *Density.ave* erreicht. Das Polygonthema [flussint] wird dabei in ein neues Polygonthema [F_Dichte] überführt, das nun für jedes Rasterpolygon die Gesamtlänge aller Gewässerabschnitte bezogen auf die Fläche (4 km²) – also die Flußdichte – als zusätzliches Attribut erhält.

6.1.3.2 Flußdichte im Bezug auf die geologischen Flächen

Die verwendete Auflösung des Polygonrastermodells [F_Dichte] von 2 x 2 km ist für die Verschneidung mit den geologischen Flächen zu grob. Daher wurde aus dem Polygonthema [F_Dichte] ein Punkttthema [Fd_point] generiert. Der entsprechende Punktvektor wird jeweils im Zentrum eines Polygons plaziert und erbt gleichzeitig alle Attribute des Polygons. Das Punkttthema wird anschließend über eine Flächeninterpolation zu einem Raster-Grid [Fd] mit der Flußdichte als Zellenwert konvertiert, mit gleicher Zellenposition und -größe (200 x 200m) wie ein bereits vorliegendes Grid der GUK500 und GUK200. Über die Anweisung *sample* werden die Attribute beider Grids in einer gemeinsamen Tabelle [Fd_geol] zusammengeführt, die dann für weitere statistische Analysen außerhalb des GIS zur Verfügung steht.

Ergebnis

Für die statistische Auswertung wurden für jede Geologische Einheit arithmetischer Mittel-, Median- und Modalwert der Flußdichte als qualitative Hinweise auf die Untergrunddurchlässigkeit herangezogen. Da sowohl der geologische Aufbau der Einheiten in sich variieren kann als auch vom geologischen Material unabhängige Faktoren abschnittsweise eine erhebliche Rolle spielen, soll die folgende zusammenfassende Darstellung ebenso auf Besonderheiten hinweisen.

Kristallin (K)

Die als Kristallin zusammengefaßten Einheiten erreichen in Unterfranken die höchsten Flußdichten sowohl im Mittel- (1,33 km/km²) als auch im Medianwert (1,35 km/km²), der Modalwert liegt mit 1,43 km/km² sogar noch etwas höher (vgl. Abb. 6-11).

Aufgrund der Verwitterung und Klüftigkeit (weitestgehend offene Klüfte) in oberflächennahen Bereichen hat das Niederschlagswasser offensichtlich die Möglichkeit, in den ansonsten als ausgesprochen geringleitend zu bezeichnenden Metamorphiten schnell zu versickern, um über die auffällig zahlreichen Quellaustritte das Gewässernetz zu ergänzen. Dabei sind ebenso tektonische Strukturen

zu berücksichtigen, die einerseits den kompakten Gesteinsverband lokal auflösen und damit die dortige Durchlässigkeit erhöhen und andererseits bevorzugte Entwässerungsbahnen und Akkumulationsbereiche durch Sattel- und Muldenstrukturen oder Verwerfungen schaffen. Bei einer Gesamtbeurteilung sind allerdings auch die Zuflüsse aus den Buntsand- und Zechsteingebieten mit einzubeziehen. Obwohl die klimatische Position und die Lage des Kristallins im Gewässerregime gute Voraussetzungen für eine wirksame Oberflächenentwässerung bieten, stellt sich besonders der gesteins- bzw. gebirgsspezifische Einfluß auf die Gewässernetzdichte als Charakteristikum dar.

Zechstein/Rotliegendes (z/ro)

Für den Zechstein (Rotliegendesedimente wurden wegen des geringen Flächenanteils nicht gesondert

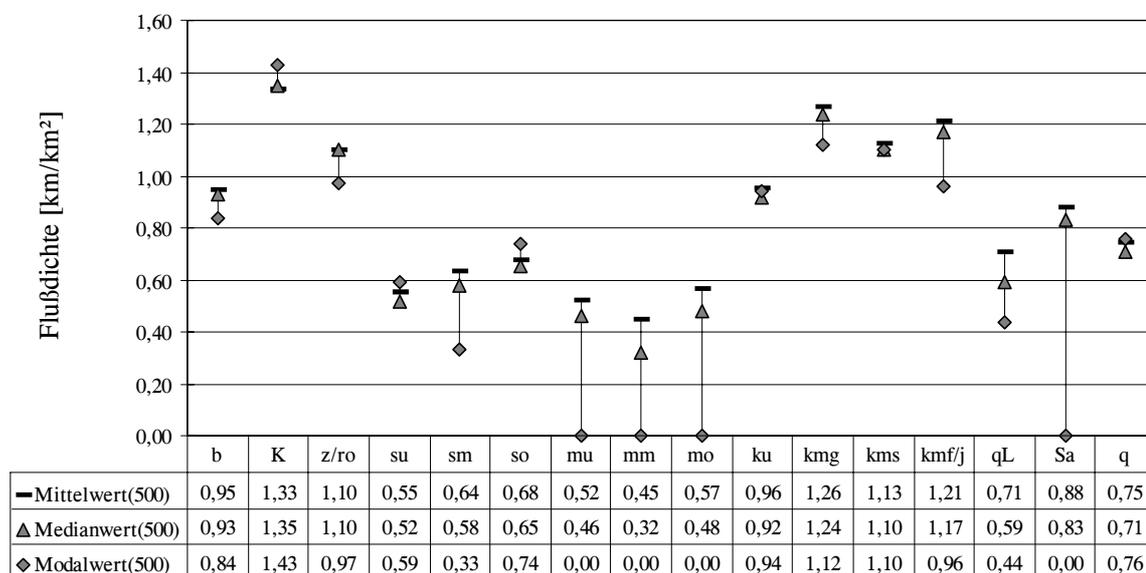


Abb. 6-11: Darstellung der aus der statistischen Analyse ermittelten Flußdichten (Datengrundlage ATKIS25-Vorstufe) im Bezug zu den geologischen Einheiten Unterfrankens der GUK 500 von Bayern (Kurzzeichen).

betrachtet) ergibt sich mit einem Mittel- und Medianwert von 1,10 km/km² eine vergleichsweise hohe Flußdichte, der Modalwert liegt mit 0,97 km/km² nur geringfügig darunter (vgl. Abb. 6-11). Der wesentlichste Grund für die Dichte liegt wohl in den zahlreichen Quellaustritten infolge der gering durchlässigen, tonig bis mergeligen Gesteinsschichten im Grenzbereich Zechstein-Buntsandstein, die zudem als mehr oder weniger geschlossenes Band den Fuß der Buntsandsteinlandstufe bilden und eine räumliche Position einnehmen (vgl. Anlage Karte 2), die eine Oberflächenentwässerung begünstigt. Aufgrund der Zuflüsse und der flächenmäßig relativ geringen Ausbreitung des Zechsteins erniedrigt sich die Gewässernetzdichte durch die Verkarstung im Zechsteindolomit nicht merklich, zumal auch die verkarsteten Bereiche mit zahlreichen Quellaustritten zur Oberflächenentwässerung beitragen. Dieser Umstand darf jedoch nicht dazu führen, dem gesamten

Zechstein generell eine geringdurchlässige und damit auch grundwasserschützende Eigenschaft zu übertragen.

Basalt, Tertiär ungegliedert (b)

Die vorwiegend basaltischen Gesteine zeigen mit einem Medianwert von $0,93 \text{ km/km}^2$ (arithmetischer Mittelwert = $0,95 \text{ km/km}^2$, Modalwert = $0,84 \text{ km/km}^2$) in Anbetracht der klimatischen Extremposition vergleichsweise geringe Flußdichten. Trotz der durchschnittlichen Jahresniederschläge von bis zu 1000 mm kommt es in den Basalten zu keiner intensiven Oberflächenentwässerung. Die basaltischen Gesteine nehmen vorzugsweise die Gipfelregionen der Mittelgebirge (Rhön) ein, daher sind Zuflüsse von benachbarten Einheiten auszuschließen (vgl. Anlage Karte 2). Betrachtet man die Region der Rhön näher, so fällt jedoch auf, daß eine wirksame Oberflächenentwässerung nur dort erfolgt, wo ebene Verhältnisse herrschen, vor allem bei Anwesenheit und Entwässerung von Hochmooren. Insgesamt geben die ermittelten Flußdichten nur bedingt Auskunft über die Untergrunddurchlässigkeit der basaltischen Gesteine, da aufgrund der extremen Verhältnisse andere Faktoren (Klima, Morphologie etc.) eine wesentliche Rolle spielen sowie die flächenmäßige Verbreitung der Basalte für eine gesicherte statistische Analyse zu gering erscheint.

Buntsandstein (su, sm, so)

Für den Buntsandstein zeigt sich vom Unteren zum Oberen eine leichte Erhöhung der Flußdichte von $0,52$ auf $0,65 \text{ km/km}^2$ beim Medianwert. Die Mittel- und Modalwerte liegen für alle drei Formationsglieder im gleichen Bereich mit Ausnahme des Modalwertes des Mittleren Buntsandsteins, der mit einem Wert von $0,33 \text{ km/km}^2$ doch deutlich niedriger ist. Für den Unteren- und Mittleren Buntsandstein können relativ hohe Untergrunddurchlässigkeiten erwartet werden, zumal die Deckschichten nach VOGEL (1961) überwiegend aus sandigen, skelettreichen (steinreichen) Substraten bestehen. Die Unterschiede in den ermittelten Flußdichten sind wohl auf die räumliche Verbreitung der beiden Einheiten zurückzuführen. Während der Untere Buntsandstein vornehmlich im Gebiet des Spessarts und Odenwalds ausstreicht, nimmt der Mittlere Buntsandstein ebenso weite Teile im Rhönvorland ein und erhält dort infolge seiner hydrologischen Position - oftmals in Tälern oder am Fuß der Landstufe - intensiven Zufluß aus dem Mittelgebirge (vgl. Anlage Karte 2). Der deutlich abweichende Modalwert des Mittleren Buntsandsteins weist jedoch gleichzeitig auf die großen Flächen mit einer geringen Gewässernetzdichte im Spessart hin (vgl. Abb. 6-11). Zudem bilden die für beide Einheiten häufig im Talniveau an den Flanken austretenden Quellen keine längeren Gerinne, sondern speisen nach kurzer Wegstrecke die Vorflut oder das nächst größere Fließgewässer. Sie führen daher nicht zu einer wesentlichen Erhöhung der Gewässernetzdichte. Ebenso fällt auf, daß zahlreiche Quellaustritte, z. B. im Vergleich zum Kristallin oder Keuper, nicht zur Oberflächenentwässerung beitragen. Dies hängt einerseits mit den steilen Hanglagen, wo das Quellwasser im

durchlässigen Schutthang schnell versickern und als Zwischenabfluß abgeführt werden kann zusammen und andererseits mit den geringen Ergiebigkeiten der Quellen selbst.

Für den Oberen Buntsandstein wurden aufgrund der am Aufbau der Einheit maßgeblich beteiligten, geringleitenden Röttone erwartungsgemäß höhere Flußdichten ermittelt. In einer Gesamtbetrachtung zeigt sich, daß die Gewässernetzdichte, wie bei anderen Einheiten auch, mit der flächenmäßigen Verbreitung - in Verbindung mit einer flachen oder steilen Morphologie - zusammenhängt. So kommt es, das kleinere Vorkommen - meistens in Toplage - eine geringe oder gar keine Gewässernetzdichte vorweisen. Am Beispiel der Landschaft zwischen Maindreieck und -viereck kommt es bei größeren Ausstrichflächen und gleicher Position (nämlich in Toplage) zur Ausbildung einer charakteristischen flachwelligen Morphologie (vgl. Anlage Karte 2) und zu einer höheren Gewässernetzdichte. Daher dürfte der Modalwert mit $0,74 \text{ km/km}^2$ eher die Abflußeigenschaften bzw. Untergurnddurchlässigkeit des Oberen Buntsandsteins beschreiben als der Median bzw. Mittelwert.

Muschelkalk (mu, mm, mo)

Die statistische Auswertung ergibt für den gesamten Muschelkalk ein relativ einheitliches Bild mit mittleren Flußdichten zwischen $0,45$ und $0,57 \text{ km/km}^2$, etwa $0,1 \text{ km/km}^2$ darunter liegendem Medianwert und mit 0 km/km^2 sehr stark abweichendem Modalwert. An der Abbildung 6-8 ist sehr deutlich zu erkennen, daß häufig dann ein stetig fließendes Gewässer im Bereich der Muschelkalkareale auftritt, wenn ein gewisser Zufluß von benachbarten Einheiten (vorwiegend Unterer Keuper) erfolgt und der entsprechende Muschelkalkabschnitt hydrologisch eine Talposition einnimmt (vgl. Abb. 6-9). Auf den flachwelligen Hochflächen (Platten) ist auf Grundlage der TK 25 eine ausgesprochen geringe bis keine Gewässernetzdichte entwickelt. Die hohe Wasserspeicherkapazität der weitverbreiteten Lößauflage trägt ebenfalls zu dieser Entwicklung bei. Bei stärker schüttenden Quellen (meist Karst) auf Talniveau kann sich lokal ein Gewässer entwickeln, was insgesamt jedoch - unter Berücksichtigung der günstigen hydrologischen Position - mehr für eine hohe als für eine geringe Untergurnddurchlässigkeit spricht. GEORGOTAS & UDLUFT (1978) geben für den Muschelkalk im Vergleich zum Buntsandstein und Keuper die höchsten Kluftvolumina in Unterfranken von 2 - 4 % an. Nach den statistischen Kluftmessungen von KUS (1995) berechnen sich für die Kalkstein-Tonmergelstein-Wechselfolgen des Oberen Muschelkalkes, bei einer angenommenen Kluftweite von $0,1 \text{ mm}$, Kluftvolumina von $0,1$ bis $0,9 \%$. Zieht man jedoch größere Kluftweiten durch Verkarstung kompetenter Lagen (Kalksteinbänke) in Betracht, so kann abschnittsweise mit Kluftvolumina $> 5\%$ gerechnet werden. Der Muschelkalk ist in weiten Teilen aufgrund seiner verkarstungsanfälligen Gesteine und klüftigen Struktur und der dadurch bedingten Durchlässigkeitsverhältnisse als minder ablagerungsfreundlich zu bezeichnen.

Keuper (ku, kmg, kms, kmf/j)

Im Keuper werden durch den bedeutenden Anteil toniger Gesteine hohe Flußdichten-Werte erreicht. Während im Unteren- und Sandsteinkeuper die Modalwerte kaum von den Mittelwerten abweichen,

liegen die Modalwerte des Gipskeupers und der Feuerletten bzw. Liasschichten deutlich unter ihren Mittel- und Medianwerten. Die Werte für den Unteren- und Sandsteinkeuper scheinen recht charakteristisch zu sein, zumal bei beiden die Gewässernetzdichte i. d. R. nicht auf Zuflüsse von Nachbarheiten zurückzuführen ist. Die Oberflächengewässer werden von zahlreichen Schichtquellen gespeist, die innerhalb dieser beiden Einheiten entspringen. Beim Unteren Keuper wirkt sich dabei offensichtlich die klimatische Position mit durchschnittlich 100 bis 200mm jährlicher Gesamtabflußhöhe vermindern auf die Flußdichte aus, im Sandsteinkeuper werden im Vergleich 300 bis 400mm angegeben (vgl. Abb. 6-2). Zudem sickert ein Anteil des unterirdischen Wassers aus dem Unteren Keuper dem Oberen Muschelkalk zu. Ein gewisser Einfluß der im Bereich des Unteren Keupers weit verbreiteten, durch ein hohes Wasserspeichervermögen gekennzeichneten Lößüberdeckung, muß gleichfalls berücksichtigt werden.

Die hohen Flußdichten im Gipskeuper sind auf die mächtigen Ton-Mergelsteinlagen zurückzuführen, die besonders im verwitterten Zustand eine geringe Untergrunddurchlässigkeit provozieren. Der geringere Modalwert geht dabei vor allem auf Bereiche zurück, wo infolge des Gipskarstes (z. B. Grundgipsschichten) ein relativ schnelles Versickern von Niederschlagswasser in den Untergrund ermöglicht wird. Fehlen andererseits geeignete Schichten, die das Sickerwasser sowohl speichern als auch über Quellaustritte den Oberflächengewässern wieder zuführen, entsteht zwar bei Niederschlagsereignissen zunächst ein wirksamer Oberflächenabfluß, der allerdings durch fehlenden Nachschub schnell zum Erliegen kommt. Dieser Umstand führt bei fehlenden Zuflüssen zu einer niedrigen oder fehlenden Gewässernetzdichte, die in diesem Fall jedoch nicht auf eine hohe, sondern vielmehr auf eine ausgesprochen geringe Untergrunddurchlässigkeit schließen läßt. Gleiches gilt für die Feuerletten bzw. für den Lias, die beide zusammen jedoch flächenmäßig nur einen sehr geringen Bereich in Unterfranken einnehmen.

Insgesamt können die hohen Flußdichten im Keuper auf die allgemein geringen Durchlässigkeiten zurückgeführt werden.

Quartär (qL, Sa, q)

Die quartären Einheiten Löß, Flugsand und Quartär ungliedert zeigen kein einheitliches Bild (vgl. Abb. 6-11). Die Werte sind vor allem als Folge der jeweiligen räumlichen Position der einzelnen Ausstriche und der angrenzenden Nachbarformationen zu sehen. Auszuklammern sind auf jeden Fall die Flußdichten der Quartären Sedimente im Bereich der Vorflut bzw. der Täler. Die ermittelten Flußdichten für die Löß- und Flugsanddecken sind hauptsächlich auf das Entwässerungsverhalten der an- bzw. unterlagernden Einheiten zurückzuführen. So zeigt sich gerade bei exponierter Lage der Decken, also dort, wo kein Zufluß von den benachbarten Einheiten erfolgt, kaum eine Gewässernetzdichte. Zudem führt die hohe Wasserspeicherkapazität der Lößauflagen zu einer stark verzögerten Sickerwasserbewegung. Infolge des hohen Anteils an pflanzenverfügbarem Wasser wird insbesondere während der Vegetationsperioden ein Großteil des Wassers dem Boden und damit dem

möglichen Grundwasserzu- bzw. Zwischenabfluß wieder entzogen. Vor allem in den Sommermonaten kann sich dann kein stetiger Gewässerfluß entwickeln. Für die genannten quartären Einheiten sind die Durchlässigkeiten mehr oder weniger bekannt. Der Löß ist mit durchschnittlich gesättigten Durchlässigkeiten bei 10^{-7} m/s (KÖNIG, 1993; UDLUFT et al., 2000) als geringleitend zu bezeichnen, die quartären Füllungen entlang der Vorfluter (z. B. Main) mit durchschnittlichen Größen von 10^{-3} (KANZ, 1977; AL-AZAWI et al., 1978) bis 10^{-4} m/s (KANZ, 1978) als durchlässig, ebenso der Flug-sand mit geschätzten Werten von 10^{-4} bis 10^{-5} m/s (AG BODEN, 1994).

6.1.3.3 Bewertung Gewässernetzdichte

Die Gewässernetzdichte (Flußdichte) gibt nach den bisherigen Untersuchungen einen indirekten Hinweis auf die Durchlässigkeitsverhältnisse im Untergrund. WROBEL & HANKE (1987) bemerken gleichermaßen, daß die Ausbildung des Gewässernetzes Rückschlüsse auf die Durchlässigkeit des Untergrundes zuläßt und damit auf die Grundwassergefährdung eines Gebietes. Verallgemeinert man die aus der Analyse der Gewässernetzdichte ermittelten Erkenntnisse, so ist bei den geologiebezogenen hohen Flußdichten die Existenz geringleitender Schichten zwingend, ebenso die, relativ oberflächennah gelagerter Grundwasserleiter, welche das infiltrierende Niederschlagswasser zwischenspeichern und verzögert über Quellaustritte an die Oberflächengewässer weitergeben.

Für die Bewertung kann angenommen werden, daß die Zugehörigkeit eines Gebietes zur Menge AF mit steigender Flußdichte linear zunimmt. Dabei läßt sich anhand des durchschnittlichen Maximal- und Minimalwertes der Flußdichten eines Untersuchungsraumes die in Abbildung 6-12 dargestellten Zugehörigkeitsfunktion definieren.

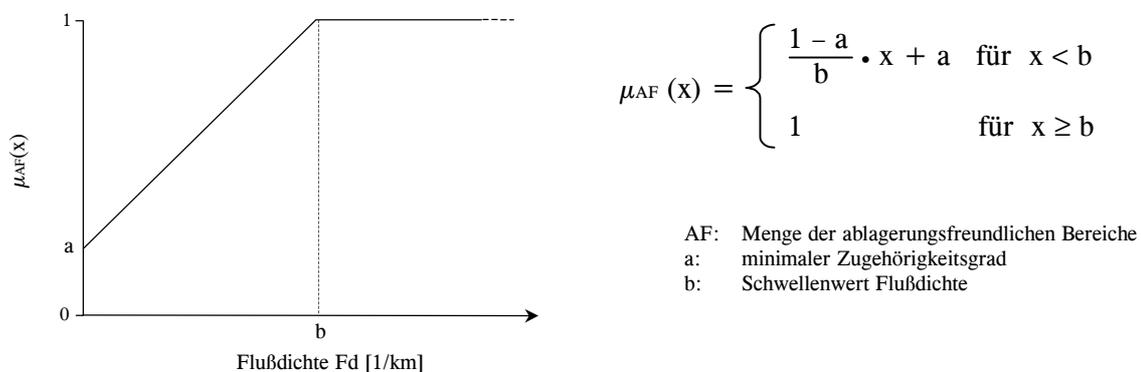


Abb. 6-12: Zugehörigkeitsfunktion Flußdichte mit Darstellung des Funktionsgraphen

Zur Ermittlung der Ablagerungsfreundlichkeit im Bezug auf charakteristische Gewässernetzdichten der geologischen Einheiten werden die ermittelten Medianwerte herangezogen. Es wird angenommen, daß bei Flußdichten $\geq 1,2 \text{ km/km}^2$ (berechnet sich beispielsweise für die Einheiten Kristallin und Gipskeuper) eine wirksame Oberflächenentwässerung erfolgt, bei vergleichsweise geringen Untergrunddurchlässigkeiten. Es wurde zudem vereinbart, daß geringe Flußdichten keinen Ausschluß einer Fläche bewirken. Der Grund hierfür liegt prinzipiell in der starken Generalisierung der auf den Abflußvorgang Einfluß nehmenden Größen, so daß z. B. für keine geologische Einheit ein über die gesamte Fläche hinweg repräsentativer Wert zur Abschätzung der Durchlässigkeit definiert werden kann. Der eingeführte Randparameter c beschreibt also den kleinstmöglichen Zugehörigkeitsgrad der Modellzelle zur Menge AF. Die Randparameter der Zugehörigkeitsfunktion nach Abschnitt 6.2. erhalten nun folgende Werte:

$$b = 1,2 \quad c = 0,2$$

Nach einsetzen in die Zugehörigkeitsfunktion ermittelt sich der Zugehörigkeitsgrad anhand der folgenden linearen Beziehung:

$$\mu_{AF(X)} = 0,66X + 0,2$$

Ergebnis

Wie aus den Abbildungen 6-8 und 6-11 ersichtlich, besteht für den Raum Unterfranken eine Übereinstimmung zwischen dem Auftreten bestimmter geologischer Einheiten und der Ausbildung des Gewässernetzes. Ermittelt man die Flußdichte unabhängig vom Ausstrich der geologischen Einheiten, zeichnet das gewonnene Muster die Geologie im weitesten Sinne nach. Nach Festlegung charakteristischer Flußdichten für jede geologische Einheit, ergeben sich die in Abbildung 6-13 angegebenen Zugehörigkeitsgrade. Die tertiären Einheiten (Vulkanite, miozäne Sande, Tone, Braunkohle) geben mit Zugehörigkeitsgraden um 0,8 bedingte Ablagerungsfreundlichkeit an, fallen letztendlich aufgrund ihrer naturräumlichen Position aus dem vorliegenden Bewertungsschema heraus. Das Kristallin und der Zechstein des Spessarts sind mit Zugehörigkeitsgraden größer 0,9 als ablagerungsfreundlich zu bezeichnen, wobei sich Wert des Zechsteins auf die obersten Ton- und Mergelsteine (Dolomite) bezieht. Beim verkarstungsanfälligen Zechsteindolomit dürften sich die Durchlässigkeiten des Untergrundes deutlich erhöhen, was dort eine geringere Ablagerungsfreundlichkeit bedingt. Die bedingte Ablagerungsfreundlichkeit der Buntsandsteineinheiten dürfte die Durchlässigkeitsverhältnisse widerspiegeln. Dabei ist jedoch die Tendenz des Oberen Buntsandsteins zur Ablagerungsfreundlichkeit nicht so stark ausgeprägt wie es aufgrund der mächtigen, geringleitenden Tonsteinpakete im Oberen Bereich zu erwarten wäre. Der gesamte Muschelkalk deutet auf eine geringe bis

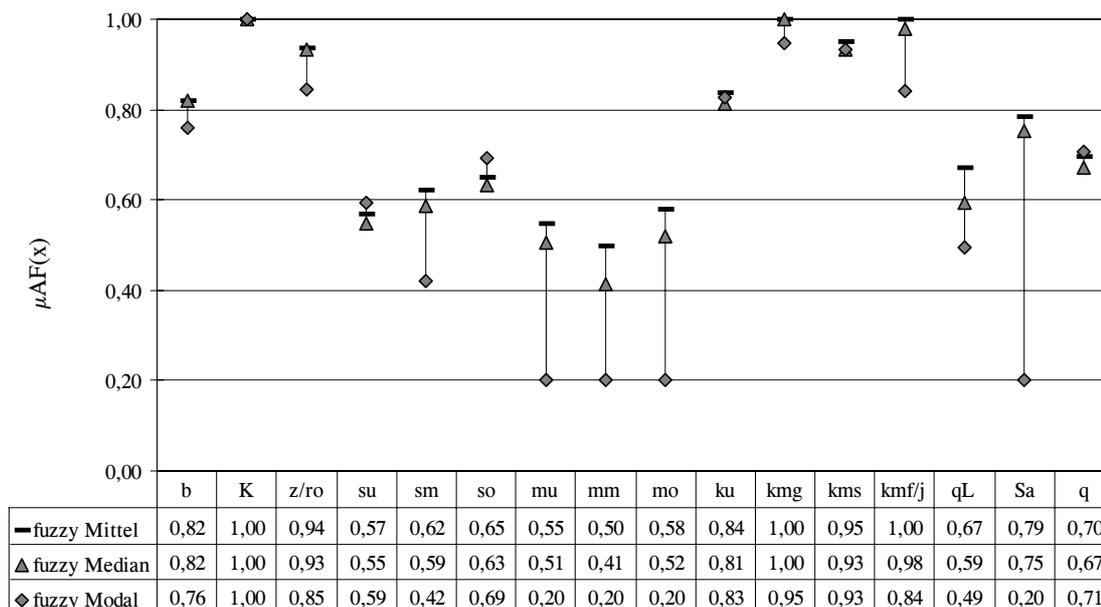


Abb. 6-13: Darstellung des Zugehörigkeitsgrades ($\mu_{AF}(x)$) einer geologischen Einheit zur Menge AF in Abhängigkeit der Durchlässigkeitsverhältnisse des Untergrundes (indirekt ermittelt aus der Flußdichte).

bedingte Ablagerungsfreundlichkeit hin. Insbesondere der verkarstungsanfällige Mittlere Muschelkalk ist tendenziell als gering ablagerungsfreundlich einzustufen. Die Zugehörigkeitsgrade der Keupereinheiten liegen mit Ausnahme des Unteren Keupers deutlich über 0,8 und werden daher als ablagerungsfreundlich klassifiziert, beim Unteren Keuper mit der Tendenz einer geringeren Ablagerungsfreundlichkeit. Die ermittelten Zugehörigkeitsgrade für die quartären Einheiten stimmen mit den tatsächlichen Durchlässigkeitsverhältnissen, wie schon weiter oben diskutiert, nicht überein. Infolge durchschnittlicher Durchlässigkeitsbeiwerte sind der Löß bzw. Lößlehm als bedingt ablagerungsfreundlich bis ablagerungsfreundlich, die Flugsanddecken als bedingt bis gering und die restlichen quartären Einheiten als gering ablagerungsfreundlich zu bewerten.

6.1.4 Quellenposition

Die Grundlage der räumlichen Analyse der Quellpunkte bilden die unter Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Punkt-Vektordaten, basierend auf der TK 25. Die räumliche Position einzelner Punktobjekte sowie die Lage und Ausdehnung der zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiete erlauben eine generalisierte Abgrenzung von theoretischen Grundwasserbereichen. Die Generalisierung geht hier auf folgende Annahmen zurück:

- Horizontale, ebene Erstreckung des Grundwasserleiters (ein anzunehmendes Gefälle und mögliche tektonische Strukturen werden vernachlässigt).
- die Zugehörigkeit eines Gebietsabschnittes (Modellzelle) erfolgt zum nächstliegenden Punktobjekt (Quelle).

Diese Zuordnung im Rahmen einer Standortanalyse eignet sich nur für kleinmaßstäbliche Übersichtsanalysen. Es handelt sich um eine geometrische Analyse, die aufgrund des Maßstabs keine lokalen Besonderheiten oder spezielle hydrogeologische Situationen berücksichtigt. Im folgenden wird ein theoretischer Grundwasserbereich definiert, der Bereiche wahrscheinlicher gesättigter Verhältnisse anzeigt. Mit Entfernung zum theoretischen Grundwasserbereich, nimmt die Wahrscheinlichkeit gesättigter Verhältnisse ab.

6.1.4.1 Theoretischer Grundwasserbereich

Für die Ermittlung der theoretischen Grundwasserbereiche müssen zuerst die zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiete aus dem Höhenmodell ermittelt werden. Zur Generierung der Grenzen aus dem DGM bietet die Umgebung des SPATIAL ANALYST von ARCVIEW eine Reihe von AVENUE-Anweisungen. Die Anweisung *Wasserscheide (watershed)* setzt ein sogenanntes *Fließrichtungs-Grid (flow direction grid)* und ein *Zielpunkt-Grid (target bzw. pour point grid)* voraus. Das *flow direction grid* wird direkt aus dem DGM (AVENUE-Anweisung *FlowDirection*) nach der Methode von JENSON & DOMINGUE (1988) berechnet, indem für jede Zelle im DGM die Richtung zum Nachbarpunkt mit dem größten Höhenunterschied bestimmt wird. Das *target grid* enthält die tiefsten Punkte der Einzugsgebiete. Die Anzahl (Dichte) und Lage der *Torpoints* im *target grid* legen die Auflösung in entsprechende Teileinzugsgebiete fest. Werden die Schnittpunkte aller Talachsen als *Torpoints* gesetzt, so ist theoretisch die maximale Auflösung in Teileinzugsgebiete erreicht. *Torpoints* können über das Drännetzwerk ermittelt werden, welches ebenfalls über das Höhenmodell halbautomatisch berechnet werden kann. Zur Generierung des Dränsystems aus dem DGM siehe Abschnitt 6.1.5 Tiefenbereiche.

Die *watershed*-Anweisung berechnet nun für jeden *Torpunkt* alle Zellen, die von ihm aus - bezogen auf die Geländehöhe - ansteigen und weist ihnen den eigenen Wert zu (z. B. die ID). So entsteht eine Fläche mit Zellen gleicher Werte, die der oberirdischen Einzugsgebietsfläche entspricht. Da sich nun alle Einzugsgebiete gemäß ihrer gemeinsamen Zellenwerte voneinander unterscheiden, kann eine Konversion der Rasterflächen in Vektorpolygone erfolgen. Auf diese Weise wurden 8050 Teileinzugsgebiete für Unterfranken ermittelt (vgl. Abb. 6-14).

Erheblich schwieriger gestaltet sich die räumliche Abgrenzung der Grundwasserbereiche. Ohne Berücksichtigung der Untergrundstruktur bleibt nur die Möglichkeit, die Bereiche näherungsweise auf die oberirdischen Einzugsgebiete zu beziehen. Über die arithmetische Verschneidung der Distanzenmatrizen der Einzugsgebietsgrenzen und der Quellen (vgl. Abb. 6-14, Kartenausschnitte 1 & 2) erhält man in einem ersten Schritt jene Bereiche, die sich innerhalb eines bestimmten Abstandes zwischen Quellpunkt und Wasserscheide bewegen. Zellen, deren Abstände zur nächsten Quelle größer sind als die Abstände zur nächsten Einzugsgebietsgrenze, werden ebenso sichtbar. Wie in der Abbildung 6-14, Kartenausschnitt 3 zu sehen ist, nimmt der potentielle Einzugsbereich der Quellpunkte aufgrund ihrer Position innerhalb des oberirdischen Einzugsgebiets von grün nach grau ab. Die weißen Bereiche dürften jenseits der theoretischen Grundwasserbereiche liegen.

Der nächste Schritt ist die Zuordnung der Höhen zu den einzelnen Grundwasserbereichen. Hierzu müssen die Höhenangaben der einzelnen Quellen auf die Fläche interpoliert werden. Eine Möglichkeit - ohne die Erhebung weiterer Daten über den Untergrund - scheint die Bildung von Flächen, die sich auf Zellen gleicher Werte beziehen, die Zellen wiederum auf den am nächsten positionierten Quellpunkt. Unter Einsatz der AVENUE-Anweisung *Proximity* mit den Quellen als Stützpunkte, erhält man auf Grundlage Euklidischer Distanzen eine geometrische Flächeneinteilung für den gesamten Untersuchungsraum. Jedem Quellpunkt wird auf diese Weise eine Rasterfläche zugeordnet und jede Fläche erhält einen aus der Attributtabelle der Punktvektoren frei wählbaren Wert, in diesem Fall die Quellenhöhe über NN (vgl. Abb. 6-14, Kartenausschnitt 4).

Die arithmetische Verschneidung zwischen den eben ermittelten Flächen, der Grundwasserbereiche und dem DGM ergibt ein Grid, welches den Höhenbezug zwischen Geländeoberfläche und theoretischem Grundwasserbereich vereinfacht darstellt (vgl. Abb. 6-14, Kartenausschnitt 5).

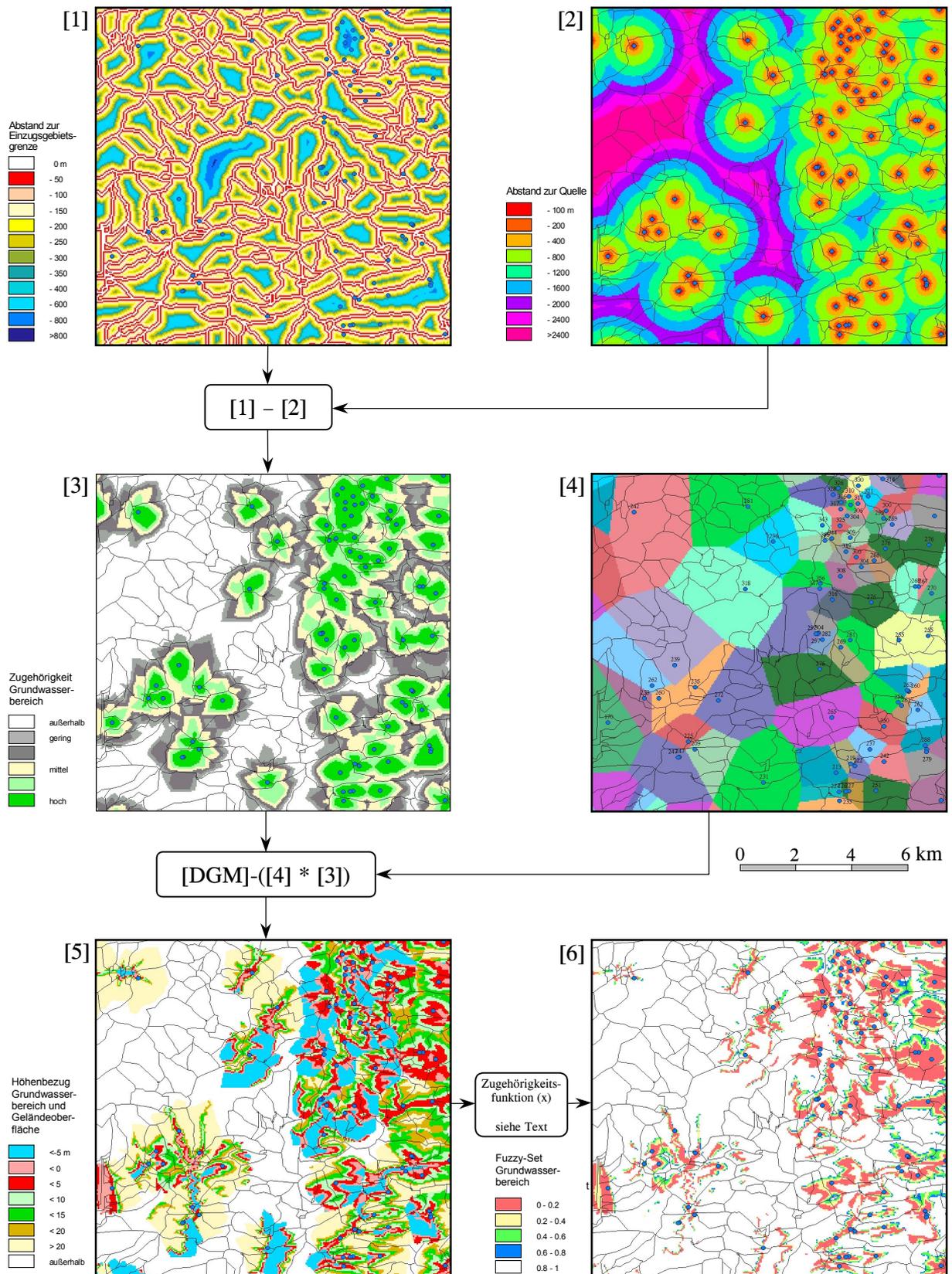


Abb. 6-14: Die Darstellung zeigt die oberirdischen Einzugsgebiete (schwarze Linien) und Quellpunkte (blau) für einen Ausschnitt nordöstlich von Würzburg. Die arithmetische Verschneidung der Karten 1-4 dient zur Berechnung der Lage theoretischer Grundwasserbereiche. Die Verschneidung der Karten 5 und 6 dient zur Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit und erfolgt über die im Text erläuterte Zugehörigkeitsfunktion. Die Farbgebung der Karte 4 erfolgt nach der Höhenangabe der Quellpunkte (Zahlenangabe).

6.1.4.2 Grundwasserbereiche bezogen auf die geologischen Flächen

Bezieht man die ermittelten Grundwasserbereiche auf die Ausstrichflächen der geologischen Einheiten, so sind gemäß der Abbildung 6-15 charakteristische Verteilungsmuster zu sehen.

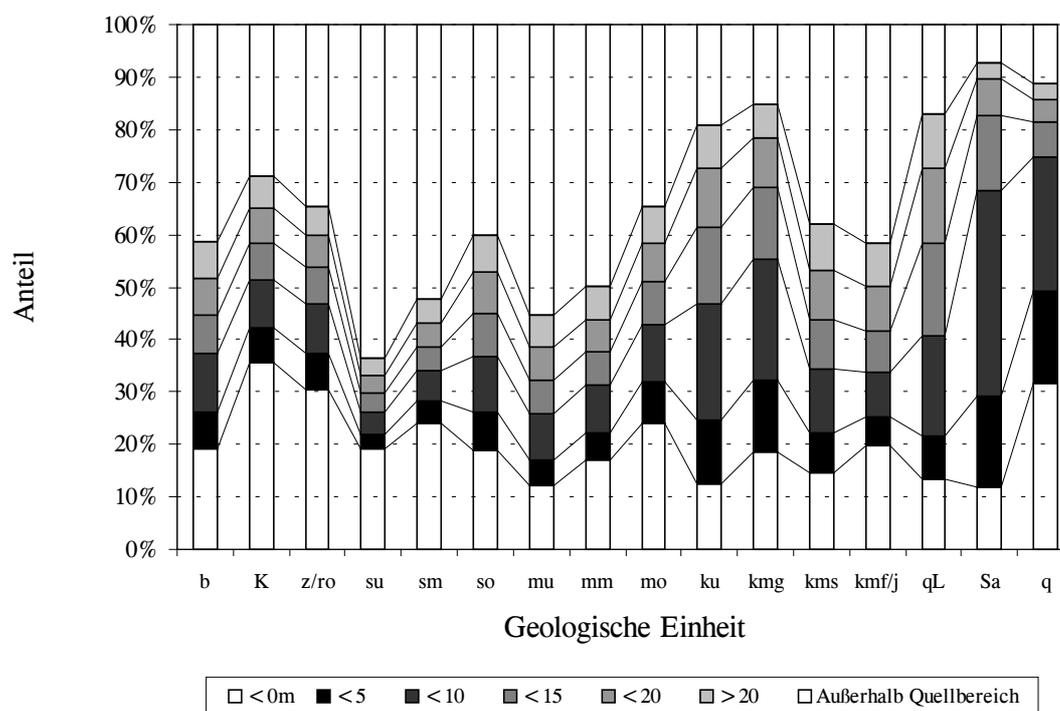


Abb. 6-15: Häufigkeitsverteilung der Mächtigkeiten der Überdeckung theoretischer Grundwasserbereiche, gegliedert nach den Ausstrichbereichen der geologischen Einheiten.

Kristallin (K)

Das Kristallinegebiet erreicht mit einem Anteil von 35% der Flächen, die bis zu 5 m unterhalb der ermittelten Grundwasserbereiche liegen, den höchsten Wert aller untersuchten Einheiten, was darauf schließen läßt, daß zahlreiche Quellen unmittelbar in der Umgebung von (Tal-) Ebenen entspringen. Die Verteilung der Gebiete, die im Einzugsbereich und im Niveau oberhalb der Grundwasserbereiche liegen, verteilen sich relativ gleichmäßig auf die verschiedene Höhenstufen, was im Bezug zur Geländeoberfläche sowohl auf die Existenz flach als auch tief liegender Grundwasserleiter hinweist. Der Anteil der Flächen, die außerhalb der Grundwasserbereiche liegen, ist mit 29% vergleichsweise gering und spiegelt damit die mit 1,7 Quellen pro km² hohe Quellendichte (vgl. Abb. 6-16) wider.

Zechstein (z/ro)

Der Ausstrichbereich des Zechsteins zeigt ein ähnliches Bild wie der des Kristallingebietes, jedoch mit 5% geringeren Flächenanteilen unterhalb der theoretischen Grundwasserbereiche zugunsten einer flächenmäßigen Zunahme der Gebiete, die außerhalb der Einzugsgebiete liegen. Die sehr hohe Quellendichte von 2,92 Quellen / km² erklärt sich vor allem durch die zahlreichen Quellen, die im Grenzbereich Zechstein/Buntsandstein entspringen, die aber auf das vergleichsweise kleine Verbreitungsgebiet des Zechsteins bezogen werden. Dies erklärt ebenso den hohen Anteil der Flächen, die sich außerhalb der Einzugsbereiche befinden, denn weite Teile der Einzugsgebiete liegen aufgrund der Quellenpositionen bereits im Unteren Buntsandstein.

Buntsandstein (su, sm, so)

Es fällt auf, daß beim Unteren und Mittleren Buntsandstein sich jeweils ein Flächenanteil größer 50% außerhalb der berechneten Einzugsgebiete befindet. Im Unteren Buntsandstein nehmen die Einzugsgebiete entsprechend der ermittelten Quellendichte von 0,47 Quellen/km² einen erwartungsgemäß geringen Flächenanteil ein. Davon entfallen mit 19% über die Hälfte auf die Bereiche unterhalb der ermittelten Grundwasserbereiche. Der Mittlere zeigt sowohl für die Abschnitte unterhalb als auch oberhalb der Grundwasserbereiche einen leichten Anstieg gegenüber dem Unteren Buntsandstein, was sich dort verständlicherweise auch in einer höheren Quellendichte mit 0,67 Quellen/km² niederschlägt. Der verhältnismäßig geringe Flächenanteil der Einzugsgebiete ist jedoch nicht nur auf die Quellendichte zurückzuführen. So vermittelt beispielsweise der Obere Muschelkalk mit einer niedrigeren Quellendichte als der Untere und Mittlere Buntsandstein einen wesentlich höheren Flächenanteil seiner Quelleinzugsgebiete. Der Unterschied ist vor allem auf die Position der einzelnen Grundwasserbereiche innerhalb des zugehörigen oberirdischen Einzugsgebietes zu suchen, verstärkt durch den Umstand, daß zahlreiche Quellen im Buntsandstein nahe beieinander liegen und somit in der Summe wesentlich kleinflächigere Einzugsgebiete ergeben als die weiter voneinander entfernten Quellgebiete im Oberen Muschelkalk. Ein morphologischer Faktor, der sich aus der intensiven Zertalung, in Verbindung mit steilen Talflanken und Hochebenen geringer Erstreckung ergibt (vgl. Anlage Karte 2), sorgt innerhalb der Buntsandsteingebiete zudem für eine vergleichsweise hohe Anzahl kleinflächiger oberirdischer Einzugsgebiete, was einen gewissen Einfluß auf die Ausdehnung der Quelleinzugsgebiete ausüben dürfte. In der geometrischen Analyse findet sich der hydrogeologische Charakter des Unteren- und Mittleren Buntsandsteins wieder. Die meisten Quellen befinden sich im Talbereich und stehen mit dem Hauptgrundwasserstockwerk in Kontakt. Hängende Grundwasservorkommen gibt es mit wenigen Ausnahmen im Unteren Buntsandstein nicht, im Mittleren nur an der Basis des Sollingsandsteins.

Der Obere Buntsandstein hebt sich deutlich vom Unteren und Mittleren ab. Aufgrund der Position der Grundwasserbereiche im jeweiligen Einzugsgebiet und der geographischen Lage der Ausstrichflächen (meistens in Toplage), tritt der flächenmäßige Anteil der Abschnitte unterhalb der Grund-

wasserbereiche mit 19% deutlich gegenüber den oberhalb gelegenen mit einem Anteil von 41% zurück. Dabei ist ein leichtes Übergewicht derjenigen Geländeabschnitte zu erkennen, die < 10m von den berechneten Grundwasserbereichen entfernt sind.

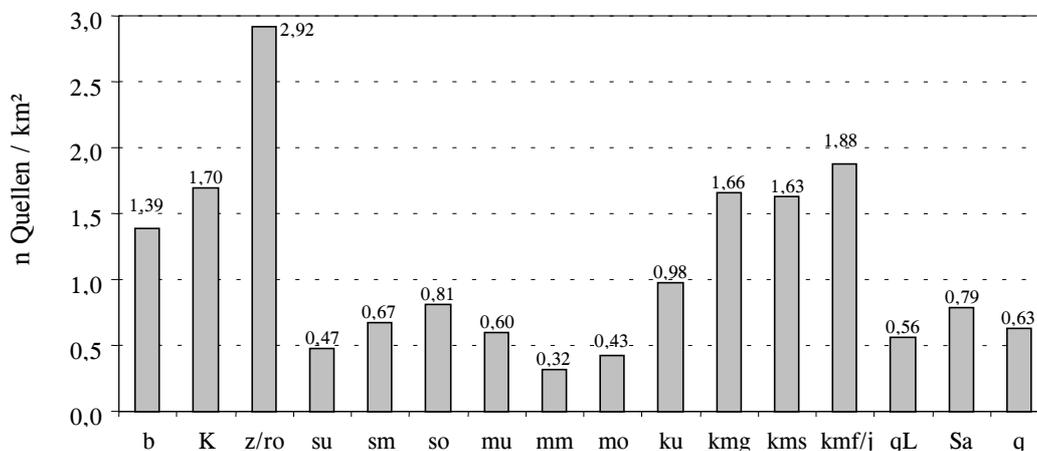


Abb. 6-16: Quellendichte (Anzahl n Quellen / km²) nach der TK25 bezogen auf die Flächen der geologischen Einheiten

Muschelkalk (mu, mm, mo)

Beim Muschelkalk kann ein relativ einheitlicher Trend in der Zunahme des flächenmäßigen Anteils der Quelleinzugsgebiete vom Unteren zum Oberen beobachtet werden. Bei der Berechnung der Quellendichte der einzelnen Einheiten kommen insbesondere die günstigen Voraussetzungen für die Bildung von Quellhorizonten an der Grenze Muschelkalk/Buntsandstein zum tragen. Dieser Umstand sorgt für die höhere Quellendichte des Unteren Muschelkalkes mit 0,6 Quellen/km² gegenüber dem Mittleren mit 0,32 und dem Oberen mit 0,43 Quellen/km². Trotz einer deutlich geringeren Quellendichte ist der flächige Anteil der Quelleinzugsgebiete innerhalb des Mittleren Muschelkalkes höher als im Unteren. Dies hängt einerseits mit den zahlreichen Quellen zusammen, die an der Basis des Unteren Muschelkalkes entspringen und daher ein gewisser Gebietsanteil ihrer Einzugsbereiche bereits in den Oberen Buntsandstein hineinreichen und andererseits mit der hydrologischen Talposition mehrerer Quellen des Mittleren Muschelkalks, die eine Zunahme des Einflußbereiches unterhalb der Quellhorizonte nach sich ziehen. Für den Oberen Muschelkalk gilt prinzipiell das gleiche mit dem wesentlichen Unterschied, daß sich die Einzugsgebiete zahlreicher Quellen im hangenden Unteren Keuper oftmals mit den Ausstrichen des Oberen Muschelkalk überschneiden.

Keuper (ku, kmg, kms, kmf/j)

Die Einheiten des Keupers zeigen im Vergleich zu den anderen geologischen Einheiten die klare Abhängigkeit zwischen der Ausdehnung der Grundwasserbereiche und der morphologischen Ausprägung und Größe der zugehörigen oberirdischen Einzugsgebiete. Der auffällig geringe Flächenanteil der Gebiete außerhalb der Quelleinflußbereiche mit 19% beim Unteren und 15% beim Gipskeuper ist nicht alleine auf die Quellendichte, die mehr oder weniger mit dem geologischen Aufbau des Untergrundes zusammenhängt, zurückzuführen, sondern maßgeblich auch auf die morphologischen Strukturen, die innerhalb dieser Einheiten vorherrschen (vgl. Anlage Karte 2). Weniger steile Geländeformen - in Verbindung mit ausgedehnten Ebenen - führen zur Ausbildung größerer oberirdischer Einzugsgebiete und infolge dessen auch zur Ausdehnung der theoretischen Grundwasserbereiche. Gerade bei den genannten beiden Einheiten ist ein deutliches Übergewicht der Gebietsanteile zu verzeichnen, die bis < 10m oberhalb der berechneten Grundwasserbereiche liegen. Im Gegensatz dazu geht der Flächenanteil der Grundwasserbereiche im Sandsteinkeuper und im Ausstrichgebiet der Feuerletten - trotz ähnlich hoher Quellendichte wie beim Gipskeuper (im Bezug auf den Unteren Keuper deutlich höher) - auf mehr als das Doppelte zurück. Der Bereich des Steigerwaldes ist neben den westlich gelegenen Mainfränkischen Platten wesentlich intensiver noch dazu in steilere Täler zergliedert, was sich auf die Größe der oberirdischen Einzugsgebiete ebenso wie auf die Einzugsgebiete der Quellen auswirken muß. Demzufolge nimmt der Flächenanteil der Gebietsabschnitte die bis < 10m über dem Grundwasserbereich liegen, gegenüber dem Unteren und Gipskeuper wieder deutlich ab.

Basalt (b)

Die basaltischen Decken in der Rhön zeigen eine relativ hohe Quellendichte, die von den vielen kleineren basaltischen Vorkommen in der Kuppenrhön, wo sich aufgrund der geringen Ausdehnung und morphologischen Gegebenheiten erst im Grenzbereich zu den Liegenden Einheiten oder darunter Grundwasserbereiche ergeben, reduziert wird. Somit vermindert sich auch der Flächenanteil der Grundwasserbereiche auf 58%. Unter Abzug der Gebiete der Kuppenrhön dürfte sich der schon ohnehin deutlich ausgeprägte Flächenanteil der Gebietsabschnitte bis < 10m über den ermittelten Grundwasserbereichen noch erhöhen. Aufgrund der Stauwirkung der Hochmoorböden und tuffitischen Zwischenlagen sind im Gebiet der Basaltdecken einerseits flachgründige Grundwasserbereiche anzunehmen, andererseits sind zahlreiche Stauquellen bekannt, die aus tiefer liegenden Grundwasserbereichen gespeist werden. Mit der vorliegenden geometrischen Analyse können diese Phänomene jedoch nicht erfaßt werden.

Quartär (qL, Sa, q)

Die ausgedehnten Quelleinflußbereiche der Quartären Einheiten sind mit wenigen Ausnahmen auf die hydrogeologischen Eigenschaften der liegenden Schichten und besonders im Fall der Talfüllun-

gen auf ihre Position im Einzugsgebiet zurückzuführen. Die Feststellung, daß sie als Deckschichten sehr häufig im Einzugsbereich von Quellen liegen erscheint deshalb so wichtig, als daß sie in Abhängigkeit ihrer Materialeigenschaften einen zusätzlichen Schutz für den Grundwasserleiter darstellen können. Für den Löß bzw. Lößlehm kann aufgrund der hohen Wasserspeicherfähigkeit und der durchschnittlich geringen Durchlässigkeitsverhältnisse dies ohnehin angenommen werden. Somit ist der flächenmäßig hohe Anteil der Lößüberdeckung, der sich mit den Grundwasserbereichen überschneidet, durchaus als günstig zu bewerten. Für die Flugsanddecken ist eher das Gegenteil zu erwarten, denn der Flächenanteil von 60% der Gebietsabschnitte bis <10m über dem berechneten Grundwasserbereich weist die gut durchlässigen Sanddecken als oberflächennahe Grundwasserleiter aus, meist mit Unterem Keuper als Sohlschicht.

6.1.4.3 Bewertung Quellenposition

Für die Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit anhand der Quellenposition und der damit verbundenen räumlichen Lage von theoretischen Grundwasserbereichen wurde die unter Abbildung 6-17 dargestellte Zugehörigkeitsfunktion eingesetzt (vgl. Abb. 6.14, Kartenausschnitt 6). Wie eingangs erwähnt deuten die theoretischen Grundwasserbereiche gesättigte Verhältnisse und damit ungünstige Voraussetzungen für eine Ablagerung an. Mit Entfernung zu den berechneten Grundwasserbereichen nimmt die Ablagerungsfreundlichkeit zu. Die Wahl der Parameter a und b der Zugehörigkeitsfunktion richtet sich nach der vertikalen Erstreckung des gesättigten Bereichs und damit nach der lokalen Grundwassermächtigkeit. Tatsächliche Grundwassermächtigkeiten sind im lokalen Maßstab zu untersuchen. In der vorliegenden Übersichtsanalyse sind daher die eingesetzten Werte für a und b als Beispiel zu sehen. Mit den Parametern c und d kann der Verlauf der Funktion beeinflusst werden.

$$c_1 = 0,1 \quad a = -5 \quad d_1 = 4 ; \quad c_2 = 0,05 \quad b = 15 \quad d_2 = 2$$

Mit $a = -5$ erhalten alle Modelzellen, deren negative vertikale Abstände größer oder gleich 5m zum Grundwasserbereich betragen die Zugehörigkeit 1 zur Menge AF. Im vorliegenden Beispiel befinden sie sich dann ausserhalb des theoretischen Grundwasserbereich . Mit $b = 15$ gilt dasselbe für alle Modellzellen, deren positiver vertikaler Abstand zum Grundwasserbereich größer oder gleich 15m beträgt. Die Parameter c_1 und d_1 wurden so gewählt, daß bereits eine geringe Änderung des vertikalen Abstandes für den Bereich $< -2m$ eine starke Zunahme des Zugehörigkeitsgrades bewirkt. Damit wurde erreicht, daß der Bereich zwischen -2 und $0m$ bei der Bewertung sensitiver behandelt wird.

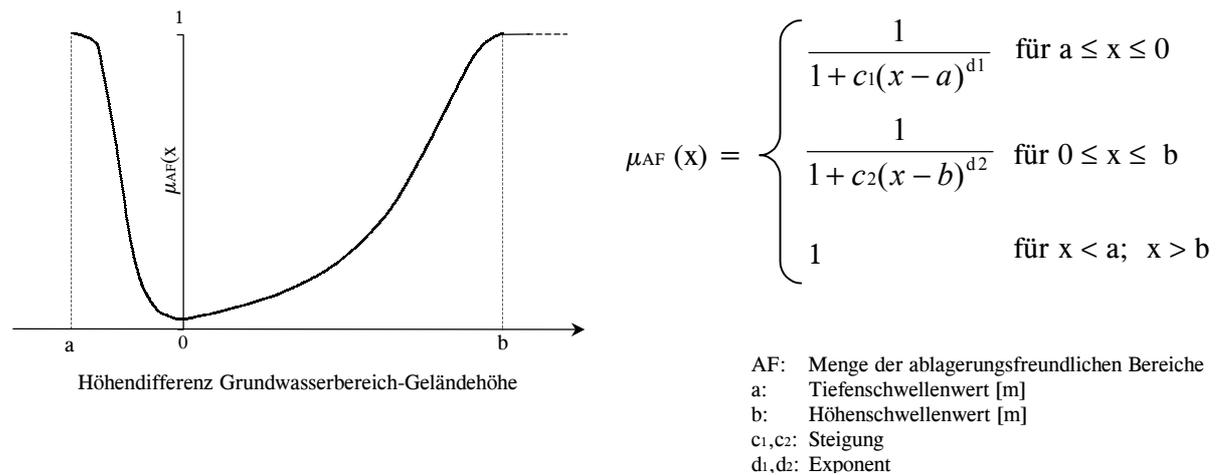


Abb. 6-17: Zugehörigkeitsfunktion Quellenposition mit Darstellung des Funktionsgraphen

Beim positiven Ast der quadratischen Zugehörigkeitsfunktion ($d_2 = 2$) liegt durch die Wahl des Parameter $c_2 = 0,05$ der sensitive Bereich bei vertikalen Abständen zwischen 0 und 6m. Bei größeren Abständen bis 10m nimmt der Zugehörigkeitgrad stärker, bis etwa 14m linear zu, so daß bereits bei einem Abstand von etwa 13m ein relativ hoher Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF erreicht wird.

Ergebnis und Teilbewertung

Bei allen Einheiten dominiert der Anteil Ablagerungsfreundlicher Flächen (Klassenbereich 0,8 – 1), gefolgt vom Klassenbereich 0 – 0,2 (entspricht in etwa dem Bereich –2m unterhalb bis 6m oberhalb des theoretischen Grundwasserbereichs), der eine geringe Ablagerungsfreundlichkeit dokumentiert (vgl. Abb. 6-14, Kartenausschnitt 6).

Für die **Kristallinareale** und den **Zechsteinausstrich** des Spessarts wirkt sich die Hangposition der Quellen, trotz einer vergleichsweise hohen Quellendichte, ebenso wie beim Muschelkalk und Buntsandstein stark reduzierend auf den Anteil der Flächen mit geringerer Ablagerungsfreundlichkeit aus. Da sich im Kristallin das Grundwasser außer auf den Klüften vor allem im Bereich der teilweise gut durchlässigen Verwitterungsdecken bewegt, ist lokal mit oberflächennahen Grundwasserbereichen zu rechnen, die dann auch die Ablagerungsfreundlichkeit mindern. Die Verwitterungsdecken erreichen i. d. Regel eine Mächtigkeit zwischen 3 und 4 Meter, in Einzelfällen bis 30m (MATTHES & OKRUSCH, 1965).

Für die Einheiten des **Muschelkalkes** und des **Buntsandsteins** (Ausnahme Oberer Buntsandstein) liegt der Anteil der Flächen, die als geringer Ablagerungsfreundlich zu sehen sind, unter 15%. Dies ist zum einen auf die relativ niedrige Quellendichte und zum anderen auf die Hangposition der Quellen zurückzuführen und bedeutet, daß der vertikale Abstand gegenüber der horizontalen Entfer-

nung zum Grundwasserbereich sehr schnell ansteigt, was folglich eine rasche Zunahme der Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung bewirkt. Oberflächennahe Grundwasserbereiche beschränken sich meist auf die Talbereiche. Da oberflächennahe Grundwässer außerhalb der Talbereiche nur lokal und räumlich sehr begrenzt auftreten, sind im Hinblick potentieller Grundwasserbereiche keine Einschränkungen für Ablagerungen im Gebiet des Muschelkalkes und Unteren- bzw. Mittleren Buntsandsteins zu erwarten. Für die Bewertung der Ablagerungseignung müssen trotz der prinzipiell mächtigen Grundwasserüberdeckung insbesondere die Durchlässigkeitsverhältnisse berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 6.1.3). Der **Obere Buntsandstein** weicht von diesem Schema ab, weil einerseits eine höhere Quelledichte vorzufinden ist und andererseits durch geringere Hangneigungen im Einzugsbereich der Quellen die vertikalen Abstände mit zunehmender Entfernung zum Grundwasserbereich weniger stark ansteigen. Potentielle Grundwasserbereiche sind im Grenzbereich Oberer Buntsandstein/Unterer Muschelkalk, Rötquarzit und im Grenzbereich Plattensandstein/Chiroterien-schiefer zu erwarten. Da wo keine Entwässerung aus dem Unteren Muschelkalk stattfindet und generell dort wo die mächtigen Unteren- und Oberen Röttonsteine austreichen sind die Bedingungen für eine Ablagerung aus Sicht der potentiellen Grundwasserbereiche geeignet. Im Austrichgebiet des Plattensandsteins sind eher Einschränkungen für eine Ablagerung zu erwarten.

Für den **Unteren- und Gipskeuper** wurde ein relativ hoher Anteil gering ablagerungsfreundlicher Bereiche ermittelt. Im Unteren Keuper ist dies auf die zahlreichen kleinräumigen Grundwasservorkommen mit geringer Überdeckung zurückzuführen. Eine Grundwasserführung beschränkt sich dort jedoch auf bestimmte grundwasserleitende, meist geringmächtige Sand- Dolomit- und Kalksteinlagen, die i. d. R. von geringdurchlässigen Schichten überdeckt werden. Daher dürften diese Grundwasserbereiche im allgemeinen keine Einschränkung für eine Ablagerung darstellen. Ausnahmen können hier im Bereich ergiebiger Vorkommen im Werksandstein und Grenzdolomit sein. Im Gipskeuper zeigen sich ähnliche Verhältnisse, wobei wasserführende Schichten seltener als im Unteren Keuper anzutreffen sind. Diese beschränken sich auf wenige und meist geringmächtige Sand- und dolomitische Mergelsteinlagen. Grundwassermächtigkeiten im Meterbereich können nur lokal im Bereich des Schilfsandsteins und verkarsteter Gips- bzw. Anhydritlager ausgebildet sein. Da sich die Grundwasserführung im Gipskeuper auf wenige Schichten beschränkt und diese von geringdurchlässigen, z. T. mächtigen Ton-, Tonmergel- und Schluffsteinlagen überdeckt werden, sind wie beim Unteren Keuper kaum Einschränkungen für Ablagerungen unter Berücksichtigung potentieller Grundwasserbereiche zu erwarten.

Die statistische Auswertung der geometrischen Analyse für den **Sandsteinkeuper** und den Austrichbereich der **Feuerletten** bzw. **Rhät-Lias-Übergangsschichten** zeigt ein ähnliches Bild wie beim Kristallin des Spessarts. Die zahlreichen räumlich begrenzten Grundwasserbereiche im Sandsteinkeuper erschweren eine einheitliche Aussage zur Ablagerungsfreundlichkeit. Die Analyse verdeut-

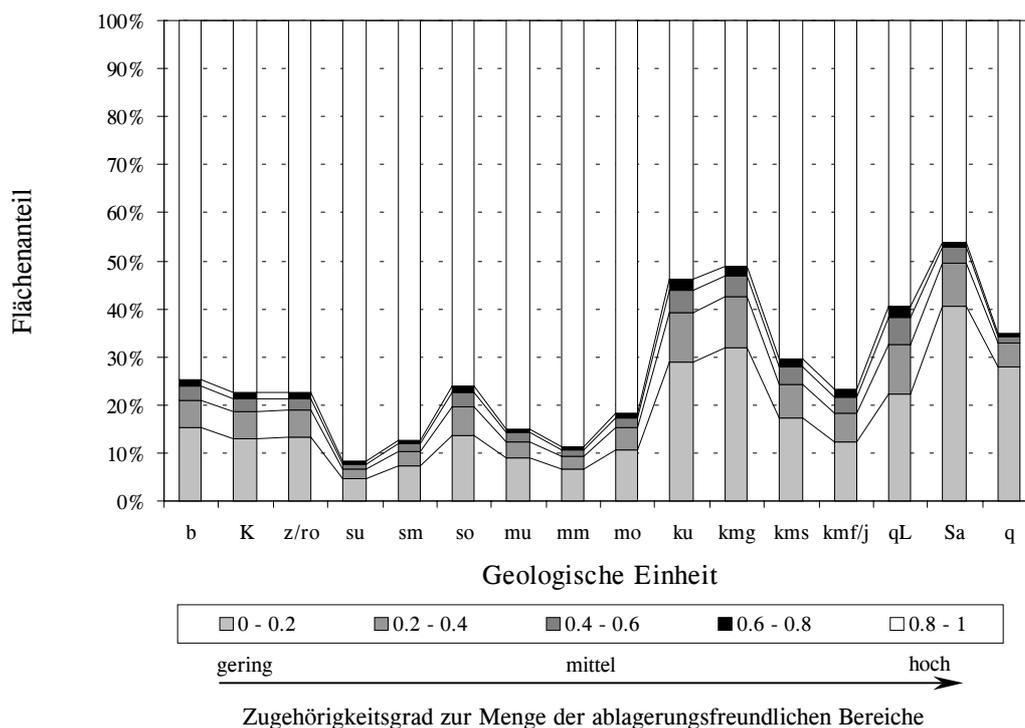


Abb. 6-18: Prozentualer Flächenanteil der Zugehörigkeitsklassen bezogen auf die geologischen Einheiten.

licht jedoch, daß meist eine mächtigere Grundwasserüberdeckung vorliegt. Oberflächennahe Grundwasserbereiche sind überwiegend an die Niederungen und Talräume gebunden. Hinsichtlich der potentiellen Grundwasserbereiche ist daher nur mit geringen Einschränkungen für eine Ablagerung zu rechnen. Im Gebiet der Feuerletten bzw. Rhät-Lias-Übergangsschichten beschränken sich die Grundwasserbereiche vor allem auf den Rhätsandstein mit den Feuerletten als Sohlenschicht. Im Bereich der Feuerletten sind aufgrund der geringen Durchlässigkeiten prinzipiell keine Einschränkungen für eine Ablagerung zu erwarten, mit Ausnahme jener Bereiche, wo der Rhätsandstein oberflächennah in das Gebiet der Feuerletten entwässert. Im Bereich des Rhätsandsteins können generell ungünstige Ablagerungsbedingungen erwartet werden. Im Unteren Lias sind nur vereinzelt und meist sehr geringmächtige Sandsteine (Arietensandstein) und Kalkmergelsteine wasserführend. Sie bilden zusammen mit geringdurchlässigen Tonmergel- und Schluffsteinen die Überdeckung des Rhätsandsteins. Bei ausreichender Mächtigkeit (Abstand zum Rhätsandstein) sind im Gebiet des Unteren Lias die Voraussetzungen für eine Ablagerung aus Sicht der potentiellen Grundwasserbereiche günstig.

6.1.5 Tiefenbereiche

Die Grenzen des Tiefenbereiches werden per Definition durch eine konkave Hangunstetigkeit vorgegeben (vgl. Abb. 6-19). Die Krümmung (konvexe, konkave und flache Oberflächenformen) kann innerhalb eines Rastermodells berechnet werden. Im Prinzip wird für jede Zelle über eine Nachbarschaftsabfrage ein Wert berechnet, der angibt, ob sich das Gelände von der Zelle aufwärts gesehen konvex (flacher werdend) oder konkav (steiler werdend) entwickelt oder flach bleibt. Führt man

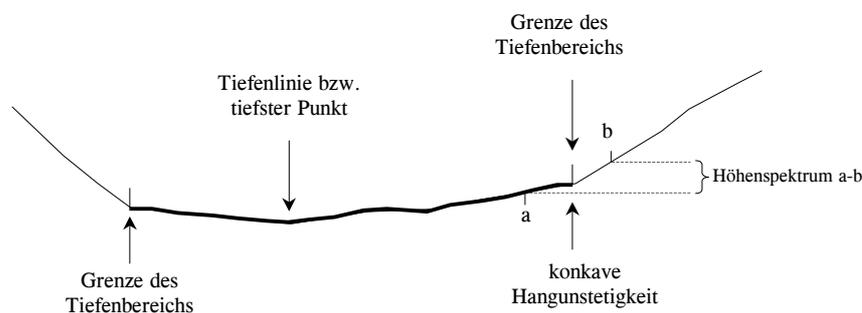


Abb. 6-19: Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 1994) wird derjenige Bereich als Tiefenbereich bezeichnet, dessen Neigungsstärke nicht größer als das Doppelte des Längsgefälles der Tiefenlinie ist. Die Obergrenze des Tiefenbereiches liegt auf der am weitesten zu verfolgenden konkaven Neigungsunstetigkeit innerhalb des Höhenspektrums a-b über der Tiefenlinie. Die Größe von a und b richtet sich nach dem Landschaftstyp (z. B. Bergland, Hügelland $a=1$, $b=5$; Tiefland $a=0,2$, $b=1$).

diese Analyse für den gesamten Untersuchungsraum durch, müssen für die Generierung der Tiefenbereiche alle konkaven Unstetigkeiten herausgefiltert werden. Man muß sich also für einen Wertebereich entscheiden, der diese Unstetigkeiten repräsentiert. Wie aus der Erläuterung zur Abbildung 6-19 hervorgeht, sind die konkaven Hangunstetigkeiten immer im Zusammenhang mit dem Landschaftstyp zu sehen. So ergeben sich für jeden Landschaftstyp (z.B. Hügel- und Tiefland) unterschiedliche Wertebereiche für die Festlegung der konkaven Hangunstetigkeit. Die Wahl eines Wertebereichs, der alle Unstetigkeiten erfaßt, erweitert bei dieser Form der automatischen Erfassung den Tiefenbereich um (Gebiete) Zellen, die im eigentlichen Sinne nicht dazu gehören.

Zur Erfassung der Tiefenbereiche in Unterfranken wurde eine Vereinfachung angestrebt. Als Tiefenbereiche werden jene Flächen (Zellen) definiert, die sich in einem bestimmten vertikalen Abstand zur nächsten Tiefenlinie einer Niederung befinden. Die Tiefenlinien werden direkt aus dem Höhenmodell ermittelt und stellen im weiteren Sinne das Dränsystem des Untersuchungsraumes dar. Die halbautomatische Generierung der Tiefenlinien erfolgt über die AVENUE-Anweisungen *FlowDirection* und *FlowAccumulation*. Über das Zusammenspiel der beiden Anweisungen siehe Abschnitt

6.1.4. Das *FlowAccumulation-Grid* repräsentiert für jede Zelle einen Wert, der die Anzahl der sie umgebenden Zellen angibt, die einen Fluß in die Prozeßzelle erzeugen. Zellen mit dem Wert 0 erhalten keinen Zufluß und charakterisieren deshalb lokale Kulminationspunkte bzw. -linien. Sie werden zur Berechnung oberirdischer Wasserscheiden herangezogen. Je höher nun der Wert einer Zelle

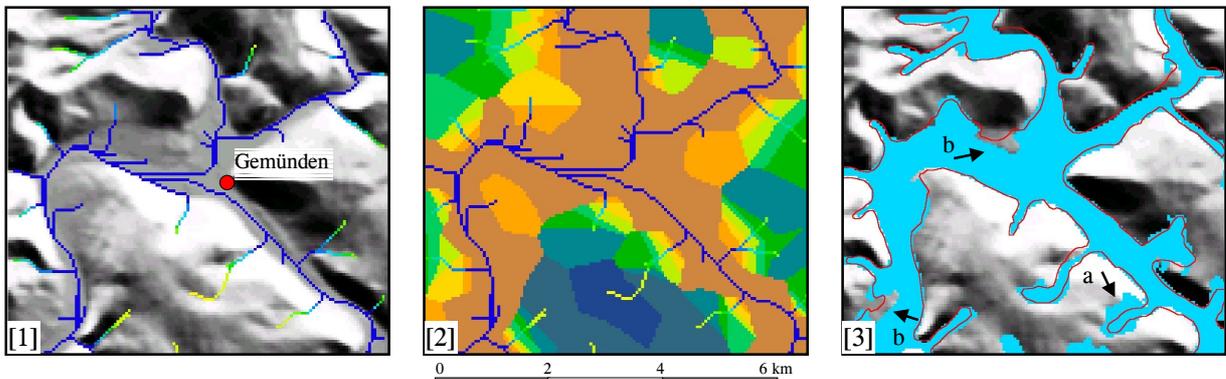


Abb. 6-20: Der Ausschnitt zeigt die Saalemündung in den Main bei Gemünden. Karte 1 gibt das aus dem DGM berechnete Fluß- bzw. Drännetz als lineares Rasterbild wieder; die Zellen sind entsprechend ihrer Höhenlage über NN von blau (tief) nach gelb (hoch) eingefärbt. In Karte 2 werden alle Zellen, die keinen Wert enthalten (diejenigen außerhalb des Drännetzes), der nächstliegenden Zelle im Drännetz – berechnet über die Euklidische Distanz – zugeordnet. So entstehen Flächen mit unterschiedlichen Höhen, die der lateralen Ausdehnung der Tiefenlinien entsprechen. Der Karte 3 liegt eine arithmetische Verschneidung der Karte 2 mit dem DGM zu Grunde. An ihrem Beispiel wurden alle Werte, die kleiner oder gleich 10m sind, als 1 klassifiziert, alle anderen als Nullwert. So ergibt sich ein theoretischer Tiefenbereich (blau), der alle Zellen umfaßt, die einen vertikalen Abstand zur nächsten Tiefenlinie von 10m besitzen. Karte 3 wurde bereits durch Anwendung verschiedener Filteroperationen (Glätten; Eliminieren von Flächen bzw. Inseln definierter Größe) bereinigt, denn besonders bei weitständigen Talachsen werden auch Bereiche erfaßt, die zwar von ihrer Höhenlage in den Wertebereich fallen, aber außerhalb irgendeines Tal- bzw. Tiefenbereiches liegen. Aus diesem Grund wurden nur diejenigen Zellen als Tiefenbereiche ausgewiesen, die alle miteinander in Kontakt stehen, sogenannte Inseleffekte wurden herausgefiltert und eliminiert. Zur Kontrolle wurden die Tiefenbereiche per Hand – basierend auf dem DGM als Raster und Kontourlinien – für den obigen Abschnitt digitalisiert (Rote Linie in Karte 3). Wie bei Position a wurde auch anderswo beobachtet, daß in kleineren Seitentälern ein größerer als der reale Tiefenbereich durch die angewandte Methode ausgewiesen wird. Anders bei den Positionen b, dort wurden die Tiefenbereiche (hier gegliedert durch Terrassen) durch die halbautomatische Methode wesentlich besser erfaßt als per Hand. Betrachtet man den obigen Maßstab im Vergleich zur Größe des gesamten Untersuchungsraumes sowie mögliche Fehlerquellen (z. B. Rasterauflösung), können derartige Abweichungen und Ungenauigkeiten maßstabsbedingt und im Rahmen qualitativer Aussagen toleriert werden.

im Akkumulationsgrid, desto größer ist der theoretische Zufluß. Folglich beschreiben die Zellen mit hohen Werten die Tiefenlinien innerhalb eines Einzugsgebietes, der höchste den Torpunkt. Über die Definition eines Schwellenwertes, der den minimalen Zufluß in eine einzelne Zelle angibt, können nun die Tiefenlinien als lineare Bestandteile des Grids herausgefiltert werden. Dies geschieht beispielsweise mit der einfachen Anweisung

$$[\text{DRAIN_NET}] = ([\text{FLOWACCUMULATION}] < 100.\text{AsGrid}).\text{SetNull}(1.\text{AsGrid}),$$

wobei jeder Zelle, die einen Akkumulationswert > 100 besitzt eine 1 zugeordnet wird und allen anderen ein Nullwert (Leere Zelle). Die Weiterverarbeitung der Tiefenlinien erfolgt auf Rasterbasis; für Darstellungszwecke oder vektororientierte Analysen kann das Ergebnisgrid einfach in ein Linienvektorthema konvertiert werden.

Das lineare Netzwerk der Tiefenlinien wird mit dem Höhenmodell verschnitten, so daß jeder Zelle, die ein Element des linearen Netzwerkes darstellt (nach Anwendung obiger Avenueanweisung alle Zellen mit dem Wert 1), ein Höhenwert zugeordnet wird (vgl. Abb. 6-20, Kartenausschnitt 1). Alle Zellen außerhalb des Netzwerkes werden nun den Zellen des Netzwerkes zugeordnet, denen sie als Euklidische Distanz am nächsten stehen (vgl. Abb. 6-20, Kartenausschnitt 2). Die weitere Vorgehensweise erfolgt gemäß der Unterschrift der Abbildung 6-20.

6.1.5.1 Position im Einzugsgebiet und morphologischer Aspekt

Bei der Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit spielen auch die Position und morphologische Ausprägung einer Modellzelle, die innerhalb des definierten Tiefenbereichs liegt, eine wesentliche Rolle. Zur Ermittlung dieser Eigenschaften einer einzelnen Zelle wird das Grid des Tiefenbereichs [Tb] (Abb. 6-22, Kartenausschnitt 2) in verschiedener Weise eingesetzt.

- **Morphologische Ausprägung:** Zur Ermittlung der morphologischen Ausprägung einer Zelle wurde nach dem unter Abschnitt 6.1.2 dargestellten Algorithmus zur Berechnung der Hangneigung verfahren. Durch die arithmetische Verschneidung des Grids [Tb] mit dem Grid [Hn] ergibt sich für jede Zelle innerhalb des Tiefenbereichs ein aus der Analyse der Nachbarzellen resultierender Hangneigungswert (Grid [Hn_Tb]).
- **Position im Einzugsgebiet:** Die Höhendifferenz eines beliebigen Punktes im Tiefenbereich zum tiefsten Punkt bzw. Torpunkt des zugehörigen Einzugsgebiet gibt dessen Lage bezüglich einer möglichen Akkumulation an. Je weiter der Punkt vom Torpunkt entfernt ist, desto niedriger ist das Akkumulationsrisiko am Punkt selber. Betrachtet man nun, wie in Abbildung 6-21 dargestellt, die Höhe eines Punktes im Bezug zur Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Punkt, so ergibt sich für jeden Punkt ein vertikaler Abstandsfaktor (Abb. 6-21) zwischen 0 und 1, wobei 0 dem Torpunkt und 1 dem höchsten Punkt des Drännetzes entspricht.

Zur Ermittlung der vertikalen Abstandsfaktoren entlang des bereits weiter oben und unter Abbildung 6-20 erläuterten Drännetzes mit Höhenbezug, muß jede Zelle gemäß des zugehörigen Einzugsgebietes mit dem entsprechenden Differenzwert zwischen höchstem und niedrigstem Punkt verknüpft werden. Dies geschieht, indem man das Polygonthema der Einzugsgebiete mit dem Grid des Drännetzes [DRAIN_NET] über die Anweisung *SummarizeZones* verschneidet, bei

Wahl der Einzugsgebiets-Id und der Zusammenfassungsfunktionen Minimum und Maximum. So erhält man eine Tabelle, die für jeden Datensatz (Summe der Datensätze entspricht Summe der Einzugsgebiete) die Einzugsgebiets-Id sowie die niedrigste und höchste Höhe des Drainagenetzes enthält. Der Tabelle wird ein neues Feld [EZG_DELTA] hinzugefügt, das anschließend anhand der Differenz zwischen niedrigstem [DRAIN_MIN] und höchstem [DRAIN_MAX] Höhenwert des Drainagenetzes berechnet wird. Das Polygonthema wird über die gemeinsame ID mit der

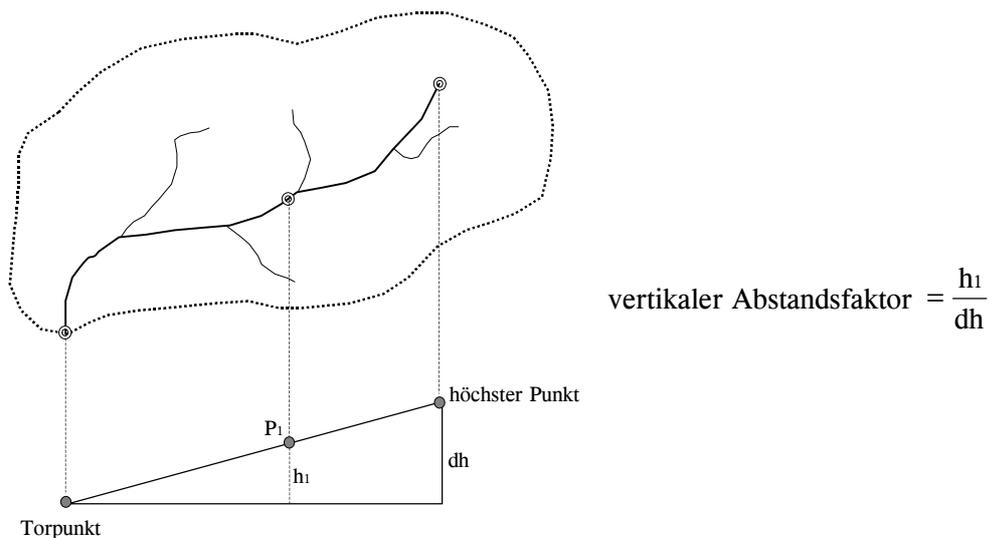


Abb. 6-21: Relative Höhenlage einer beliebigen Zelle im Bezug zum niedrigsten (Torpunkt) und höchst gelegenen Punkt des Drännetzes innerhalb eines Einzugsgebietes. Die Berechnung eines vertikalen Abstands faktors erfolgt nach der angegebenen Gleichung.

Tabelle verbunden und in ein Grid [DRAIN_EZG] mit Beibehaltung aller Attribute konvertiert. Das Grid der vertikalen Abstands faktoren [V_AB] kann nun mit der folgenden AVENUE-Anweisung berechnet werden:

$$[V_AB] = ([DRAIN_NET].FLOAT - [DRAIN_EZG_MIN].FLOAT) / [DRAIN_EZG_DELTA]$$

Das gesamte Wertespektrum wird in 5 Klassen (Zonen) aufgeteilt, wobei 1 hohes und 5 niedriges Akkumulationsrisiko innerhalb des Einzugsgebietes bedeutet.

0 - 0,2	→ 1
0,2 - 0,4	→ 2
0,4 - 0,6	→ 3
0,6 - 0,8	→ 4
0,8 - 0,9	→ 5

Da sich die Zonen nur auf das Drännetz beziehen, wird anhand der Euklidischen Distanzen ein Flächengrid [ZONE_EZG] erzeugt, dessen Flächen jeweils die Klassen- bzw. Zonenziffer als Wert erhalten. Die Verschneidung des Grids [ZONE_EZG] mit dem Grid [Tb] ergibt ein Grid [ZONE_EZG_Tb] mit den vertikalen Abstandszonen 1 – 5, bezogen auf die Tiefenbereiche innerhalb eines Einzugsgebietes.

6.1.5.2 Bewertung Tiefenbereiche

Zur Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit anhand der Tiefenbereiche werden die Grids [Tb], [HN_Tb] und [Zone_EZG_Tb] bewertet, wobei letztere als Gewichtungsmatrizen fungieren.

Das **Grid [Tb]** enthält für alle Zellen innerhalb des Tiefenbereichs den vertikalen Abstand zur nächst liegenden Tiefenlinie. Geht man von der Annahme aus, daß jede Tiefenlinie eine bevorzugte Drainage für Zwischen- und oberirdische Abflüsse darstellt, so ist bei abnehmendem vertikalen Abstand der Zellen zur nächst gelegenen Tiefenlinie mit einem erhöhten oberflächennahen Wasserumsatz zu rechnen. Bei Gewässern mit entsprechend hohen jährlichen Abflüssen und vergleichsweise geringem Gefälle (z. B. Main) dokumentieren diese Bereiche, bis zu einem gewissen vertikalen Differenzbetrag, die Hochwasserstände und damit die Überflutungsflächen. Die Zuordnung von Zugehörigkeitsgraden zu den einzelnen Zellen erfolgt über die in Abbildung 6.22 eingesetzte lineare Zugehörigkeitsfunktion. Es wird ein maximaler Hochwasserstand von 6m (Parameter b) über Normalwasserstand als Beispiel für den gesamten Untersuchungsraum angenommen. In dem resultierenden Grid [fuzTb] (vgl. Abb. 6-22, Kartenausschnitt 5) erhalten die Zellen, die einen vertikalen Abstand von größer oder gleich 6m zur nächsten Tiefenlinie besitzen, den Zugehörigkeitsgrad 1, Zellen die auf gleicher Höhe wie die Tiefenlinie liegen, den Zugehörigkeitsgrad 0 zur Menge AF. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß es sich bei dieser Form der Beurteilung natürlich um eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse handelt, denn gerade bei der Festlegung von möglichen Überflutungsflächen bzw. Hochwasserständen und ebenso möglichem Grundwasserüberstau ist nicht die Tiefenlinie eines Gewässers, sondern wie bereits angedeutet, der Normalwasserstand zu betrachten sowie regionale Grundwasserstände. Weiterhin müssen bei einer vergleichsweise exakten Bewertung weitere Informationen wie z. B. Gewässer oder Trockental, Kenndaten über die Einzugsgebiete, regionale Besonderheiten (z. B. Klima) und vieles mehr berücksichtigt werden. Dies alles erfordert allerdings ebenso ein hoch aufgelöstes Höhenmodell sowie spezielle, über Zeitreihen ermittelte Kenndaten zu den einzelnen Gewässern.

Über das **Grid [Hn_Tb]** werden insbesondere jene Zonen innerhalb der Tiefenbereiche kritischer beurteilt, die eine besonders flache Morphologie besitzen und daher - bezüglich ihrer Abflußeigenschaften - zur Akkumulation neigen. Diesem Umstand wurde mehr oder weniger schon unter Abschnitt 6.1.2 Rechnung getragen. Das Grid [Hn_Tb] wurde hierzu über den gesamten Wertebereich

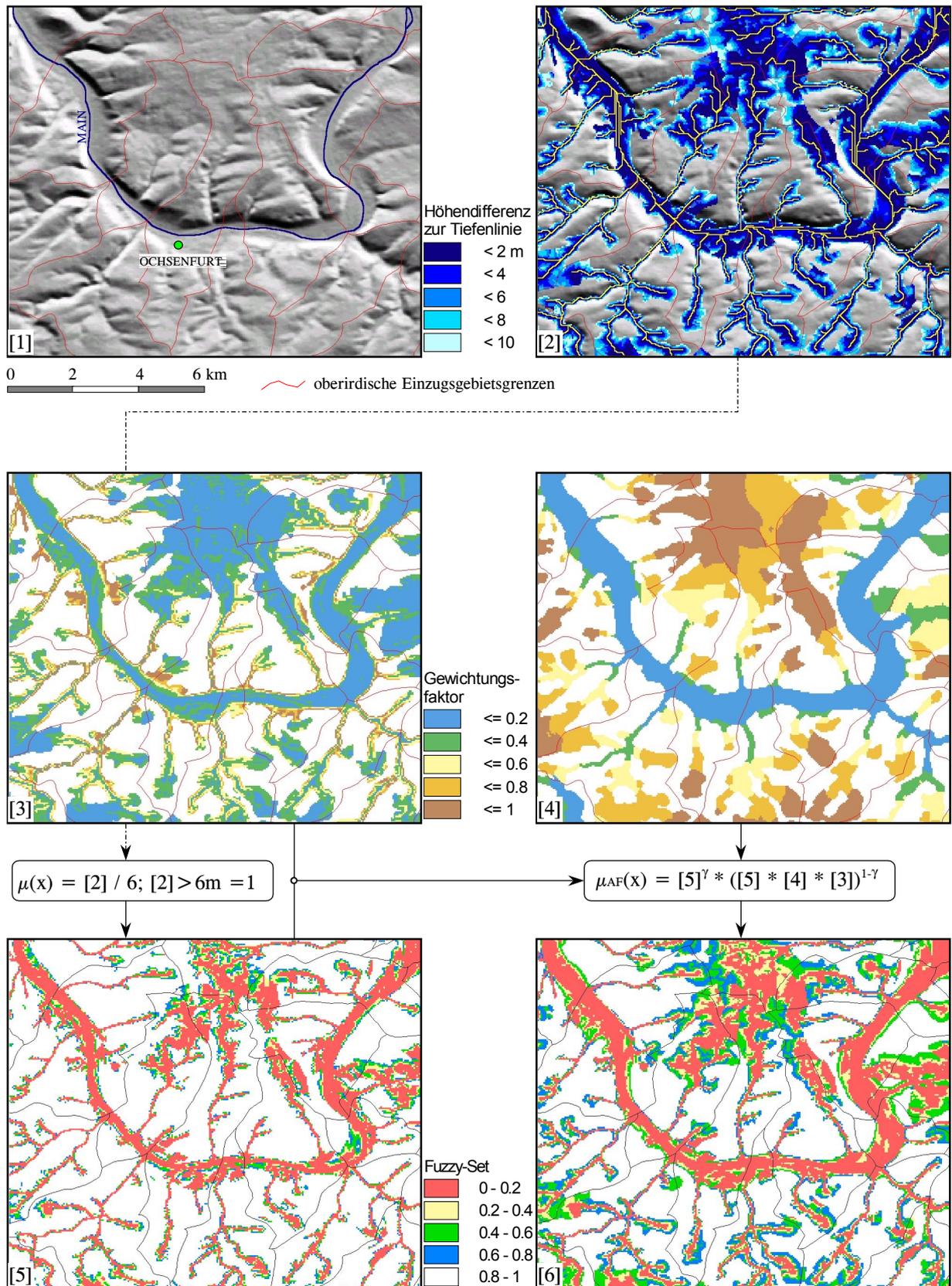


Abb. 6-22: Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit anhand der Tiefenbereiche am Beispiel des südlichen Maindreiecks. Als Ausgangsgrid der Bewertung dienen die Tiefenbereiche, definiert durch alle Zellen mit maximalen vertikalen Abständen zur nächst gelegenen Tiefenlinie von 10 m (Karte 1). Als Gewichtungsgrids werden einerseits eine von der Hangneigung (Karte 3) und andererseits eine von der Position innerhalb des Einzugsgebietes (Karte 4) abhängige Matrix herangezogen. Karte 5 und 6 repräsentieren die Zugehörigkeitsgrade zur Menge AF, berechnet nach den angegebenen Gleichungen. Die Legenden gelten jeweils für die Karte links und rechts, mit Ausnahme der Karte 1, die als Übersicht hinzugenommen wurde. Weiteres siehe Text.

in 10 Stufen von 0,1- 1 aufgeteilt, wobei die lineare Zuordnung der Hangneigungen zu den einzelnen Stufen gemäß der Tabelle 6-3 durchgeführt wurde.

Mit Hilfe des Grids [Zone_EZG_Tb] wird eine Gewichtungsmatrix erstellt, die den Tiefenbereich im Hinblick auf seine Position im zugehörigen Einzugsgebiet bewertet. Je näher sich ein Abschnitt des Tiefenbereichs zum tiefsten Punkt des Einzugsgebietes befindet, desto kritischer wird er bezüglich seiner Ablagerungsfreundlichkeit eingestuft. Die Gewichtung der einzelnen Zonen erfolgt ähnlich wie beim Grid [Hn_Tb] linear durch Zuordnung von Gewichtungsfaktoren zwischen 0 und 1 (vgl. Tab. 6-4).

Tab. 6-3: Gewichtung der Hangneigung

Hangneigung [°]	Gewichtung
0 - 1	0,1
1 - 2	0,2
2 - 3	0,3
3 - 4	0,4
4 - 5	0,5
5 - 6	0,6
6 - 7	0,7
7 - 8	0,8
8 - 9	0,9
>9	1

Tab. 6-4: Gewichtung der Einzugsgebietszonen

Zone	Gewichtung
1	0,2
2	0,4
3	0,6
4	0,8
5	1

Die Zusammenführung der Bewertungsmatrizen wird mit der bei Kombination von Fuzzy-Sets bekannten Gamma-Operation nach ZIMMERMAN & ZYSNO (1980) in veränderter Form durchgeführt. Dabei dienen die beiden aus dem Grid [HN_Tb] und [Zone_EZG_Tb] gewonnenen Rasterdatensätze [HN_Tb_EVAL] und [Zone_EZG_Tb_EVAL] als Gewichtungsmatrizen. Die Gamma-Operation wird dann wie folgt definiert:

$$[\mathbf{fuzTb}] = [\mathbf{fuzTb}]^\gamma * ([\mathbf{fuzTb}] * [\mathbf{Hn_Tb_EVAL}] * [\mathbf{Zone_EZG_Tb_EVAL}])^{1-\gamma}$$

Die Darstellung der Abbildung 9-19 zeigt, daß das Grid [fuzTb] den maximal möglichen Wert bestimmt. Ebenso kann aufgrund der Zuordnungen der Tabellen 6-3 und 6-4 der Operationswert nur dann 0 erreichen, wenn [fuzTb] 0 ist. Der Einfluß der Gewichtungsgrids wird durch den Wert Gamma bestimmt. Je höher Gamma, desto geringer ist der Einfluß der beiden Gewichtungsmatrizen. Das Diagramm der Abbildung 6-23 zeigt das mögliche Wertespektrum von [fuzTb] (vgl. Abb. 6-22, Kartenausschnitt 6) bei verschiedenen Gamma-Werten. In dieser Untersuchung wurde für Gamma 0,7 eingesetzt.

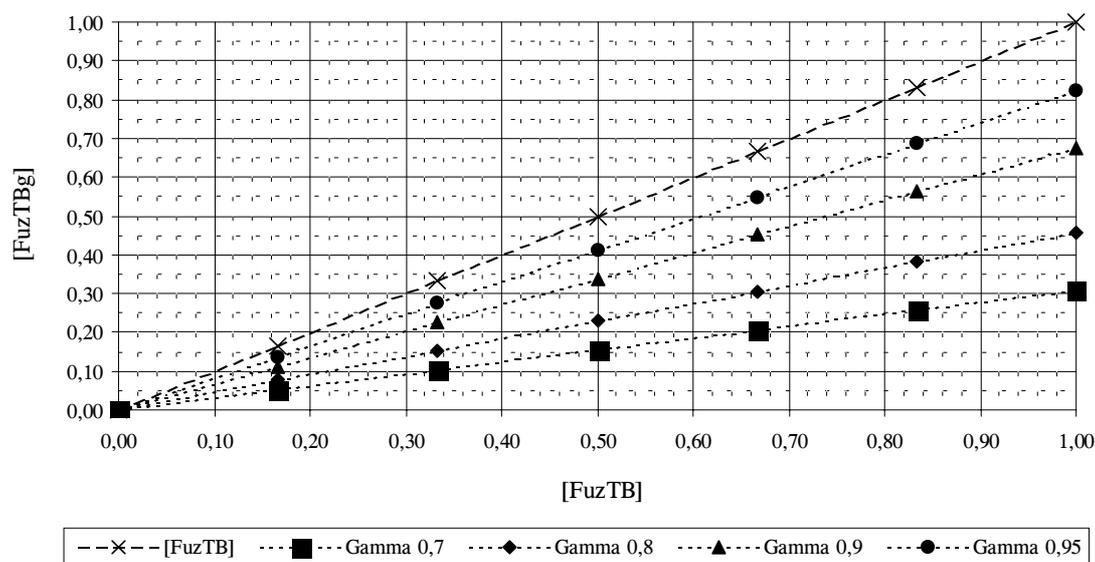


Abb. 6-23: Anwendung der Gamma-Operation mit Darstellung möglicher Wertespektren durch Wahl unterschiedlicher Gamma-Werte. Die Geraden markieren jeweils die minimalen Funktionswerte (minimale Gewichtungsfaktoren).

Ergebnis

Bezieht man die nach obiger Berechnung ermittelten Zugehörigkeitsbereiche flächenmäßig auf die Verbreitung der einzelnen Grundwasserlandschaften (vgl. Abb. 6-24), so fällt insbesondere der mit etwa 60% hohe Anteil gering ablagerungsfreundlicher Zellen innerhalb des Aschaffener-Beckens auf. Nur 20% der Fläche entfallen auf Gebiete, die nach Beurteilung der Tiefenbereiche als ablagerungsfreundlich ausgewiesen wurden. Der Grund hierfür liegt naturgemäß in der hydrologischen Position und morphologisch flachen Ausprägung des Beckens. Dadurch erreichen die Einflusssbereiche der berechneten Tiefenlinien nach dem vorgestellten Bewertungsverfahren eine wesentlich größere Ausdehnung als in Landschaften mit tief eingeschnittenen Tälern, wie z. B. im Buntsandsteinspessart (Odenwald) und in der Rhön, für die insgesamt nur 25% aller Flächen als bedingt bis gering ablagerungsfreundlich eingestuft wurden. Gleiches gilt auch für den Kristallinen Vorspessart sowie für den unterfränkischen Teil des Sandsteinkeuperlandes, wobei bei beiden - aufgrund der höheren Taldichten - ein etwas höherer Flächenanteil kritischer bewertet wird als im Buntsandsteinspessart (Odenwald) und der Rhön. Für den vergleichsweise hohen Flächenanteil bedingt bis gering ablagerungsfreundlicher Zellen innerhalb der Grundwasserlandschaften Fränkische Platten und Fränkisches Gipskeuperland, sind vor allem die ausgedehnten Gäuflächen und die Verbungen zwischen Maindreieck und Keuperlandstufe verantwortlich und abschnittsweise ebenso die hohen Taldichten. Ähnlich wie beim Aschaffener-Becken dehnt sich der

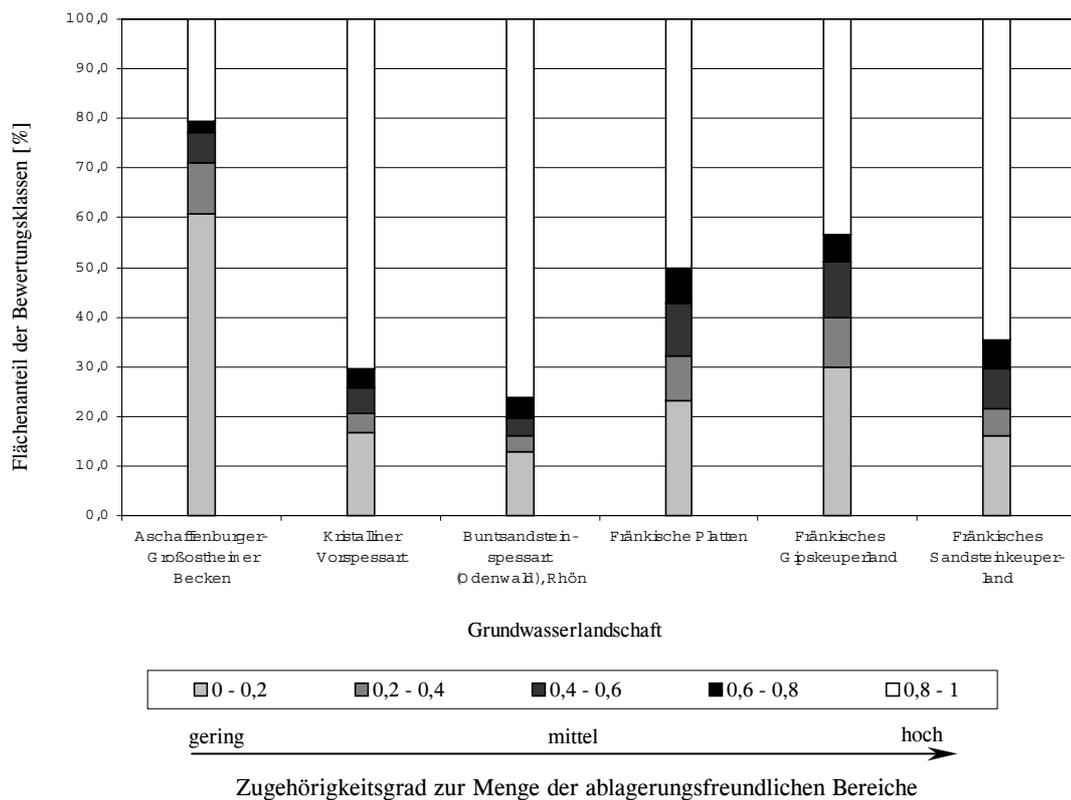


Abb. 6-24: Prozentualer Flächenanteil der Klassen *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF* bezogen auf die Grundwasserlandschaften Unterfrankens.

Einflußbereich der Tiefenlinien aufgrund der flachen morphologischen Elemente sehr stark aus. Dies wird z. B. im Schweinfurter Becken und auf den vorwiegend von Unterem Keuper und Löß bedeckten Hochflächen des südlichen Maindreiecks (vgl. Abb. 6-22, Kartenausschnitt 2) deutlich. Für die Keuperausstriche sind nach dem Wasserwirtschaftlichen Rahmenplan Main (BAYGLA, 1993) die weniger eingetieften und im allgemeinen ausladenden Tiefenbereiche die Folge der weichen Gesteine (Ton- Mergelsteine), die dort vermehrt am Gebirgsaufbau beteiligt sind. Insgesamt wird für die beiden zuletzt genannten Grundwasserlandschaften auch die höhere Taldichte einen gewissen Einfluß auf die Verbreitung und Bewertung der Tiefenbereiche ausüben.

6.2 Hydrogeochemische Faktoren

6.2.1 Übersicht

Informationen zur Hydrogeochemie in Unterfranken finden sich bei Arbeiten von UDLUFT (1969), GEORGOTAS (1972), MÄRZ (1977), PLÖTHNER (1979), BITTERSÖHL (1980) für den Raum nördlich der Fränkischen Saale, für die Region der Mainfränkischen Platten bei RAJAB (1975), SCHMITT (1982) und STAMATIS (1986). Darüber hinaus enthalten die Arbeiten von UDLUFT (1978a), GATTENLÖHNER (1996), UDLUFT & GATTENLÖHNER (1999) sowie das Mainprojekt des BAYLFW (1978), der wasserwirtschaftliche Rahmenplan Main (Teil Hydrogeologie) des BAYGLA (1993) und schließlich das Raumordnungsverfahren Trinkwasserversorgung Unterfranken der REGIERUNG V. UNTERFRANKEN (1982) zusammenfassende Aussagen über das hydro(-geo)chemische Verhalten der grundwasserführenden Schichten Unterfrankens. Überregional – d. h. aus einer gesamtdeutschen Betrachtung heraus – sind an dieser Stelle auch die Arbeit von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) über die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen und der Hydrologische Atlas der BRD, herausgegeben von HAAR, KELLER, LIEBSCHER, RICHTER UND SCHIRMER (1979), zu nennen.

Alle aufgeführten Arbeiten widmen sich - aus hydrogeochemischer Sicht - im wesentlichen der Charakterisierung verschiedener Grundwässer (Hauptinhaltsstoffe) im Kontext ihrer geologischen Herkunft und anthropogenen Einflüsse.

Das Teilziel dieser Arbeit lautet jedoch nicht, die Grundwässer nach herkömmlichem Muster anhand alter und neuer Daten zu reklassifizieren, sondern Rückschlüsse auf das hydrogeochemische Milieu in den oberflächennahen Schichten zu ziehen, also in den Bereichen, in denen theoretisch eine Ablagerung von MV-Schlacke erfolgen kann.

6.2.2 Regionalisierung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der DFG (1992) wurde ausführlich das Problem der Regionalisierung in der Hydrologie behandelt. Die dortigen Aussagen können ebenso auf die Hydrogeologie bzw. Geologie übertragen und damit für die vorliegende hydrogeochemische Regionalisierung genutzt werden. Im Sinne von KLEEBERG & CEMUS (1992) schließt die folgende Regionalisierung in erster Linie eine Übertragung von Punktinformationen innerhalb eines Gebietes auf die Fläche ein. Da bei der genutzten Punktinformation mit der Tiefenlage eine zusätzliche Dimension hinzukommt, ist die konventionelle Methode der einfachen Flächeninterpolation, wie viele andere auch, nur einge-

schränkt. Vielmehr muß eine auf die Fläche bezogene, unabhängige Größe herangezogen werden, die gleichfalls eine Ausweisung (quasi-)homogener Teilgebiete ermöglicht. Für den Untersuchungsraum eignen sich beispielsweise die Geologie als unabhängige und die hydrogeochemischen Faktoren als abhängige Größen. Dabei wird vorausgesetzt, daß die hydrogeochemischen Faktoren gebiets- und nicht ereignisabhängig sind. Ereignisabhängigkeit ergibt sich nach KLEEBERG & CEMUS (1992) z. B. durch die Berücksichtigung der zeitlichen Dimension. Obwohl bei den geochemischen und mehr noch bei den hydrochemischen Faktoren die Zeit (z. B. saisonale Schwankungen im Lösungsinhalt der Grundwässer) eine gewisse Rolle spielen kann, wird diese jedoch aufgrund unzureichender Daten nicht berücksichtigt.

Für das Main Einzugsgebiet wurde im Rahmen des Mainprojektes eine hydrochemische Regionalisierung oberflächennaher Grundwässer und Oberflächenwässer von UDLUFT (1978b) durchgeführt. Grundlage war neben der punktuellen hydrochemischen Information (Grundwasseranalysen) der geologische Bezug. Unter Berücksichtigung der Hauptinhaltsstoffe wurden Gruppen gebildet und bezogen auf die Verbreitung der geologischen Einheiten in (quasi-)homogene Flächen diskretisiert (vgl. Abb. 6-31). Diese Vorgehensweise eignet sich für die vorliegende Arbeit nur bedingt, da die Regionalisierung sehr stark auf die Grundwässer selbst (Beschaffenheit, Verbreitung) und nicht auf die hydrogeochemischen Eigenschaften der oberflächennahen Schichten eingeht. Wie bereits angedeutet, wird sich die flächenhafte Darstellung der hydrogeochemischen Millieufaktoren existentiell an der Geologie und der Ausbildung vorhandener Deckschichten (z. B. nach BRUNNACKER, 1978; vgl. Abb. 6-25) orientieren.

6.2.3 Carbonatanteil

In Kapitel 4 wurde die Bedeutung der geochemischen Eigenschaften des geologischen Untergrundes für die Standortbewertung erläutert. Es ist davon auszugehen, daß bei Anwesenheit carbonatischer Materialien in den Deckschichten ein günstiges Ablagerungsmilieu zu erwarten ist, da sich auf Grund der Puffermechanismen i. d. R. ein neutral bis leicht alkalischer pH-Wert im Sickerwasser einstellen wird. Die langfristige Stabilität dieser Bedingungen wird letztendlich vom wirksamen Austrag der carbonatischen Spezies aus dem Ablagerungssystem und vor allem vom Gesamtcarbonatgehalt der vorhandenen, natürlichen Gesteinsmaterialien bestimmt. Zur Abschätzung und Regionalisierung der Carbonatgehalte wurden die geologischen Flächen der GUK 1:500.000 als (quasi-)homogene Gesteinseinheiten eingesetzt. Als Anhaltspunkt diente hierbei die Darstellung nach LEHMANN (1990). Dort wurde das Puffervermögen der anstehenden Gesteine nach ihrem Carbonatgehalt beurteilt. Übertragen auf die Gesteinseinheiten Unterfrankens können nach dieser Darstellung die folgenden Stufen unterschieden werden:

carbonatfrei bis -arm:	Kristallin (Gneiss, Glimmerschiefer) Unterer- und Mittlerer Buntsandstein (Sandstein, Tonstein) Sandsteinkeuper (Sandstein, Tonstein) Tertiär - Basaltische Gesteine (Vulkanite der Rhön)
carbonathaltig:	Oberer Buntsandstein (Tonsteine, Sandsteine, Tonmergelsteine, Dolomite) Unterer Keuper (Tonmergelsteine, Tonsteine, Dolomite, Sandsteine) Gipskeuper (Tonmergelsteine, Tonsteine, Sulfatgesteine, Dolomite, Sandsteine) Feuerletten/Lias (Tonsteine, Mergelsteine, Sandsteine, Dolomite) Quartär (Loess, Flugsand, Flußschotter, Talauen)
carbonatreich:	Zechstein (Dolomit, Tonmergelstein, Tonstein) Muschelkalk (Kalkstein, Tonmergelstein, Tonstein)

Zusätzlich wurden mittlere Carbonatgehalte der geologischen Einheiten aus der Literatur und aus chemischen Analysen des Lehr- und Forschungsbereichs Hydrogeologie und Umwelt der Universität Würzburg als Vergleich und zur Abstimmung herangezogen (vgl. Tab. 6-5). Es wurden auch die im Rahmen der Bodenuntersuchungen des BAYGLA (überwiegend in den Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000) durchgeführten Analysen berücksichtigt, wobei jeweils nur diejenigen Beachtung fanden, die im Bodenprofil dem als Verwitterungshorizont bzw. Ausgangsmaterial bezeichneten Schichthorizont entsprachen. Bei fehlenden Carbonatgehaltsangaben (deutet meist, jedoch nicht ausschließlich auf carbonatfreies Gestein hin) wurde der maximale pH-Wert angegeben. Aufgrund der wirksamen Puffermechanismen ist davon auszugehen, daß vorwiegend sauer reagierende Bodenlösungen bis etwa zu einem pH-Wert < 5 auf carbonatfreie bis carbonatarne Deckschichten schließen lassen. Da bei der pH-Wert Messung einer Bodensuspension in einer KCl-Lösung geringere Werte erwartet werden können als in einer CaCl₂-Lösung, wurden die in KCl-Lösungen gemessenen pH-Werte durch entsprechende Zuschläge nach MARTIN et al. (1991) standardisiert.

Die Regionalisierung des Untersuchungsraumes anhand mittlerer Carbonatgehalte gestaltet sich aufgrund des Datenmangels prinzipiell sehr schwierig. Insbesondere jene Gebiete mit raschem Gesteins- bzw. Fazieswechsel - sowohl in ihrer vertikalen als auch horizontalen Erstreckung - machen diese Schwierigkeiten deutlich. Da sich diese Arbeit im wesentlichen auf die Verbreitung bestimmter geologischer Einheiten hauptsächlich nach der Geologischen Karte von Bayern im Maßstab 1:500.000 stützt, wird automatisch auf den Übersichtscharakter der folgenden Zuordnungen hingewiesen.

Tab. 6-5: Mittlere Carbonatgehalte stratigraphischer Einheiten in Franken (vorwiegend Ufr.)

Einheit	Verwitterungshorizont (BayGla) ¹⁾			JOST (1995)			RUPPERT (1987)			Univ. Würzburg ²⁾		HAHN (1986)		OPITZ (1986)		KUS (1995)	
	pH	CaCO ₃ [%]	n	pH	CaCO ₃ [%]	n	pH	CaCO ₃ [%]	n	CaCO ₃ [%]	n	CaCO ₃ [%]	n	CaCO ₃ [%]	n	CaCO ₃ [%]	n
Kristallin	4,4	-	8														
z	7,7	93	1														
su/sm	4,3	-	7														
so (t)	5,3		4	6,8	3,0	13											
M (ungegliedert)	7,5	56	15									65,5	4	84,5	27	82,1	80
ku (s)	4,3	-	4									0,54	31				
(t/m)	7,2	10,8	6									9,7	54			15,1 ³⁾	11
(d)	7,2	27,5	7									62,4	19				
kmg (t,m,s)	7,2	24,4	6	7,9	9,1	17		30,7	2	24,1	65						
(s,t)	5,7	-	3														
kms (t,m,s)	6,9	-	1														
(s)	4,5	-	6														
kmf/j				7,8	5,0	20		12,3	1								
qL (s,l)	6,0	-	43														
(c)	7,2	14,6	10													11,3 ²⁾	34
qS (Sa)	5,4	<1	5														
q (Talaue)	7,0	2,3	7														

t: tonig, m: mergelig, s: sandig, l: lehmig, c: carbonatisch, d: dolomitisch

- 1) In den Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25.000 von Bayern
- 2) Oberflächennah gelagertes Material (Tonmergelsteine mit Sand-, Silt-, Dolomitsteinlagen) aus der Umgebung von Bad Windsheim, das als Material für eine Deponieoberflächenabdichtung, u. a. auf Carbonatgehalte untersucht wurde (unveröffentlicht)
- 3) Carbonatgehaltsbestimmungen des Lehr- und Forschungsbereiches Hydrogeologie & Umwelt der Universität Würzburg (unveröffentlicht)

6.2.3.1 Carbonatanteil der stratigraphischen Einheiten

Im nachstehenden wird dargestellt welche carbonatischen Materialien am Aufbau des Untergrundes beteiligt sind, welche Mächtigkeiten, Häufigkeiten und Verteilungen sie - gemessen an bekannten Normalprofilen der stratigraphischen Einheiten - haben, sofern hierfür geeignetes Datenmaterial vorlag.

Kristallin des Vorspessarts (K)

Der Untergrund wird überwiegend aus metamorphen Gesteinsserien aufgebaut. Als Formation an der Carbonate beteiligt sind, ist einzig die nach WEINELT (1962) beschriebene, marmorführende Paragneisserie im südöstlichen Ausstrichbereich des kristallinen Vorspessarts zu nennen. ROHRMÜLLER et al. (1996) bezeichnen diese Paragneisserie auch als Elterhof-Formation. In einem mehreren 100m breiten Band sind mehr oder weniger mächtige Marmorlinsen eingelagert. Neben der überwiegend aus Calcit und Dolomit zusammengesetzten Grundmasse des Marmors ist als gesteinsbildendes Mineral Aktinolith anzuführen. Die Grundmasse wird stellenweise von kalksilikathaltigen, schiefrigen Bändern durchzogen. Als Mächtigkeit wurde für ein einzelnes Vorkommen maximal 24m von STREIT & WEINELT (1971) angegeben. Auf Basis des benutzten Kartenmaterials (GUK500, GUK200) können zum Vorkommen der Marmorlinsen keine weiteren Aussagen getroffen werden.

Der gesamte Bereich des kristallinen Vorspessarts ist infolge seiner fehlenden Carbonatgesteine - mit Ausnahme der Marmor- und der gesondert zu betrachtenden Lößareale - als carbonatfrei einzustufen.

Zechstein (z)

In Unterfranken legt sich der Zechstein als mehr oder weniger schmales Band um den kristallinen Vorspessart. Neben tonigen bis tonfreien, dolomitischen bis reinen Kalksteinen wurden von OKRUSCH ET AL. (1967) auch verkieselte Dolomite an der Basis des Zechsteins, in denen das Carbonat nur noch in Spuren nachgewiesen wurde, auf Blatt 5920 Alzenau beschrieben. Auf den Geologischen Blättern 6020 Aschaffenburg und 6021 Haibach bestehen die Zechsteinvorkommen nach WEINELT (1962) und STREIT & WEINELT (1971) ebenso aus Dolomitsteinen, dolomitischen Ton-Mergelsteinen und aus einem basalen, mehr oder minder carbonatisch gebundenen Konglomerat. FREUDENBERGER (1996) faßt den anstehenden Zechstein des Spessarts nach verschiedenen Autoren wie folgt zusammen:

- maximal 5m Ton- und Siltsteine,
- maximal 40m dolomitische Kalksteine (Zechsteinkalk),
- maximal 2,5m Kupferschiefer, vorwiegend bestehend aus bituminösen, mergeligen Tonsteinen.

Dies ergibt im Gegensatz zur Angabe von bis zu 37m nach dem Wasserwirtschaftlichen Rahmenplan Main (BAYGLA, 1993), maximale Mächtigkeiten von bis zu 48m.

Aufgrund des Anteils carbonatischer Gesteine am Normalprofil sind die Deckschichten über den in der GUK 500 dargestellten Ausstrichbereichen des Zechsteins als carbonathaltig bis carbonatreich einzustufen.

Buntsandstein (su,sm,so)

Aus Gesteins- und Profilbeschreibungen nach CRAMER & WEINELT (1978), FREUDENBERGER (1996), SCHWARZMEIER (1977, 1979, 1984), WEINELT (1962), STREIT & WEINELT (1971), WITTMANN (1972), sowie aus eigenen, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Geländeuntersuchungen, kann für den Betrachtungsraum die gesamte Buntsandsteinfolge, mit wenigen horizontabhängigen Ausnahmen, zunächst als carbonatarm bis carbonatfrei bezeichnet werden. So treten insbesondere nach WEINELT (1962) und STREIT & WEINELT (1971) auf den Blättern 6020 Aschaffenburg und 6021 Haibach dünne, wenige cm-mächtige Carbonatsand- und Dolomitsteinbänkechen im Bröckelschiefer¹⁾ sowie stellenweise eine kalkig-dolomitisch ausgebildete Grundmasse in der Basal-

1) nach neuer Nomenklatur stratigraphisch dem Zechstein zugeordnet

brekzie des Unteren Buntsandsteins (su) auf. Ferner wird von den o. g. Autoren immer wieder auf die sogenannten ehemaligen Carbonatsandsteinnester im Unteren Buntsandstein hingewiesen, die von Ihnen, mit Ausnahme von WEINELT (1962), jedoch nur noch an Mn-haltigen Verwitterungsresten als solche interpretiert werden. WITTMAN (1972) beschreibt auf Blatt 6022 Rothenbuch zudem Einschaltungen von Mergel- und Dolomitknollen im Unteren Buntsandstein 1 (su1). Für den mittleren Buntsandstein (sm) sind vor allem der Karneol-Dolomit-Horizont (KD) und die Solling-Sandsteinfolge (smS) als carbonatführend zu bezeichnen. SCHWARZMEIER (1979, 1977, 1984) beschreibt teils carbonatisch gebundene, mürbe Sandsteine und im Durchmesser bis zu 3cm große, schlierig angeordnete Dolomitknauern im KD sowie bis zu 2cm im Durchmesser große Dolomitknauern im smS. Von SCHWARZMEIER (1977) wurden auch im Dachbereich der Hardeggenfolge (smHF) reichlich Dolomitknollen beobachtet. Im Oberen Buntsandstein (so) werden vom gleichen Autor (1977, 1979, 1984) vor allem mit sekundär gebildetem Calcit bzw. Dolomit ausgekleidete Hohlräume (ehemals Gipsschnüre) als carbonatische Bestandteile genannt. Daneben sind in den Röttonen (so3T, so4T) seltener dolomitisch gebundene Sandsteinbäncken eingeschaltet. Im Rötquarzit (so4Q) können vereinzelt Kalkknollen eingestreut sein (SCHWARZMEIER, 1977). REIS (1928) beschreibt dolomitische Sandsteinbänke in den obersten 5m des Plattensandsteins (so2). Am carbonatreichsten erscheinen jedoch die Ton- und Tonmergelsteine der Myophorienschichten der Oberen Röttonfolge (so4T) im Grenzbereich zum Unteren Muschelkalk.

Die Verteilung der carbonatischen Spezies im Normalprofil zeigt, wie eingangs schon angedeutet, die ausgesprochene Carbonatarmut der Buntsandsteinfolgen, jedoch mit etwas höheren Carbonatanteilen im Bereich des Bröckelschiefers und im Oberen Buntsandstein. Aufgrund der spärlichen Verteilung der zudem oftmals nur sekundär gebildeten Carbonatspezies im Unteren und Mittleren Buntsandstein, dürften sich im Ausstrichbereich dieser Einheiten keine carbonathaltigen Deckschichten vorfinden. Dies wird u. a. auch durch die vergleichsweise sauer reagierenden Verwitterungsschichten (vgl. Tab. 6-5) belegt. Im Oberen Buntsandstein kann bei anstehenden Röttonen mit einem gewissen Carbonatgehalt in den Deckschichten gerechnet werden. Untersuchungen an der Verwitterungsschicht des BAYGLA zeigen jedoch pH-Werte, die bereits unterhalb der des Carbonatpufferbereichs liegen (vgl. Tab. 6-5). JOST (1995) ermittelte hingegen an 13 Proben der Röttone mittlere Carbonatgehalte von 3 % bei pH-Werten um 6,8, also nach PRENZEL (1985) bereits im Carbonatpuffersystem liegend. Daher dürften im Ausstrichbereich der Sedimentfolgen des Oberen Buntsandsteins - im Vergleich zu den liegenden Einheiten - carbonatarmer bis carbonathaltige Deckschichten zu erwarten sein.

Muschelkalk (m)

Die gesamte Abfolge des Muschelkalkes kann im Untersuchungsraum als carbonatreich eingestuft werden. Trotz eingeschalteter Tonsteinserien überwiegt deutlich der Anteil carbonatischer Spezies.

Auch die sogenannten Tonsteinhorizonte des Oberen Muschelkalkes zeigen nach chemischen Analysen von 22 Proben Carbonatgehalte von 17 - 69 % und belegen daher mergeligen, durchaus carbonatischen Charakter (KUS, 1995). Aufgrund der Vorherrschaft carbonatischer Gesteine über das gesamte Muschelkalkprofil hinweg, sind die zugehörigen Deckschichten im Austrichbereich dieser Formation ebenso carbonatreich.

Unterer Keuper (ku)

Der Aufbau des Unteren Keupers kann nach den Beschreibungen von HOFFMANN (1967a, 1967b), SCHWARZMEIER (1981,1982), FREUDENBERGER (1997), HAUNSCHILD (1997), BÜTTNER (1989), HEGENBERGER (1969), CRAMER (1964) und SCHRÖDER (1976) sowie nach eigenen Untersuchungen als einheitlich für den gesamten Untersuchungsraum angesehen werden. Regionale Unterschiede liegen hierbei vor allem in den Mächtigkeiten der einzelnen Schichtglieder, wobei dies hauptsächlich auf die tonig-mergeligen und sandigen Gesteinspartien zutrifft. Die Mächtigkeiten des Unteren Keupers reichen in etwa von 30m im äußersten Süden des Arbeitsgebietes bis hin zu etwa 40m im Nordosten. Im Bereich nordöstlich von Schweinfurt werden mit bis zu 50m die größten Mächtigkeiten angegeben. Die Profilmächtigkeiten o. g. Autoren korrelieren sehr gut mit den Isolinien gleicher Mächtigkeiten im Raum N-Bayern nach HAUNSCHILD (1997).

Als Referenzprofil wurde die Darstellung nach HOFFMANN (1967a) gewählt. Im Abgleich mit den geochemischen Analysen nach HAHN (1986), zusammengefaßt in der Tab. 6-5, können, bezüglich der Mächtigkeiten kalkig-dolomitisch (kd), tonig-mergelig (tm) und sandig (s) ausgebildeter Schichtglieder, die in der Tabelle 6-6 dargestellten Verhältnisse erwartet werden.

Tab. 6-6: Mächtigkeitsverteilung kalkig-dolomitischer (kd), tonig-mergeliger (tm) und sandig ausgebildeter Schichten im Unteren Keuper Unterfrankens.

Gebiet	kd [m]		tm [m]		s [m]		Verhältniszahlen kd:tm:s <small>berechnet aus den mittleren Mächtigkeiten</small>
	min	max	min	max	min	max	
Raum Ochsenfurt - Aub	6,75	11,2	15,8	19,5	7,05	12,1	31 : 49 : 20
Raum Würzburg	8,0	14,7	10,6	17,3	3,25	13,6	34 : 41 : 25
Raum Schweinfurt	9,9	15,1	16,8	19,8	7,5	14,1	30 : 44 : 26

Dem Ergebnis der Tabelle 6-6 zur Folge, sind am Normalprofil des Unteren Keupers gut ein Drittel carbonatreiche (nach HAHN, 1986 liegt der Carbonatgehalt im Mittel bei 62,4 %) und etwas weniger als die Hälfte carbonathaltige Gesteine (Carbonatgehalt nach Hahn, 1986 im Mittel bei 9,7 %, nach KUS, 1995 bei 15,7 %) beteiligt. Gut ein Viertel entfallen demnach auf sandige Gesteine, die gelegentlich ebenso carbonatische Partien enthalten. Die carbonatreichen und -haltigen Lagen sind mehr

oder minder regelmäßig über das gesamte Profil verteilt. Daraus läßt sich im Ausstrichbereich des Unteren Keupers generell auf carbonathaltige, mitunter carbonatreiche Deckschichten schließen. Bei mächtigeren Sandsteinvorkommen (z. B. Werksandsteinbereiche, kuW) können aber ebenso carbonatarmer bis carbonatfreie Deckschichten auftreten. Hierzu zeigen beispielsweise die analysierten Verwitterungsschichten sandiger ku-Bereiche pH-Werte um 4,3 im Mittel (vgl. Tab.6-5), also jenseits des wirksamen Carbonatpufferbereichs.

Gipskeuper (kmg)

Der Gipskeuper leitet als Basis die Sedimentabfolge des Mittleren Keupers ein. Den eigenen Geländeuntersuchungen und den Beschreibungen von BÜTTNER (1989), CRAMER (1964), EMMERT (1968, 1969, 1985), HAUNSCHILD (1976), SCHRÖDER (1976) und SCHWARZMEIER (1982) zufolge, handelt es sich um eine vergleichsweise einheitliche Abfolge von mergeligen Tonsteinen mit Einschaltungen von Steinmergel- und Dolomitbänkchen sowie Zentimeter bis mehrere Meter mächtigen Sulfatlagern. Sandig ausgebildete Horizonte treten bis auf den Bereich der Schilfsandsteinabfolge im gesamten Profil des Gipskeupers deutlich zurück. Im Profilabschnitt der Myophorien- und Estherien-schichten deuten sowohl die makroskopischen Beschreibungen der o. g. Autoren als auch die geochemischen Analysen der Tabelle 6-5 auf eine relativ gleichmäßige Verteilung der carbonathaltigen Schichten hin. Die Analysen zeigen mittlere Carbonatgehalte zwischen 24 und 30 % für die tonig-mergeligen Lagen. CRAMER (1964) erwähnt dolomitische Tonmergel der Myophorienschichten mit 15 - 35 % Carbonatanteil. Für den Bereich der Lehrbergschichten, die den Abschluß des Gipskeupers darstellen, dürfte vor allem nach den Beschreibungen von EMMERT (1968, 1969, 1985) und HAARLÄNDER (1969) der Carbonatanteil in den Tonmergelsteinlagen etwas zurückgehen. So ermittelte JOST (1995) für 19 Proben der tonig-mergeligen Gesteine der Lehrbergschichten einen mittleren Carbonatgehalt von 9,1 %.

In der in ihrer Mächtigkeit sehr stark schwankenden Schilfsandsteinabfolge (kmS) (für den Untersuchungsraum 0 - 40m) dominieren in der Regel Sandsteine, die vereinzelt dolomitisches Bindemittel aufweisen. Zudem findet ein unregelmäßiger Wechsel zwischen den Sandsteinen und schiefrig ausgebildeten Tonsteinen statt, die ebenso carbonatisch gebunden sind. Ferner werden von EMMERT (1968, 1985) und HAUNSCHILD (1969) knollig-wulstige Steinmergelzwischenlagen bzw. Steinmergelknollen und vereinzelt kalkige Pflanzenhechsel beobachtet. Des weiteren führt HAARLÄNDER (1969) einen schwarzgrauen Mergelschiefer an. Die Analysen der Verwitterungsschichten zeigen jedoch vorzugsweise die Bildung basenarmer Deckschichten an (DREXLER, 1985). Der mittlere pH-Wert liegt bei 5,7 (vgl. Tab. 6-5) und verweist damit auf Milieubedingungen jenseits des wirksamen Carbonatpufferbereichs.

Im Ausstrichbereich des Gipskeupers kann nun aufgrund der Dominanz tonig-mergeliger Profilabschnitte generell auf carbonathaltige, mitunter carbonatreiche Deckschichten geschlossen werden.

Davon müssen die Gebiete mächtigerer Schilfsandsteinabfolgen jedoch ausgeklammert werden. Dort ist eher mit der Ausbildung carbonatarmer, seltener carbonathaltiger Deckschichten zu rechnen.

Sandsteinkeuper (kms)

Im Sandsteinkeuper nimmt der Anteil an sandig ausgebildeten Lagen im Vergleich zum Gipskeuper deutlich zu. Für das nördliche Franken und damit für den Untersuchungsraum zeigt sich nach FREUDENBERGER (1996) mit Gipsmergeln, Mergeln und Dolomitbildungen jedoch noch der marine Einfluß auf die Sedimentation. Daher erscheint es nicht verwunderlich, daß ebenso im Sandsteinkeuper Unterfrankens sehr häufig Gesteine mit nachweisbarem Carbonatgehalt am Untergrundaufbau beteiligt sind. Die carbonatspezifische Gliederung erscheint allerdings als schwierig, da sich sowohl in der horizontalen als auch vertikalen Erstreckung des Sandsteinkeupers große Mächtigkeits- und Gesteinsunterschiede zeigen können. Somit liegt kein allgemein gültiges Normalprofil, das über die Carbonatverteilung Aufschluß geben könnte, für Unterfranken vor.

Auf Blatt 5829 Hofheim, auf dem der Sandsteinkeuper flächenmäßig seine größte Ausdehnung im Untersuchungsraum erreicht, beschreibt SCHRÖDER (1976) mächtigere Sandsteinfolgen im Wechsel mit mehr oder weniger dolomitischen Tonsteinen. Ferner werden dolomitisch gebundene Sandsteine, Dolomitbänkchen und -knollen erwähnt. Im Gebiet des mittleren Burgsandsteins (Dolomitische Arkose) spricht der Autor sogar über auskartierbare Carbonathorizonte. Auf Blatt 6128 Ebrach schildert EMMERT (1985) vom Aufbau des Blasensandstein an der Basis des Sandsteinkeupers bis zum Unteren Burgsandstein teils dolomitisch, teils quarzitisches gebundene Sandsteinpakete im Wechsel mit mehr oder weniger dolomitischen Zwischenlagen. In den tonigen Zwischenlagen des Blasensandsteins sind ebenso reichlich Steinmergelknauern eingelagert. Zieht man weitere kartierte Blätter in Betracht, so verläßt man den Untersuchungsraum in südöstlicher Richtung und gerät somit in sandsteinreichere Faziesausbildung des Keupers.

Tab. 6-7: Anteile verschiedener Gesteinsarten an Normalprofilen des Sandsteinkeupers

Anteile in (%)	Sandstein	Tonstein (z. T. dolomitisch)	Sandstein dolomitisch gebunden	Steinmergel
Blatt 5829 Hofheim				
Profil 3, S. 108 Blasensandstein, Coburger Sandstein Mächtigkeit : 46,6m	14,6	80,6	4,3	0,5
Profil 5, S. 110 Blasensandstein, Coburger Sandstein Mächtigkeit: 55,79m	18,8	80	-	1,2
Profil 7, S. 111 Mittlerer Burgsandstein Mächtigkeit: 23,4m	32	68	-	-
Blatt 6128 Ebrach				
Profil 12, S. 112 Blasensandstein Mächtigkeit: 13,9m	65	16	19	-
Profil 13, S. 113 Blasensandstein Mächtigkeit: 14,2m	-	93	7	-

Tabelle 6-7 zeigt für die Blätter Ebrach und Hofheim einen relativ hohen Anteil toniger Lagen. Carbonatische Gesteine treten eindeutig gegenüber tonig bzw. quarzitisch gebundenen Sandsteinen zurück.

Aus den Beschreibungen der Autoren zur Ausbildung und zum Vorkommen des Sandsteinkeupers sowie unter Berücksichtigung vorhandener Profile im Untersuchungsgebiet, lassen sich ohne weitere Gliederung im Ausstrichbereich carbonatarmer bis carbonathaltiger Deckschichten erwarten. Dabei dürften sich vor allem in den Bereichen mächtigerer Sandsteinvorkommen saure Milieubedingungen in den Deckschichten von Waldgebieten einstellen, was bereits durch die Analysen der Tabelle 6-5 angedeutet wird.

Feuerletten-Lias (kmF, ko-ju, ju)

Die zusammengefaßte Abfolge besteht in Unterfranken aus den Feuerletten des Mittleren Keupers (kmF), den vorwiegend sandigen Gesteinen des Oberen Keupers bzw. der Rhät-Lias-Übergangsschichten und den tonig-mergeligen Schichten des Untersten Lias (ju). Nach FREUDENBERGER (1996) und SCHRÖDER (1976) bestehen die Feuerletten überwiegend aus Ton- und Tonmergelsteinen. RUPPERT (1987) gibt für die Verwitterungsschicht der Feuerletten einen Carbonatgehalt von 12,3 % an, JOST (1995) ermittelte an 20 Tonsteinproben einen mittleren Carbonatgehalt von 5 % (vgl. Tab. 6-5). Ferner werden von FREUDENBERGER (1996) und SCHRÖDER (1976) Dolomitsteinkrusten und -knollen als linsenartige Einlagerungen beschrieben. Im Gegenzug sind die Rhät-Lias-Übergangsschichten hauptsächlich durch fein- bis grobkörnige, meist quarzitisch, seltener carbonatisch gebundene Sandsteine vertreten. So beschreibt SCHRÖDER (1976) auf Blatt 5829 Hofheim ein etwa 24m mächtiges Steinbruchprofil mit fein- bis grobkörnigen Sandsteinbänken. Der Untere Lias ist im Bereich Unterfrankens nur noch mit tonig-mergeligen, vereinzelt sandigen Sedimenten in Toplagen zeugenbergartiger Erhebungen vorhanden.

Da die Schichten der o. g. Einheiten flächenmäßig eine vergleichsweise geringe Verbreitung im Arbeitsgebiet aufweisen und zudem i. d. R. eine morphologische Einheit bilden, wird hier auf eine getrennte Bewertung verzichtet.

Tab. 6-8: Mächtigkeitsverteilung der Schichtglieder Feuerletten bis Unterer Lias in Ufr.

Mächtigkeit in Ufr.	Stratigraphie	Ausbildung
0 - 30m	Unterer Lias (ju)	tonig-mergelig, z. T. sandig
30 - 40m	Rhät-Lias-Übergangsschichten (ko-ju)	sandig, z. T. tonig
40 - 50m	Feuerletten (kmF)	tonig-mergelig mit dolomitischen Lagen

In ihrem Ausstrichbereich ist aufgrund der Mächtigkeitsverhältnisse (vgl. Tab. 6-8) und morphologischen Position der einzelnen Schichtglieder mit carbonatarmen bis carbonathaltigen Deckschichten zu rechnen, wobei die Carbonatarmut insbesondere an die Verbreitung der sandigen Rhät-Lias-Übergangsschichten gebunden ist.

Tertiär (Basalt, b)

Als Einheit wird hier nur das Vorkommen tertiärer Vulkanite betrachtet, das vorwiegend aus Basalt und entsprechenden Tuffsteinen besteht. Ausgenommen von Blasen Hohlräumen in den Gesteinen, die z. T. mit sekundärem Calcit verfüllt sind und gelegentlich carbonatischen Fremdgesteinseinschlüssen sind die tertiären Gesteinsvorkommen als carbonatfrei zu beurteilen, was infolge ihrer Verwitterung ebenso auf carbonatfreie Deckschichten im Austrichbereich schließen läßt. Trotz der Carbonatarmut sind aufgrund der Gesteinsmineralogie der Vulkanite meist basenreiche Verwitterungsschichten ausgebildet, so daß prinzipiell basische Milieubedingungen erwartet werden können.

Quartär (q, qL, qLl, Sa)

Die Gliederung des Quartärs nach dem Anteil carbonatischer Materialien ist im Vergleich zu den älteren Gesteinsformationen eine denkbar schwierige Aufgabe, da es sich sowohl in ihrer vertikalen als auch horizontalen Erstreckung um ausgesprochen heterogen zusammengesetzte Gesteinskörper handelt. Anhand des vorliegenden Kartenmaterials und Informationen empfiehlt sich zunächst eine Trennung der Löß- und Flugsandareale von den restlichen Einheiten, da es sich hierbei um vergleichsweise homogen zusammengesetzte Deckensedimente handelt. Diese können nach der Karte von BRUNNACKER (1978, vgl. Abb. 6-25) weiter unterteilt werden in Löß (qL), Lößlehm (qLl) und Flugsand (Sa).

Der Löß erreicht im frischen Zustand Carbonatgehalte bis zu 30% und geht nach Entkalkungsvorgängen allmählich in den sogenannten Lößlehm über. Nach der Tabelle 6-5 liegen die mittleren Carbonatgehalte des Löß zwischen 11 und 15%. Der Lößlehm als solcher wird nach verschiedenen Autoren als kalkfrei bezeichnet, wobei jedoch selten ein reiner Lößlehm vorliegt sondern eher ein teilentkalkter Löß. Für den Flugsand liegen keine verlässlichen Daten zum Carbonatgehalt vor. Nach JERZ (1996) werden die Sande im allgemeinen als kalkfrei bezeichnet, was nach den pH-Wertangaben der Tabelle 6-5 ebenso vermutet werden kann. Nun können im Ausstrichbereich der Lößareale generell carbonathaltige Deckschichten erwartet werden, wohingegen bei Lößlehmdecken carbonatarmer bis -haltige und bei den Flugsanden carbonatfreie bis -arme anzutreffen sind. Für das ungegliederte Quartär dürfte sich naturgemäß eine große Bandbreite von carbonatfreien bis carbonathaltigen Deckschichten vorfinden.

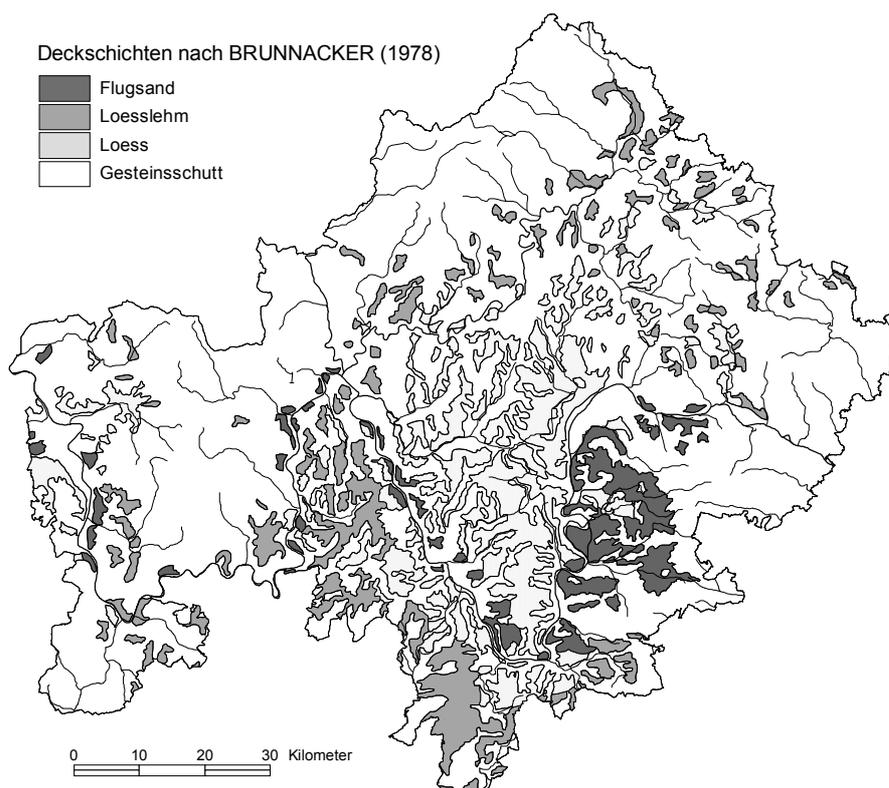


Abb. 6-25: Deckschichtenkarte für den Bereich Unterfranken, generalisiert und digital erfaßt nach der Karte von BRUNNACKER (1978). Die Talräume wurden unter Gesteinsschutt zusammengefaßt.

6.2.3.2 Bewertung des Carbonatanteils

In Tabelle 6-9 wurden die unter Abschnitt 6.2.3.1 aufgeführten Geländebefunde zur Beteiligung carbonatischer Spezies am geologischen Untergrundaufbau Unterfrankens tabellarisch zusammengefaßt. Dabei erfolgte eine Abschätzung des Anteils carbonatischer Spezies am Normalprofil der stratigraphischen Einheiten. Das Vorkommen und ihre Verteilung sowohl in der Horizontalen als auch Vertikalen führte zu einer Bewertung der zu erwartenden oberflächennahen Verbreitung und somit zur Abschätzung des Puffervermögens oberflächennaher Deckschichten. Der angegebene Zuordnungswert spiegelt letztendlich den Zugehörigkeitsgrad einer stratigraphischen Einheit zur Menge AF wider. Im Diagramm der Abbildung 6-26 sind die angenommenen Zugehörigkeitsbereiche der stratigraphischen Einheiten in Bezug zum Carbonatanteil und entsprechendem Puffervermögen nochmals graphisch dargestellt.

Für die kartographische Auswertung wurde jeweils ein mittlerer Zuordnungswert herangezogen. Die Vorgehensweise der Erstellung der Ergebniskarte [FuzCa] (vgl. Abb. 9-28) kann in der Abbildung 9-27 nachvollzogen werden.

Tab. 6-9: Bewertung der stratigraphischen Einheiten nach ihrem geschätzten Anteil am Normalprofil

Carbonatanteil am Normalprofil [%] (geschätzt)	Zuordnungswert	Stratigraphische Einheiten (Kurzzeichen)	Vorkommen carbonatischer Komponenten (Beispiele)	Oberflächennahe Verbreitung carbonatischer Spezies	Puffervermögen bezogen auf die flächenhafte Verbreitung carbonatischer Deckschichten
0 - 1	0,1	K, su, sm, b, Sa	Carbonatsandsteinnester; Dolomitknauern; seltener cm-starke Dolomitsteinbänkchen; Kalkdrusen (sekundär)	keine bis gering	sehr gering
1 - 5	0,2	QLI (Löblehm), ko-ju, kmS (Schilfsanstein), kuW (Wersandstein), so	Unregelmäßiges Auftreten geringmächtiger Dolomitbänkchen; sekundäre Carbonatdrusen; carbonatisch gebundene Sandsteinbänke; qLI: überwiegend entkalkt, sporadisch auftretende Kalknester	gering	gering
5 - 10	0,3 - 0,4	qLI, q (Quartär ungliedert), kms, so	Zumeist lateral durchhaltende Carbonatlagen unterschiedlicher Mächtigkeiten, jedoch nur auf wenige Profilbereiche beschränkt; Vorkommen mergeliger Tonsteine; qLI: inhomogene Verteilung carbonatischer Komponenten, teilentkalkt	gering - mittel, bei mächtigeren carbonatischen Lagen auch flächenhafte Verbreitung möglich	mittel
10 - 30	0,5 - 0,6	kmF, ju, kmg, qL	Über das gesamte Profil regelmäßig verteilte, carbonathaltige Tonmergelsteine jedoch mit Carbonatgehalten < 30%; vereinzelt Steinmergel- und Dolomitbänkchen; qL: mehr oder weniger homogen verteiltes Carbonat	mittel	mittel - hoch
30 - 50	0,7 - 0,8	ku, kmg	Regelmäßiges Auftreten carbonatischer Zwischenlagen; Ausbildung lateral beständiger bis zu m mächtiger Kalk- bzw. Dolomitbänke	mittel - hoch	hoch
> 50	0,9 - 1	z, m	Carbonatische Lagen dominieren über das gesamte Profil hinweg, Anteil kalkig-dolomitischer Bänke > 50%	hoch	sehr hoch

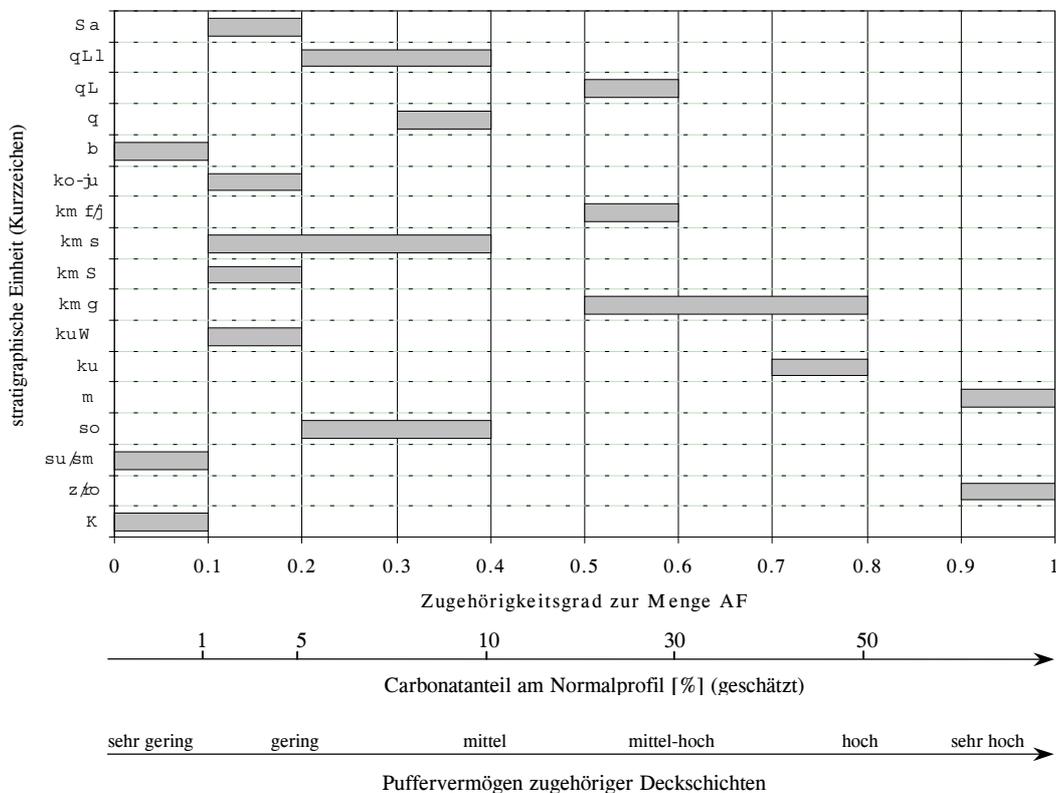


Abb. 6-26: Darstellung der Spannbreiten möglicher Zugehörigkeitsgrade zur Menge AF, ermittelt aus den geschätzten Anteilen carbonatischer Spezies am Normalprofil der stratigraphischen Einheiten.

Abb. 6-27 : Das Flußdiagramm veranschaulicht die Ermittlung des Fuzzy-Sets [FuzCa] bezogen auf den geschätzten Anteil und die Verteilung carbonatischer Spezies am geologischen Aufbau Unterfrankens. *Merge-mean* bildet aus der Verschneidung der Rasterkarten einen Mittelwert. *Remove noise* eliminiert alle (quasi-)homogenen Flächen kleiner gleich 100 Zellen, respektive 0,25km², zugunsten der nächsten Nachbarflächen.

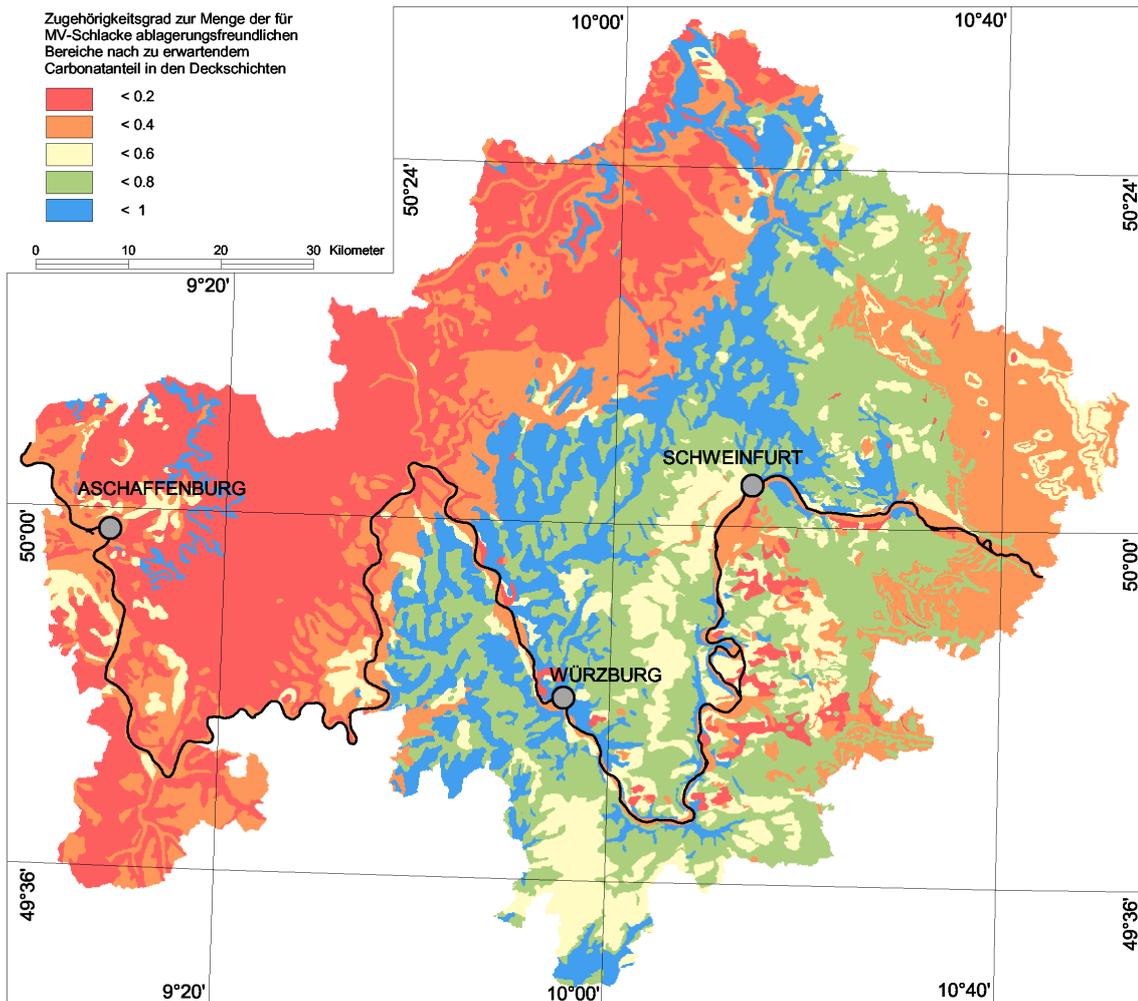
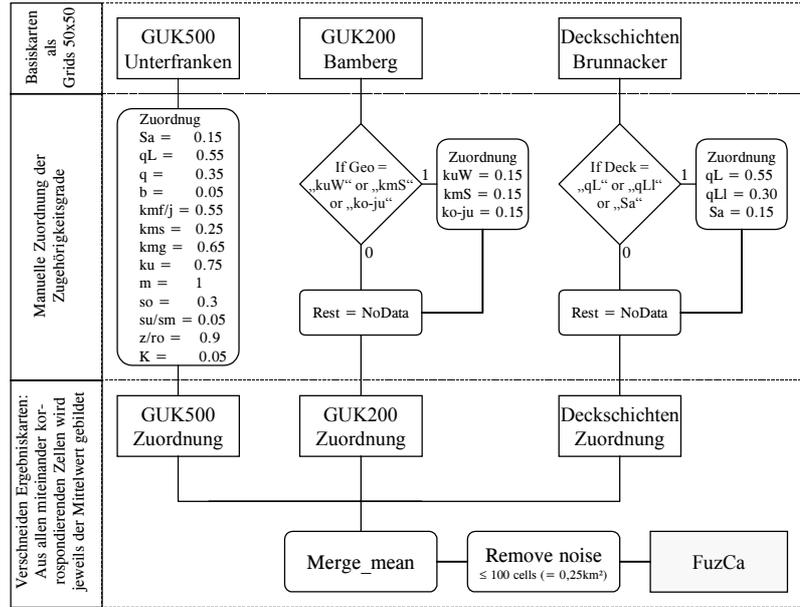


Abb. 6-28: Räumliche Verteilung der Klasse *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF*, ermittelt nach Schema der Abbildung 6-27.

6.2.4 Carbonat-Sättigungsindex

Unter den verschiedenen hydrogeochemischen Parametern ist der pH-Wert, als Ergebnis des Zusammenwirkens vieler Faktoren, einer der wichtigsten Indikatoren für die Charakterisierung des Milieus. Für Schlackeablagerungen bietet nach den bisherigen Erkenntnissen insbesondere der pH-Bereich zwischen 7 und 8,3 günstige Milieubedingungen, während bei zunehmend alkalischen Bedingungen ein verstärkter Austrag von amphoteren Metallen z. B. Aluminium, Blei oder Zn beobachtet wird und der für die „Schlackestabilisierung“ wesentliche Carbonatisierungseffekt stark behindert oder unterbunden wird. Da in der Natur stark alkalische Wässer nur sehr selten vorkommen (z. B. in zeolithreichen Basalten) wird im folgenden nicht weiter auf diesen Grundwassertyp eingegangen. Wässer hingegen, die einen pH-Wert unter dem Neutralpunkt bzw. $< 6,5$ haben (z. B. Sandsteinsickerwässer) weisen auf saure Milieubedingungen hin. Dort liegt in der Regel das zugeführte CO_2 aggressiv vor (UDLUFT, 1978a), was letztendlich zur pH-Wert-Erniedrigung führt. Unter diesen Milieubedingungen werden einerseits wirksame Puffersubstanzen relativ schnell aus dem System entfernt, andererseits besteht die Gefahr der (Re-) Mobilisation von Schadstoffen, insbesondere der Schwermetalle. Langfristig werden in der Schlacke im Carbonatpufferbereich, je nach Zufuhr freier Kohlensäure, Carbonatisierungsvorgänge stattfinden. Solange die umgebenden Bedingungen dafür sorgen, daß eingetragene Säuren weitestgehend abgepuffert werden, ist mit einer verstärkten Auslaugung der Schlacke nicht zu rechnen. Stehen die auf die Schlacke treffenden Sickerwässer im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht oder sind gar an Kalk übersättigt, wird es bei einer alkalischen Reaktion in der Schlacke zur Ausfällung von Carbonaten aus dem Sickerwasser kommen. Ist das Sickerwasser untersättigt, führt das überschüssige CO_2 des Sickerwassers zu Carbonatisierungsvorgängen in der Schlacke selbst. Eine ständige Untersättigung des Sickerwassers beschleunigt zwar die Carbonatisierungsvorgänge in der Schlacke, sind diese jedoch weitestgehend abgeschlossen, werden bei weiterer Zufuhr von überschüssigem CO_2 die Puffersubstanzen gelöst und wieder ausgewaschen. Wie unter den Abschnitten 2.3.2 und 2.4 bereits erläutert, setzt dann auch eine erste Freisetzung von Schwermetallen in der Schlacke ein. Über die Hauptinhaltsstoffe eines Grundwassers kann nach STROHECKER & LANGELIER sowie LARSON & BUSWELL (IN: HÖLTING, 1992) der Gleichgewichts-pH-Wert eines im Kalk-Kohlensäuregleichgewicht stehenden Wassers wie folgt berechnet werden:

$$\text{pH}_{\text{Sät}} = \text{pK} - \lg \text{CCa}^{2+} - \lg \text{CHCO}^{3-} + \lg f_L$$

Aus der Differenz zwischen dem gemessenen und dem berechneten pH-Wert ergibt sich der sogenannte Langelier- oder Calciumcarbonat-Sättigungsindex I_L . Negative Werte zeigen aggressive

Kohlensäure und positive Kalkübersättigung an. Entspricht der gemessene dem berechneten pH-Wert ($I_L = 0$), dann liegt das Wasser im Kalk-Kohlensäuregleichgewicht. Auf das Ablagerungssystem übertragen bedeutet dies, daß Werte ≥ 0 günstige und Werte < 0 ungünstige Milieubedingungen widerspiegeln.

Eine regionale Bewertung der Ablagerungsfreundlichkeit gegenüber Schlackeablagerungen anhand dieses Index setzt voraus, daß ausreichendes Datenmaterial zur hydrochemischen Beschaffenheit des oberflächennahen Grundwassers vorliegt.

6.2.4.1 Hydrochemischer Datensatz

Im Abschnitt 5.3.6 wurden die hydrochemischen Daten und ihre Vorhaltung im Rahmen einer Datenbank vorgestellt. Vor der hydrochemischen Auswertung und Beurteilung der Daten wurde eine Plausibilitätskontrolle vorgeschaltet. Diese wurde in Anlehnung an MATTHESS (1973) durchgeführt, indem für jede Einzelanalyse die entsprechende Ionenbilanz nach folgender Gleichung berechnet wurde:

$$e = \frac{\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen}}{\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen}} \cdot 100 \quad \text{mit } e = \text{relativer Fehler [\%]}$$

Anschließend erfolgte die Erstellung eines Datenblattes, das alle Entnahmestellen mit je einem Analysenwert beinhaltet. Dabei wurde für jede Entnahmestelle mit mehr als einer Analyse jeweils der arithmetische Mittelwert aller Werte gebildet. Eine ausführliche hydrochemische Charakterisierung wurde in dieser Arbeit nicht dargestellt. Es sei auf die detaillierte Beschreibungen und Darstellungen des Wasserwirtschaftlichen Rahmenplans Main, insbesondere auf die Tabellen 17a-c und Abbildungen 21-43 (BAYGLA, 1993) und die unter Abschnitt 6.2.1 genannte Literatur verwiesen, deren Er-

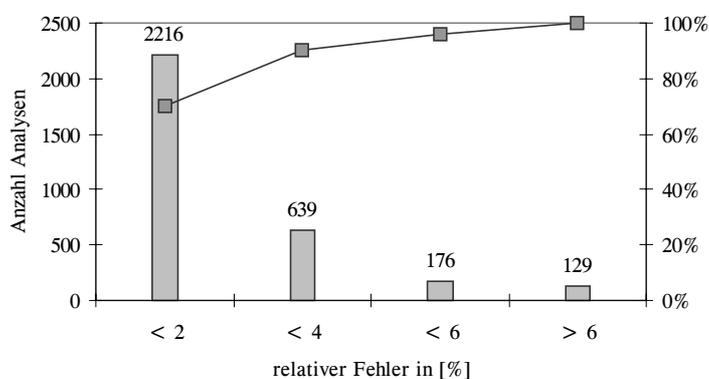


Abb. 6-29: Ionenbilanz der verfügbaren Analysen. Zur Auswertung wurden alle Analysen mit einem relativen Fehler von $< 6\%$ herangezogen. Dies entspricht 3031 Einzelanalysen für den Raum Unterfranken und angrenzender Gebiete.

gebnisse und Klassifikationen von den hier verwendeten Analysen belegt werden. Die Übersichtsdarstellung der Abbildung 6-30 zeigt die Verteilung der Entnahmestellen im Untersuchungsraum und angrenzender Gebiete.

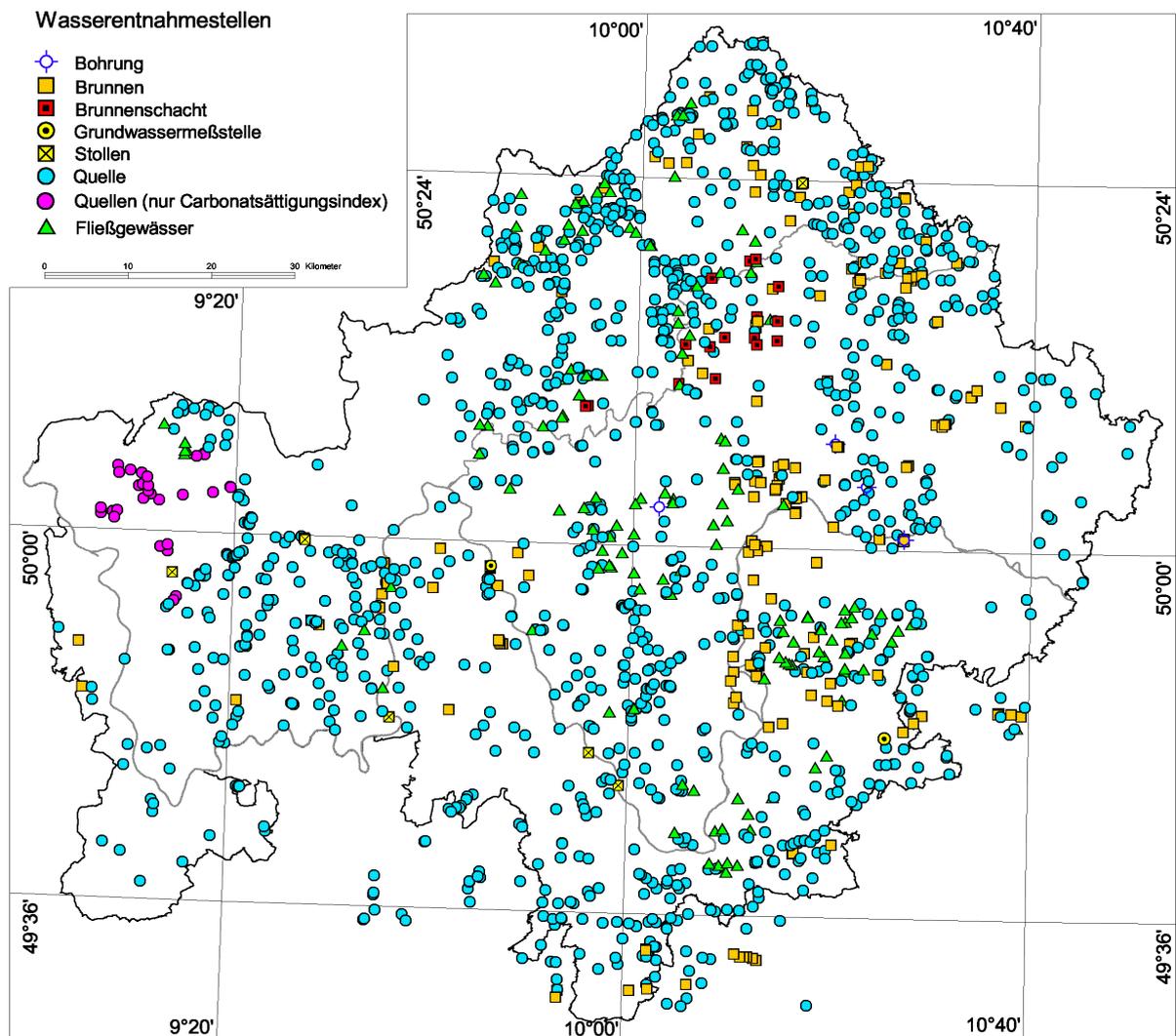


Abb. 6-30: Wasserentnahmestellen (Analysendatenpunkte) in Unterfranken und angrenzender Gebiete

6.2.4.2 Regionalisierung

Die Regionalisierung der Carbonat-Sättigungsindices zielt darauf ab, die vorliegende Punktinformation auf die Fläche zu interpolieren. Hierbei bieten sich prinzipiell zwei Möglichkeiten an:

- a) Direkte Flächenbildung der Indices mit Interpolationsmethoden (z. B. Kriging, Inverse Distanzen). Jeder einzelne Wert hat in Abhängigkeit seiner räumlichen Position Einfluß auf das Flächenmuster. Ein großer Nachteil ergibt sich hierbei aus der Flächeninterpolation räumlicher Datenlücken, was bedeutet, daß das Verteilungsmuster der Datenpunkte erheblichen Einfluß auf das Endergebnis nehmen wird.
- b) Gruppierung und Mittelwertbildung mit den Geologischen Einheiten als (quasi-)homogene Flächeneinheiten. Jedem Ausstrichbereich einer geologischen Einheit wird ein repräsentativer Carbonat-Sättigungsindex zugewiesen. Lokale Besonderheiten werden dabei vernachlässigt.

In der vorliegenden Arbeit wurden beide Methoden miteinander kombiniert, indem zunächst mit zusätzlichen Stützpunkten (geschätzte Werte) und der Methode *Inverse Distanzen* ein Rastermodell mit 200 x 200m großen Zellen aus den Punktobjekten der Abb. 6-30 interpoliert wurde. Um das Ergebnis zu überprüfen, wurde ein bereinigtes Rastermodell [C_Index] aus obiger Interpolation mit den hydrochemischen Provinzen nach UDLUFT (1978b) überlagert (vgl. Abb. 6-31). Wie aus der Abbildung 6-31 ersichtlich, korrelieren die interpolierten Flächen weitgehend mit den hydrochemischen Provinzflächen, dargestellt mit der mittleren Gesamthärte. Es sind insbesondere dort Unterschiede festzustellen, wo kleinräumige Grundwasservorkommen aus dem üblichen, großräumigen Schema der hydrochemischen Provinzen herausfallen und wo über Datenlücken hinweg interpoliert wurde.

Das interpolierte Grid [C_Index] wurde anschließend mit einem Polygonthema der geologischen Einheiten [G_Unit] verschnitten und die Häufigkeitsverteilung der Indexwerte bezogen auf die geologischen Flächen ermittelt. Das Diagramm in Abbildung 6-32 verdeutlicht insbesondere bei den quartären Einheiten Löß [qL] und Flugsand [Sa] eine Verteilung, die mehr als ein Ergebnis der Methode als der wirklichen Verhältnisse angenommen werden kann, zumal nur sehr spärlich plausibles Datenmaterial über die hydrochemischen Eigenschaften dieser Einheiten vorliegt und dementsprechend in die Flächenermittlung eingehen konnte. Gleiches gilt für die Ausstrichbereiche des Zechsteins, untergeordnet Rotliegendes, wo gleichfalls über die wahren Gegebenheiten hinweg interpoliert wurde. Für die genannten Einheiten wird aus den o. g. Gründen kein repräsentativer Index aus der Interpolation ermittelt. Dies gilt auch für das Quartär ungegliedert [q], für das ausreichendes Datenmaterial nicht zur Verfügung stand. Für die restlichen Einheiten, die immerhin den größten Flächenanteil in Unterfranken besitzen, ist erwartungsgemäß eine Zunahme der Carbonatsättigung

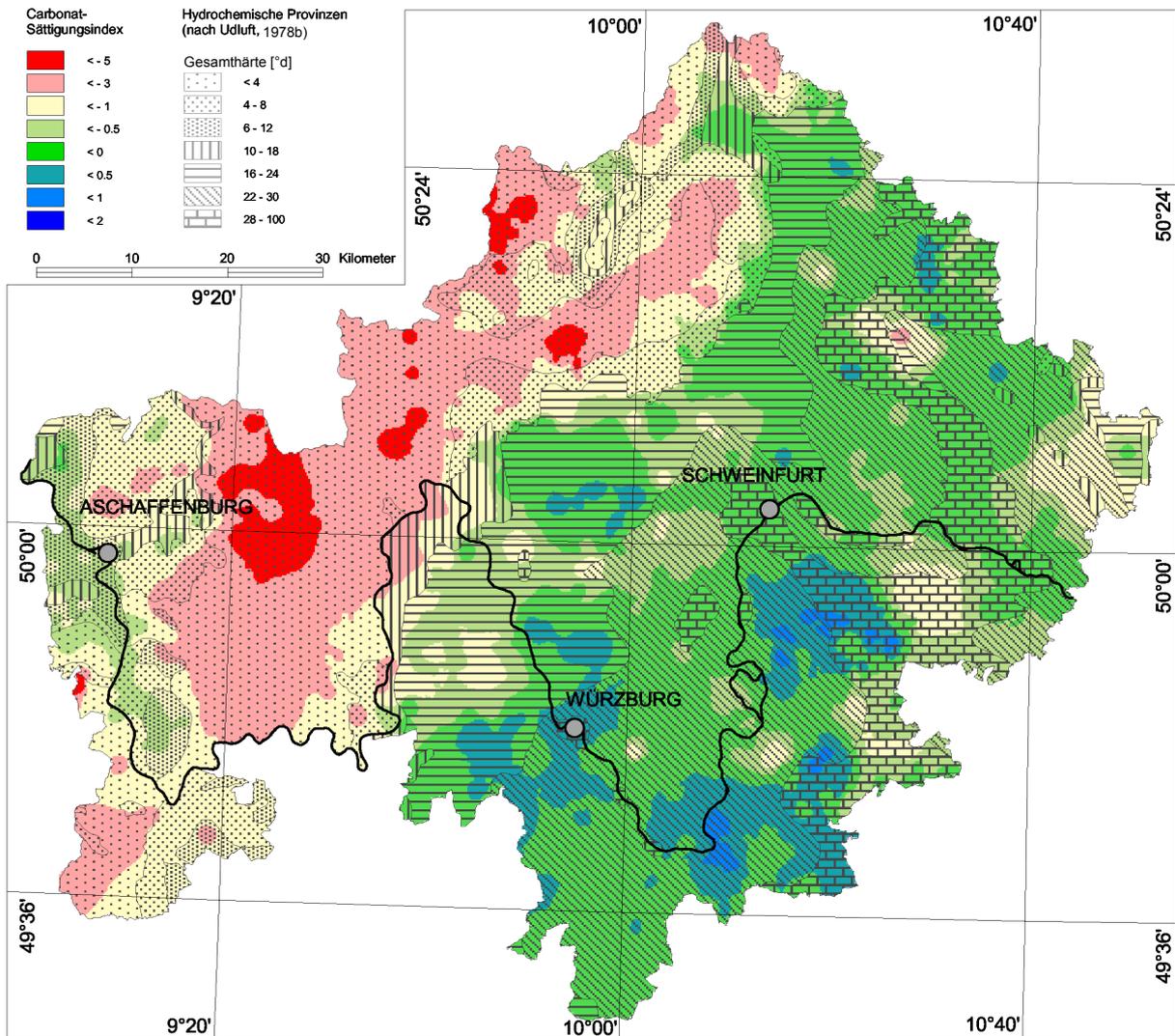


Abb. 6-31: Carbonat-Sättigungsindices interpoliert nach den Datenpunkten in Abb. 6-30 (ohne Fließgewässer, sofern sich diese nicht im Quellbereich befinden) mit der Methode *Inverse Distanzen*, überlagert von den hydrochemischen Provinzen nach UDLUFT (1978b).

bis hin zur -übersättigung von den Einheiten des Kristallins, Buntsandsteins und Tertiärs (Basalte) hin zu den Einheiten des Muschelkalks und Keupers festzustellen. Der auffällig hohe Anteil von Indexwerten < -1 bei den Feuerletten bzw. Rhätolias dürfte auf den Umstand zurückzuführen sein, daß vorwiegend im Bereich des Rhätsandsteins die lokalen Grundwasservorkommen zu finden sind und die Feuerletten daher nur wenig auf die Qualität des Grundwassers Einfluß nehmen. Die übersättigten Bereiche sind generell an die carbonatischen Einheiten des Muschelkalkes und des Unteren und Gipskeupers gebunden. Für alle aufgeführten Einheiten kann angenommen werden, daß, je nach Ausstrichfläche und Position einer Einheit, die Bereiche mit Anteilen $< 20\%$ auf Randerscheinungen zurückzuführen sind. Das Muster des Diagramms (vgl. Abb. 6-32) zeigt jedoch deutlich mit welchen, bezüglich der Carbonatsättigung vorherrschenden Verhältnissen gerechnet werden kann.

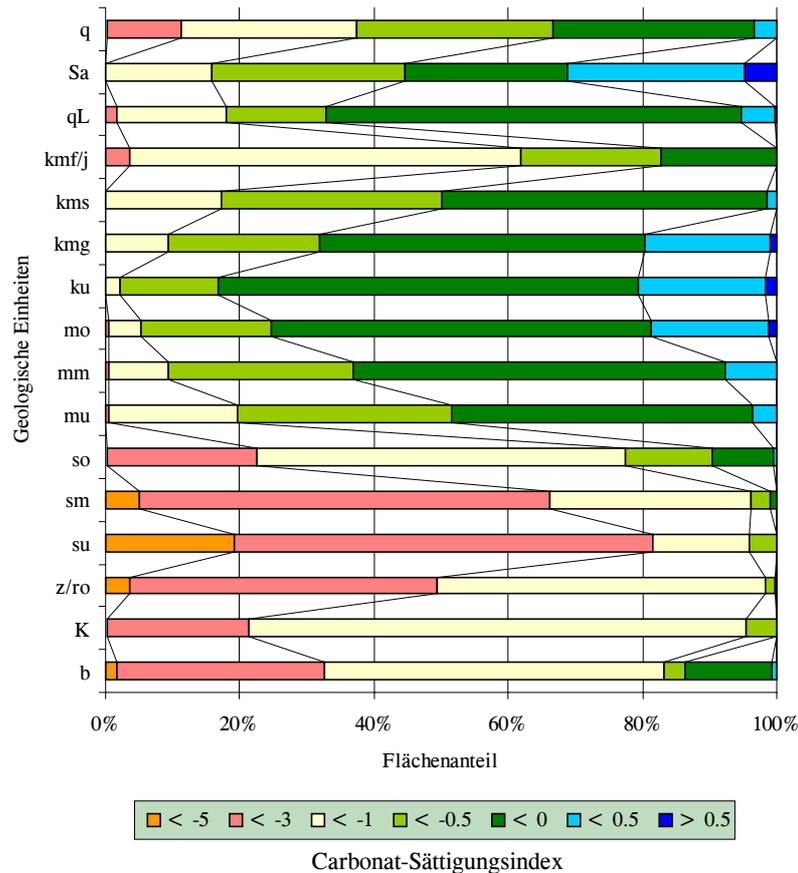


Abb. 6-32: Häufigkeitsverteilung der Carbonat-Sättigungsindices nach Abb. 6-31 bezogen auf die Flächen der geologischen Einheiten der GUK500 von Bayern.

6.2.4.3 Bewertung Carbonat-Sättigungsindex

Die Bewertung des Carbonat-Sättigungsindex erfolgt nach der in Abbildung 6-36 dargestellten Bewertungsfunktion. Grundlage für die Wahl des Parameters b der dortigen Zugehörigkeitsfunktion war eine statistische Ermittlung von pH-Wert-Schwankungsbreiten. Hierzu wurden, wie bereits er-

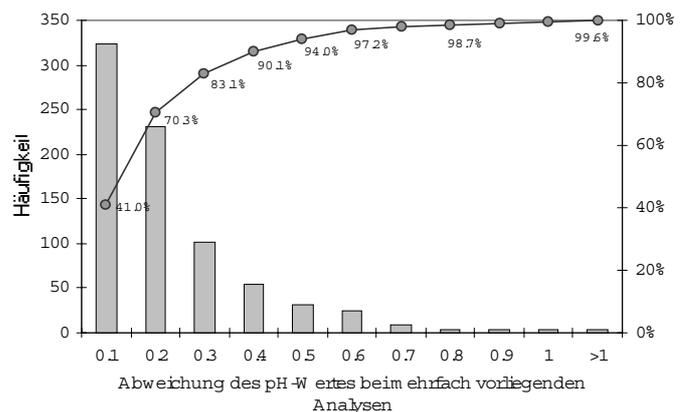


Abb. 6-33: Häufigkeitsverteilung von pH-Wert-Schwankungen bei Mehrfachanalysen, ermittelt über die Standardabweichung. Für die Verteilungsanalyse standen 1902 Analysen - verteilt auf 788 Entnahmestellen - zur Verfügung.

läutert, alle mehrfach für eine einzelne Entnahmestelle vorliegenden Analysen herangezogen, sofern diese innerhalb der Plausibilitätsgrenzen lagen. Die Standardabweichungen der pH-Werte wurden ermittelt und anschließend einer Verteilungsanalyse (Histogramm) unterzogen (vgl. Abb. 6-33). Das Diagramm der Abbildung 6-33 zeigt, daß für 94% aller Fälle der pH-Wert um maximal 0,5 Einheiten schwanken kann.

Vor der Berechnung der Zugehörigkeitsgrade hat es sich als sinnvoll erwiesen, eine statistische Auswertung aller berechneten Indices getrennt für jede geologische Einheit durchzuführen und anschließend mit dem interpolierten Ergebnis unter Abschnitt 6.2.4.2, Abbildungen 6-31, 6-32 zu vergleichen. Neben Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurde die Häufigkeitsverteilung der Indices ermittelt, um den Einfluß und die Signifikanz der jeweiligen Grundwasserleitereinheit (geologische Einheit) deutlich herauszustellen. Die Ergebnisse der Verteilungsanalyse sind in den Diagrammen der Abbildungen 6-34, 6-35 dargestellt.

Wie es schon im Verteilungsmuster der hydrochemischen Provinzen nach UDLUFT (1978b) und in den in dieser Arbeit interpolierten Flächen gleicher Carbonat-Sättigungsindices (beide dargestellt in Abbildung 6-31) deutlich wird, gliedert sich Unterfranken, aus hydrochemischer Sicht, in zwei wesentliche Abschnitte, einen westlichen und einen zentralen bis östlichen Bereich.

Westlicher Teil

Hydrogeochemisch umfaßt der westliche Bereich die geologischen Einheiten des Buntsandsteins und Kristallins sowie ferner die tertiären Eruptiva (Zechstein und Rotliegendes wurde wegen Datenmangels nicht gesondert betrachtet). Die entsprechenden Diagramme zum Carbonat-Sättigungsindex sind in der Abbildung 6-34 ent-

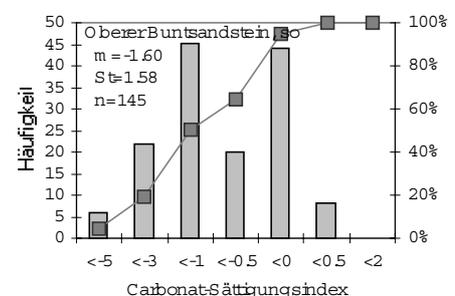
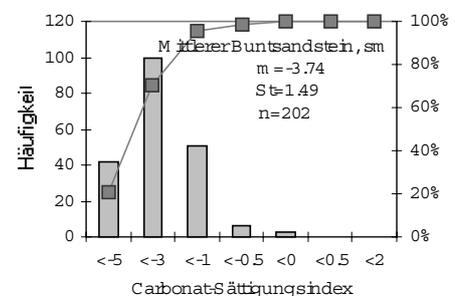
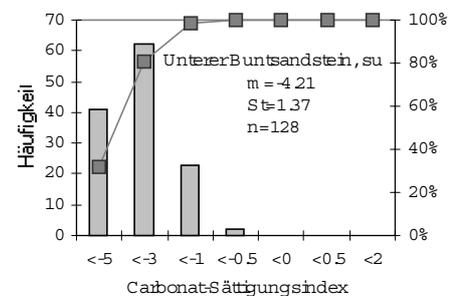
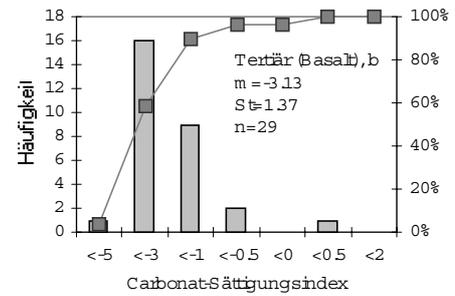
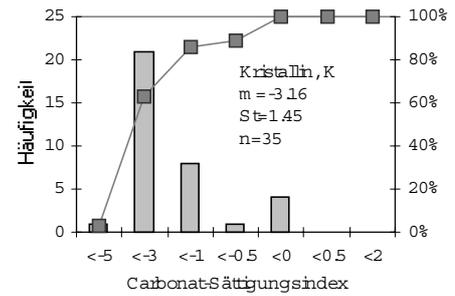


Abb. 6-34: Häufigkeitsverteilung, Mittelwert (m), Standardabweichung (St) und Anzahl (n) der Carbonat-Sättigungsindices, gegliedert nach geologischer Herkunft (K, b, su, sm, so) der analysierten Grundwässer.

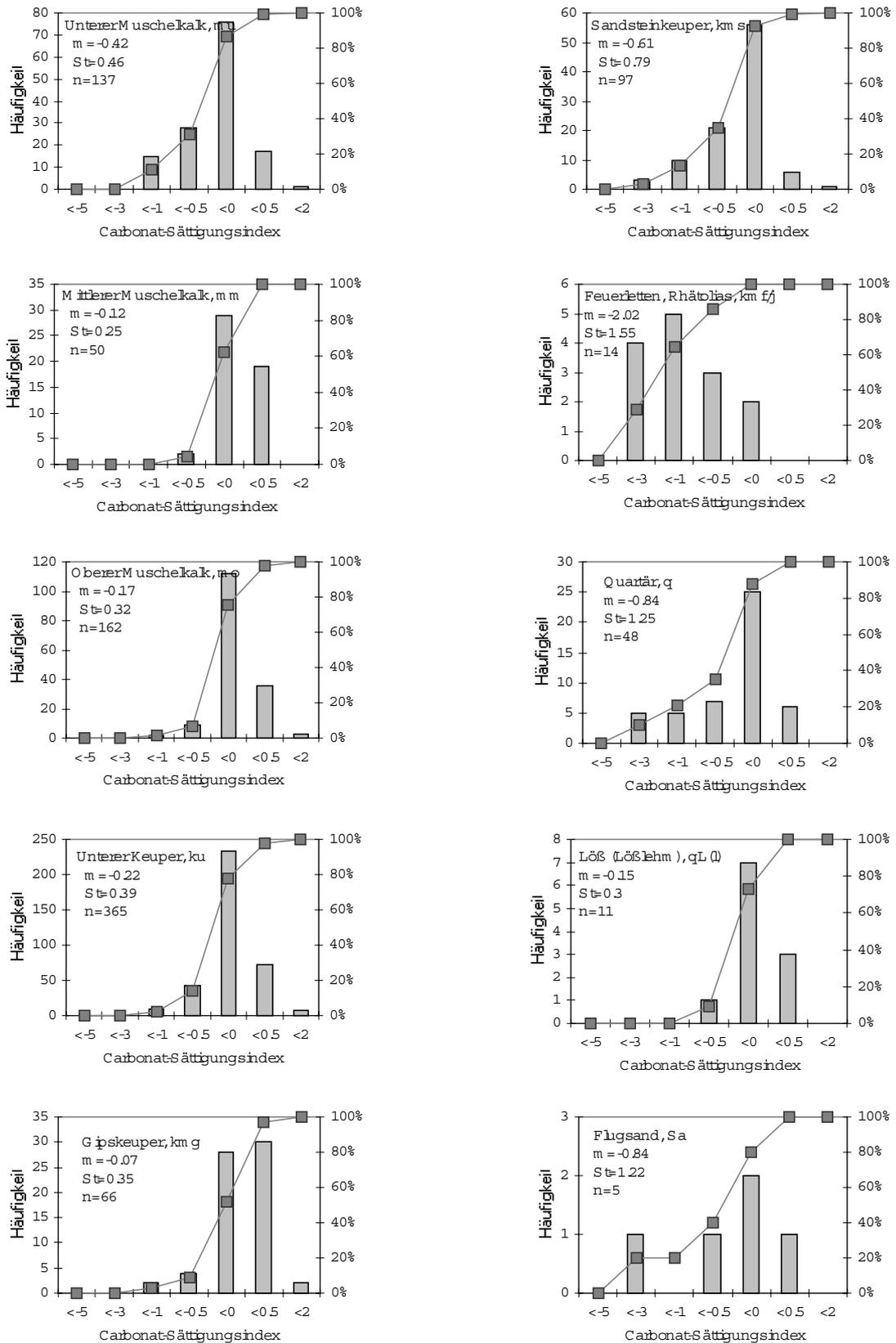


Abb. 6-35: Häufigkeitsverteilung, Mittelwert (m), Standardabweichung (St) und Anzahl (n) der Carbonat-Sättigungsindices, gegliedert nach geologischer Herkunft (mu, mm, mo, ku, kmg, kms, kmf/j, q, qL, Sa) der analysierten Grundwässer.

halten. Die Häufigkeiten der Indexwerte sowie ihre Mittelwerte zeigen, Oberer Buntsandstein ausgenommen, ein deutlich carbonat-untersättigtes Milieu. Jedoch wird auch klar, daß schon ein geringer carbonatischer Sedimentschleier in den Deckschichten durchaus zu nur leicht untersättigten Verhältnissen im jeweiligen Grundwasservorkommen führen kann. Die Extremwerte sorgen bei allen Einheiten für eine vergleichsweise hohe Standardabweichung. Eine besonders auffällige Häufigkeitsverteilung der Indices demonstrieren die Grundwässer des Oberen Buntsandsteins. Dort sind jeweils zwei Maxima festzustellen, die einmal einen leicht untersättigten, von silikatischen Gesteinen dominierenden Bereich von einem (quasi-)gesättigten, tonig-mergelig dominiertem Bereich trennen. Carbonathaltige Deckschichten sowie der hangende Untere Muschelkalk dürften im zuletzt genannten Bereich ebenso einen nicht unerheblichen Einfluß auf den Grundwasserchemismus ausüben. Betrachtet man den Oberen Buntsandstein ohne die Gesellschaft carbonatischer Gesteine (Löß, Unterer Muschelkalk), so sind wohl eher untersättigte Verhältnisse zu erwarten.

Zentraler und östlicher Bereich

Der genannte Bereich umfaßt im wesentlichen die geologischen Einheiten des Muschelkalkes und Keupers. Hinzu kommen noch ausgedehnte Löß- und Flugsanddecken. Bis auf die von Sandsteinen dominierten Bereiche des Keupers und die Flugsanddecken weisen die Diagramme der Abbildung 6-35 prinzipiell auf gesättigte Verhältnisse in den untersuchten Grundwässern hin. Die Mehrzahl der Indices liegen im Bereich zwischen -0,5 und 0. Nur die Grundwässer des Gipskeupers deuten auf eine stärkere Übersättigung hin, was auf den Einfluß der Sulfatgesteine und der damit verbundenen Verschiebung der Gleichgewichtsverhältnisse durch die CaSO_4 -Phasen zurückzuführen ist. Das es auch in den sandsteinbetonten Keupereinheiten nur zu einer leichten Untersättigung in den Grundwässern kommt, bestätigen die im Profilaufbau immer wieder zitierten carbonathaltigen Lagen sowie die Verfügbarkeit ihrer carbonatischen Phasen. Diese fehlen beispielsweise im Rhätsandstein, was auch durch die Analysen der dort beprobten, i. d. R. untersättigten Grundwässer belegt wird.

Die statistischen Verteilung der Standardabweichungen zeigt, daß Schwankungen größer 0,5 pH-Wert-Einheiten sowohl bei gemessenem als auch bei berechnetem pH-Wert nur selten vorkommt. Für die Zugehörigkeit zur Menge AF bedeutet dies, daß der Zugehörigkeitsgrad 1 erst bei Indexwerten größer oder gleich 0,5 statistisch gesichert erscheint. Die Zugehörigkeit wird dann zwischen 0,5 und 0 weniger stark abnehmen, als in Bereichen in denen der Index Werte kleiner 0 vorgibt. Ab einem Index von -0,5 sinkt der Zugehörigkeitsgrad drastisch, da anzunehmen ist, daß kaum Gleichgewichts- oder gar Übersättigungsverhältnisse eintreten werden. Dieser Zusammenhang kann durch eine abschnittsweise Definition der Gleichung nach BOURROUGH (1989) beschrieben werden.

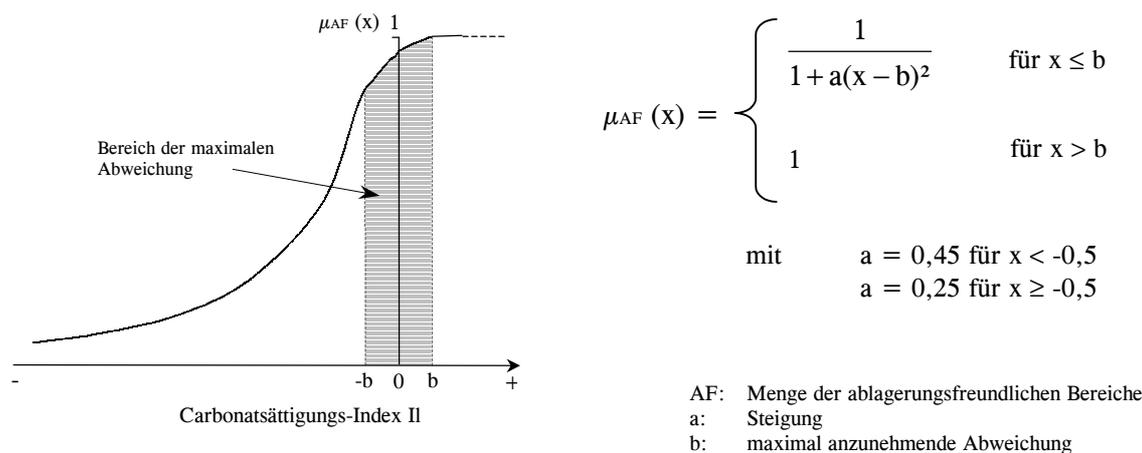


Abb. 6-36: Zugehörigkeitsfunktion Carbonatanteil mit Darstellung des Funktionsgraphen

Tab. 6-10: Repräsentativer Carbonat-Sättigungsindex IL und nach Gleichung in Abb. 6-36 berechneter Zugehörigkeitsgrad $\mu(x)$

Unit	K	z/ro	su	sm	so	mu	mm	mo	ku	kmg	kms	kmf/j	b	q	qL	Sa
IL	-3.17	-0.55	-4.21	-3.74	-1.60	-0.42	-0.12	-0.17	-0.22	-0.07	-0.61	-2.03	-3.13	-0.84	-0.15	-0.84
$\mu(x)$	0.14	0.78	0.09	0.11	0.33	0.82	0.91	0.90	0.89	0.93	0.77	0.26	0.14	0.69	0.90	0.69

Zur Bewertung wurde für jede Geologischen Einheit ein möglichst repräsentativer Carbonat-Sättigungsindex definiert, der gemäß der aufgeführten Gleichung dargestellt in Abbildung 6-36 in Zugehörigkeitswerte, die den Grad der Zugehörigkeit zur Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche bestimmen, umgerechnet wurden (vgl. Tab. 6-10).

7 Synthese

Die Analyse und Darstellung der Ergebnisse unter Kapitel 6 haben gezeigt, daß vor allem die hydrologisch-/hydrogeologischen Milieufaktoren - mit Ausnahme des Gesamtabflusses - nur mit Einschränkung als in sich geschlossene Bewertungskriterien gelten können. Trotz der durchgeführten Quantifizierung, kann in Anbetracht der vielfachen Generalisierung prinzipiell nur eine qualitative Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit eines Gebietes gegenüber Schlackedepositionen erfolgen. Um eine qualitative Gesamtbeurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit eines Gebietes zu erhalten, wurden wichtige Einflußfaktoren miteinander verknüpft. Da für jeden Milieufaktor ein Fuzzy-Set vorliegt, konnten in Abhängigkeit ihrer Aussagen und Beziehungen zueinander verschiedene Kombinationsverfahren angewendet werden. Im Bereich der Fuzzy-Logik bieten sich nach BONHAM-CARTER (1994) eine Reihe von Kombinationsmöglichkeiten an. AN et al. (1991) diskutierten bei der Rohstofferkundung 5 unterschiedliche Operatoren (fuzzy AND, fuzzy OR, fuzzy algebraic product, fuzzy algebraic sum, fuzzy Gamma operator) zur Kombination verschiedenartiger und somit auch ungleich gewichtiger Eingangsdaten. Weitere Kombinationsformen sind in der Arbeit von ZIMMERMANN & ZYSNO (1980) beschrieben. Die Gamma-Operation nach ZIMMERMANN & ZYSNO (1980) scheint im Rahmen dieser Arbeit aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeit am geeignetsten.

Theoretisch existieren zwei unterschiedliche Möglichkeiten die Gamma-Operation einzusetzen. Entweder werden alle Teilmengen (Fuzzy-Sets) gemeinsam in eine einzige Gamma-Operation integriert und damit gleichwertig behandelt oder es werden zunächst Fuzzy-Set-Paare gebildet, die zu gewichteten Zwischenergebnissen führen, welche anschließend in die Gamma-Operation zur Berechnung des Zielwertes eingesetzt werden.

7.1 Fuzzy-Sets Hydrologie-Hydrogeologie

In dieser Arbeit wurde nach dem Schema der Abbildung 7-1 verfahren. Hierbei wurden zunächst die Fuzzy-Sets Gesamtabfluß [fuzAg] und Hangneigung [fuzHn] sowie Quellenposition [fuzQp] und Flußdichte [fuzFd] miteinander kombiniert. Für jedes der beiden Paare wurde festgelegt, welches Fuzzy-Set den maximalen Wert der Kombination bestimmt und wie groß der Einfluß des anderen Fuzzy-Sets auf den entsprechenden Zwischenwert sein soll. Eine vergleichbare Kombinationsform wurde bereits unter Abschnitt 6.1.5 angewendet, indem die ursprüngliche Gamma-Operation modifiziert wurde.

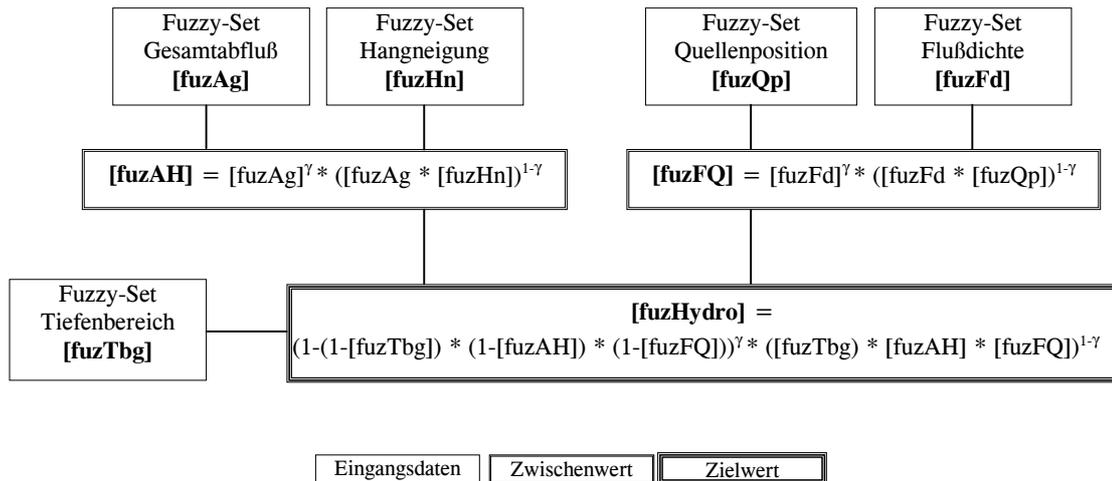


Abb. 7-1: Schema zur Ermittlung der Synthesekarte nach hydrologisch-/hydrogeologischen Faktoren.

7.1.1 Kombination Gesamtabfluß und Hangneigung

Das Fuzzy-Set des Gesamtabflusses [fuzAg] wird als wesentliche Eingangsgröße gesehen und bestimmt daher im Wertepaar den maximal möglichen Wert. Das Fuzzy-Set der Hangneigung [fuzHn] fungiert dabei als dämpfendes Glied. Das Diagramm der Abbildung 7-2 verdeutlicht den funktionalen Zusammenhang zwischen den beiden Fuzzy-Sets und dem Zwischenwert [fuzAH] für unterschiedliche Gamma-Werte. Der maximale Zugehörigkeitsgrad von 0,9 wird je nach Größe des

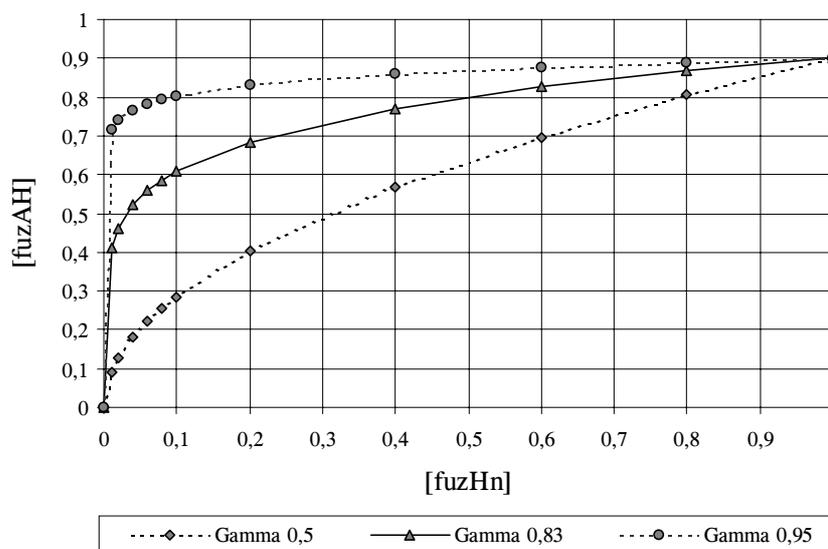


Abb. 7-2: Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Fuzzy-Set Hangneigung [fuzHn] und dem Zwischenwert [fuzAH] bei einem konstanten Wert von 0,9 des Fuzzy-Sets Gesamtabfluß [fuzAg] und variierendem Gamma.

Gamma-Wertes und der Hangneigung unterschiedlich stark gedämpft. Gamma wird nun so gewählt ($\gamma = 0,83$), daß der maximale Zugehörigkeitsgrad von 0,9 (Zwischenwert) bei einem Fuzzy-Wert der Hangneigung von 0,5 auf 0,8 herabsinkt, also die entsprechende Modellzelle gerade noch dem Klassenbereich hohe Ablagerungsfreundlichkeit zuordnet. Vergleicht man nun die Zugehörigkeitsfunktion zur Ermittlung von [fuzHn] (vgl. Abb. 6-5), so wird ein flacher Bereich erst dann bezüglich seiner Ablagerungsfreundlichkeit kritischer eingestuft, wenn das Gebiet einen entsprechend hohen Gesamtabfluß aufweist. Bei einem Gamma-Wert von 0,83 gilt diese Bedingung für Zugehörigkeitsgrade von [fuzAg] < 0,57 respektive für Gesamtabflußwerte größer 400 mm/a. Für Unterfranken sind besonders die Grundwasserlandschaften des Buntsandsteins (Spessart, Odenwald und Rhön) sowie des Kristallinen Vorspessarts davon betroffen. Im Gegensatz dazu werden flache Bereiche bei geringem Abflußwert wesentlich ablagerungsfreundlicher beurteilt als nach der Bewertung nur über die Hangneigung. Ansonsten tritt vor allem bei Hangneigungswerten $> 10^\circ$ eine starke Reduzierung des Zugehörigkeitsgrades ein, selbst bei relativ geringem Abflußwert respektive hohem Zugehörigkeitsgrad.

7.1.2 Kombination Gewässernetzdichte und Quellenposition

Die Gewässernetz- oder auch Flußdichte wird in dieser Kombination als grundlegende Bewertungsgröße definiert, weil sie letztendlich als indirekter Hinweis auf die Durchlässigkeitsverhältnisse des Untergrundes herangezogen werden kann und damit einen zwar generalisierten aber dennoch wichtigen Beurteilungsfaktor darstellt. Die räumliche Lage und Ausdehnung theoretischer Grundwasserbereiche, ermittelt über die Quellenpositionen im zugehörigen Einzugsgebiet, ergänzen das hydrogeologische Bild möglicher Wasserumsätze im Untergrund und werden deshalb zur Modifikation des Fuzzy-Sets [fuzFd] eingesetzt. Ähnlich wie im vorangegangenen Wertepaar fungiert das modifizierende Fuzzy-Set (hier: [fuzQp]) mehr oder weniger als Dämpfungsglied der Zugehörigkeitsfunktion (vgl. Abb. 7-2).

Tab. 7-1: Zuordnung von Fuzzy-Werten (Zugehörigkeitsgrade) für die Quartären Einheiten

Einheit	Kurzzeichen	Fuzzy-Wert nach Flußdichte (Medianwert)	Neuer Fuzzy-Wert nach Expertenwissen
Löß, Lößlehm	qL	0,59	0,8
Talquartär (Schotter)	q	0,67	0,4
Flugsand	Sa	0,75	0,5

Unter Abschnitt 6.1.3 wurde schon angesprochen, daß für die quartären Einheiten Löß, Talquartär und Flugsand keine repräsentativen Werte über die Flußdichteanalyse ermittelt wurden. Daher wird die in der Tabelle 7-1 dargestellte Zuordnung anhand von Expertenwissen und Literaturdaten zu den gesättigten Durchlässigkeitsbeiwerten durchgeführt.

Die Kombination der beiden Fuzzy-Sets erfolgte, wie bereits unter vorherigem Abschnitt, nach der Gamma-Operation. In Abbildung 7-3 sind die prozentualen Flächenanteile der Zugehörigkeitsklas-

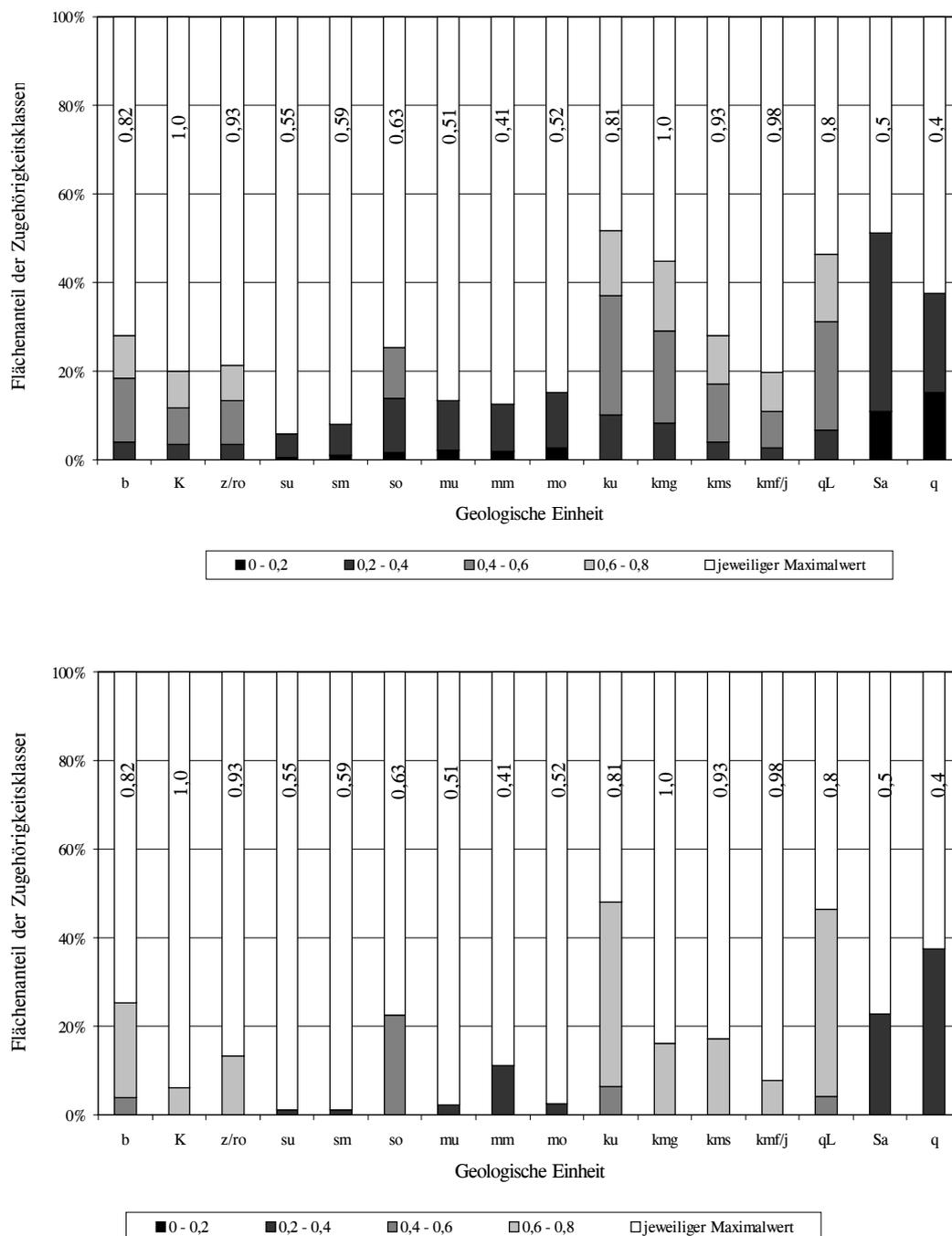


Abb. 7-3: Prozentuale Verteilung der Zugehörigkeitsklassen bezogen auf die Kombination der Fuzzy-Sets Flußdichte [fuzFd] und Quellenposition [fuzQp] nach Schema der Abb. 7-1 mit Gamma = 0,7 (Diagr. oben) und Gamma = 0,9 (Diagr. unten). Die Zahlen in den Balken geben den jeweils maximal möglichen Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF an und entsprechen dem Zugehörigkeitsgrad ermittelt aus der Flußdichte.

sen, bezogen auf die Geologischen Einheiten, nach der Kombination der beiden Fuzzy-Sets mit unterschiedlichem Gamma-Wert dargestellt. Bei $\Gamma = 0,7$ scheint die Dämpfung durch [fuzQp] insbesondere bei den Einheiten des Unteren Keupers und Gipskeupers als zu stark. Deshalb wurde in einer weiteren Analyse für $\Gamma = 0,9$ eingesetzt. Vergleicht man nun die Abbildung 7-2, so wird deutlich, daß durch Wahl eines hohen Gamma-Wertes erst verzögert eine effektive Dämpfung einsetzt, nämlich unabhängig vom Fuzzy-Wert der Flußdichte bei einem Fuzzy-Wert [fuzQp] von 0,4, eine drastische Dämpfung sogar erst ab Werten von $[fuzQp] \leq 0,1$. Das Fuzzy-Set Quellenposition wird sich erst dann auf den Zwischenwert durchgreifend auswirken, wenn oberflächennahe Grundwasserbereiche berechnet wurden. Dies gilt beispielsweise für den Unteren Keuper, bei dem trotz des hohen Gamma-Wertes von 0,9 etwa 50 % der Gesamtfläche kritischer bewertet (vgl. Abb. 7-3) wird als rein nach den Durchlässigkeitsverhältnissen.

7.1.3 Kombination Zwischenwerte und Tiefenbereich

Die Kombination der Zwischenwerte [fuzAH] und [fuzFQ] mit dem Fuzzy-Set des Tiefenbereichs [fuzTbg] führt zur Berechnung eines von den hydrologisch-/hydrogeologischen Milieufaktoren abhängigen finalen Zugehörigkeitsgrades (Zielwert) einer Modellzelle zur Menge AF. Wie aus dem Schema der Abbildung 7-1 ersichtlich, wird jeder Term gleichwertig behandelt. Die Größe von Gamma entscheidet dabei, ob der Funktionswert zum niedrigsten oder höchsten Teilwert ([fuzAH] oder [fuzFQ] oder [fuzTbg]) tendiert oder mehr oder weniger einen Mittelwert aller Teilwerte beschreibt. In diesem Zusammenhang teilte BONHAM-CARTER (1994) den Graphen der Gamma-Operation in drei wesentliche Abschnitte auf, nämlich in einen Bereich, indem der Funktionswert abnimmt (decreasing), sich quasi linear zur Kombination der Teilwerte verhält, und zunimmt (increasing). Daraus leiten sich drei wesentliche Überlegungen für die Wahl Gammas ab:

- restriktiv: Gamma niedrig, Funktionswert tendiert zum niedrigsten Teilwert (z.B. *worst-case*-Studien, herausfiltern besonders ablagerungsfreundlicher Abschnitte)
- alternativ: Gamma mittel, Funktionswert nimmt einen Mittelwert aller Teilwerte ein (alternative Betrachtung)
- affirmativ: Gamma hoch, Funktionswert tendiert zum höchsten Teilwert (man orientiert sich mehr oder weniger stark am günstigsten Fall, herausfiltern besonders gering geeigneter Abschnitte).

Für die vorliegende Bewertung eignet sich in Anbetracht der zugrunde liegenden, vorwiegend qualitativ ausgerichteten Bewertungsfaktoren, ein mittlerer bis hoher Gamma-Wert, zumal es sich hier um eine orientierende Bewertung handelt, die keinesfalls zur nachteiligen Beurteilung großer

Flächen führen soll, sondern zu einer vergleichenden Gegenüberstellung verschiedener Naturräume. Ungeachtet dessen, wurde für mehrere unterschiedliche Gamma-Werte ein Synthese-Grid berechnet und die flächenmäßige Verteilung der *Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad* statistisch ermittelt. Die Änderung des Flächenanteils der einzelnen Klassenbereiche in Abhängigkeit des Gamma-Wertes ist im Diagramm der Abbildung 7-4 veranschaulicht. Es wurde festgestellt, daß insbesondere im Klassenbereich 0 - 0,2 - also für jene Gebiete, die als sehr gering ablagerungsfreundlich eingestuft werden – die Flächenanteile bei einem hohen Gamma-Wert von 0,9 und einem niedrigen von 0,2 sich nur um 13 % unterscheiden. Dies deutet darauf hin, daß alle verwendeten Beurteilungsfaktoren in

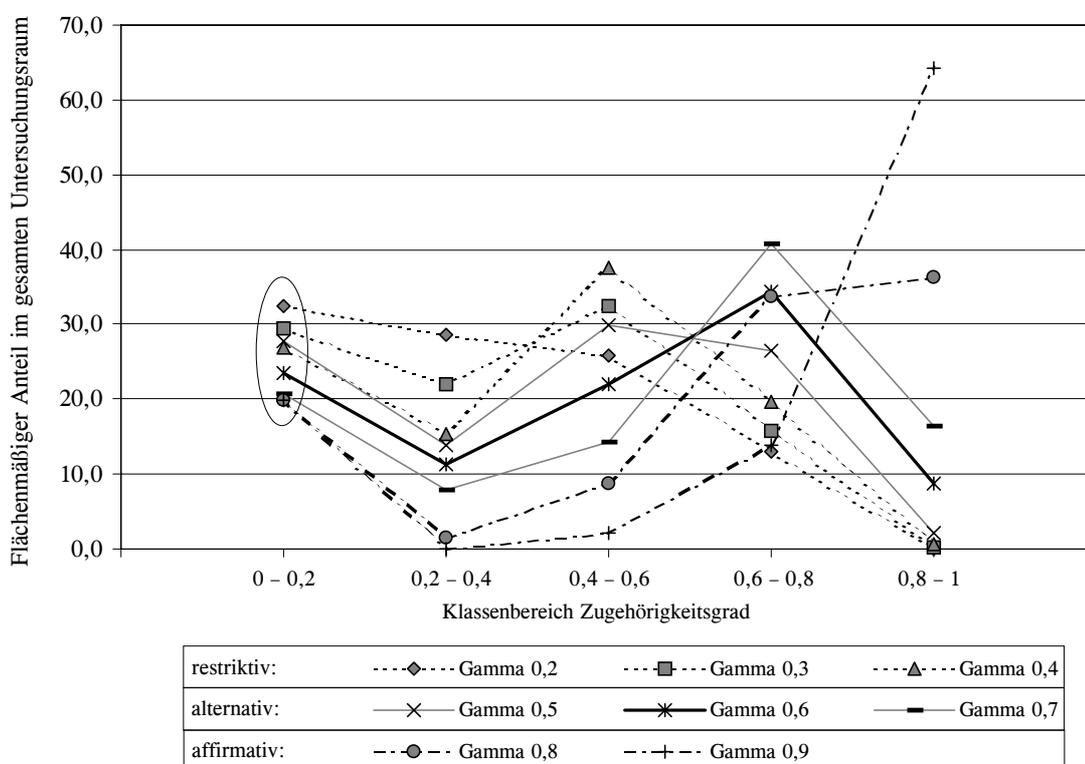


Abb. 7-4: Prozentualer Anteil der Klassenbereiche Zugehörigkeitsgrad an der Gesamtfläche Unterfrankens, unter Kombination aller Beurteilungsfaktoren mit der Gamma-Operation nach ZIMMERMAN & ZYSNO (1980), bei variierendem Gamma zwischen 0,2 bis 0,9.

den zugehörigen Gebietsabschnitten einen mehr oder weniger gleichsam geringen Fuzzy-Wert aufweisen, denn sonst würden die Flächenanteile dieses Klassenbereichs bei unterschiedlich hohem Gamma-Wert deutlicher auseinander liegen. Gegensätzlich verhält sich der Klassenbereich 0,8 - 1, wo bereits ein hoher Teilwert zu einem vergleichsweise hohem Zielwert führt. Wenn man sich die Graphen in Abbildung 7-4 betrachtet, dann zeigt sich für den Klassenbereich 0,8 - 1 ein deutlicher Unterschied in der Flächenverteilung, er beträgt im Extremfall (Gamma gleich 0,2 und 0,9) 65 %. Das Ergebnis belegt, daß für den gesamten Untersuchungsraum etwa 60% aller Modellzellen minde-

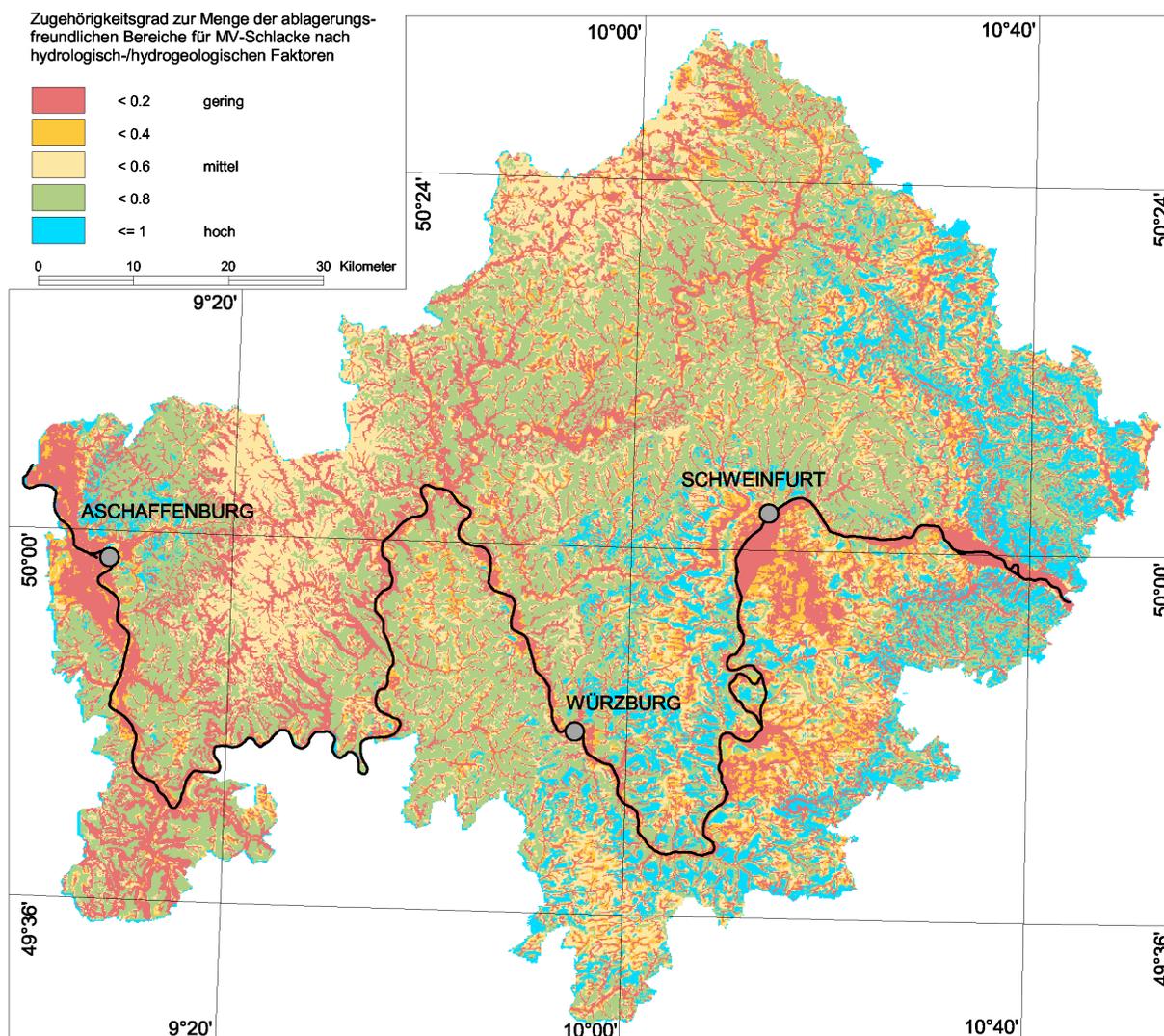


Abb. 7-5: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF*, ermittelt aus jährlichem Gesamtabfluß, Hangneigung, Flußdichte (Untergrunddurchlässigkeit), Quellenpositionen und Tiefenbereiche. Die Synthesekarte [fuzHydro] wurde unter Verwendung der Gamma-Operation nach ZIMMERMANN & ZYSNO (1980) mit $\Gamma = 0,6$ berechnet (Über die Berechnung der Einzelkarten siehe Text).

stens einen hohen Teilwert als Attribut enthalten. Für etwa 20% aller Teilflächen trifft zu, daß ihnen über alle Beurteilungsfaktoren hinweg ein vergleichsweise geringer Zugehörigkeitsgrad zugeordnet wird.

Bezieht man nun die Flächenverteilung der Klassenbereiche auf die geologischen Einheiten Unterfrankens (vgl. Abb. 7-6), so wird bei $\Gamma = 0,6$ nur für die Einheiten des Keupers, des Kristallins und Zechsteins im Spessart sowie der Lößareale eine flächenmäßige Beteiligung des Klassenbereichs mit einem hohen Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF verzeichnet. Dabei dürfte der Sandsteinkeuper (kms), vor allem gegenüber dem Gips- und Unteren Keuper, etwas überbewertet sein, was wohl auf die dort weniger ausgedehnten Tiefenbereiche zurückzuführen ist. Der kritische Klassenbereich mit Zugehörigkeitsgraden zwischen 0 und 0,4 nimmt flächenmäßig besonders im Verbrei-

sandstein aufgrund seiner hydrologischen Position etwas günstiger eingestuft wurde. Eine mittlere Position in der Rangfolge nehmen die Einheiten Sandsteinkeuper, Oberer Muschelkalk und Kristallin ein.

Tab. 7-3: Berechnung der Rangfolge der geologischen Einheiten bezogen auf die Ablagerungsfreundlichkeit aus hydrologisch-/hydrogeologischer Sicht.

Gewichtung der Klassenbereiche AF		Berechnung der Rangfolgeziffer: flächenbezogener Faktor x hydrogeologischer Faktor			
		Geologische Einheit	flächenbezogener Faktor	hydrogeologischer Faktor	Rangfolgeziffer
0 - 0,2	1-fach				
0,2 - 0,4	2-fach	b	3.0	2	6.0
0,4 - 0,6	3-fach	K	3.4	5	17.2
0,6 - 0,8	4-fach	z/ro	2.9	4	11.7
0,8 - 1	5-fach	su	2.5	2	5.1
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Für jede geologische Einheit wird der relative Flächenanteil einer AF-Klasse mit dem entsprechenden Gewichtungsfaktor multipliziert. Anschließend erfolgt eine Summation der Werte, so daß für jede Einheit ein flächenbezogener Bewertungsfaktor zur Verfügung steht. ▪ Der hydrogeologische Faktor ergibt sich aus dem durchschnittlichen Anteil geringdurchlässiger Ton-, Schluff- und Tonmergelsteine und der Beurteilung typischer Grundwasservorkommen (bezüglich ihrer Lage und Ausdehnung) der aufgeführten Einheiten; Ein hoher Anteil geringdurchlässiger Gesteine ergibt einen hohen Faktor. Zur Bewertung von Grundwasservorkommen bzw. Grundwasserbereichen siehe Abschnitt 6.1.4.1 Theoretische Grundwasserbereiche. 		sm	2.8	2	5.6
		so	3.1	7	21.8
		mu	2.9	4	11.6
		mm	2.7	2	5.4
		mo	3.2	5	15.8
		ku	3.3	9	29.5
		kmg	3.1	10	31.1
		kms	3.7	5	18.4
		kmf/j	4.3	8	34.0
		qL	3.0	7	21.0
		Sa	1.9	2	3.8
		q	1.5	2	3.0

Sie zeigen für weite Flächen hydrologisch günstige Bedingungen an, jedoch mit wechselnden hydrogeologischen Verhältnissen bezüglich der Grundwasserbereiche und Verteilung geringdurchlässiger Gesteine. Zechstein und Unterer Muschelkalk zeigen gemäß ihres Ranges weniger günstige Ablagerungsbedingungen an, was einerseits auf die Verteilung der Klassenbereiche zurückgeht, andererseits auf die allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse (Verkarstung, empfindliche Grundwasserbereiche). Im Rang sehr weit hinten folgen Ausstrichgebiete des Unteren- und Mittleren Buntsandsteins, des Mittleren Muschelkalkes sowie die Bereiche der Flugsanddecken und quartären Talschotter. Für diese Bereiche spielen die ungünstigen Untergrundeigenschaften (relativ hohe Durchlässigkeiten) ebenso eine Rolle, wie gleichsam ungünstige hydrologische Positionen und Grundwasserhältnisse. Für den Mittleren Muschelkalk spielt dabei auch die Verkarstung eine wesentliche Rolle.

7.2 Fuzzy-Sets Hydrogeochemie

Die Kombination der Fuzzy-Sets Hydrogeochemie erscheint vergleichsweise einfach, da nur zwei Faktoren hierfür herangezogen werden. Wie aus dem unter Abschnitt 6.2 erläuterten Sachverhalt handelt es sich hierbei einerseits um Vorkommen und Verteilung carbonatischer Materialien und andererseits um die Carbonatsättigung oberflächennaher Grundwässer. Beide orientieren sich, was ihre räumliche Beurteilung angeht, sehr stark an der Verbreitung der einzelnen geologischen Einheiten.

Da der Anteil carbonatischer Spezies (im weiteren Carbonatanteil) am Aufbau des Untergrundes letztendlich über die Versorgung oberflächennaher Deckschichten mit carbonatischen Verwitterungsprodukten auch über längere Zeiträume hinweg entscheidet, kommt ihm wohl das größere Gewicht bei der Beurteilung zu, zumal die Beschaffenheit der Grundwässer bezüglich der Carbonatsättigung auch noch in oberflächenferneren Bereichen erheblich beeinflusst werden kann. Der Carbonat-Sättigungsindex kann jedoch zusätzlich als Maß, für die zu erwartenden Milieubedingungen im jeweiligen Einzugsgebiet gesehen werden, bei keiner oder nur belangloser Veränderung der Randbedingungen. Er zeigt auch, inwieweit die carbonatische Spezies für die infiltrierenden Sicker- und Grundwässer verfügbar ist. Er ist von Bedeutung, da er die Summe aller vorkommenden Geologischen Einheiten (Untereinheiten), die auf die Beschaffenheit der Grundwässer innerhalb eines Einzugsgebietes einwirken, widerspiegelt. Hierdurch schafft er eine zusätzliche regionale Komponente, die allein durch die nüchterne Betrachtung des geologischen Aufbaus nicht gegeben wäre. So macht sich beispielsweise eine carbonatführende, geringmächtige Deckschicht auch in einem Bereich mit überwiegend geringfügig puffernden Gesteinseinheiten im Grundwasserchemismus bemerkbar.

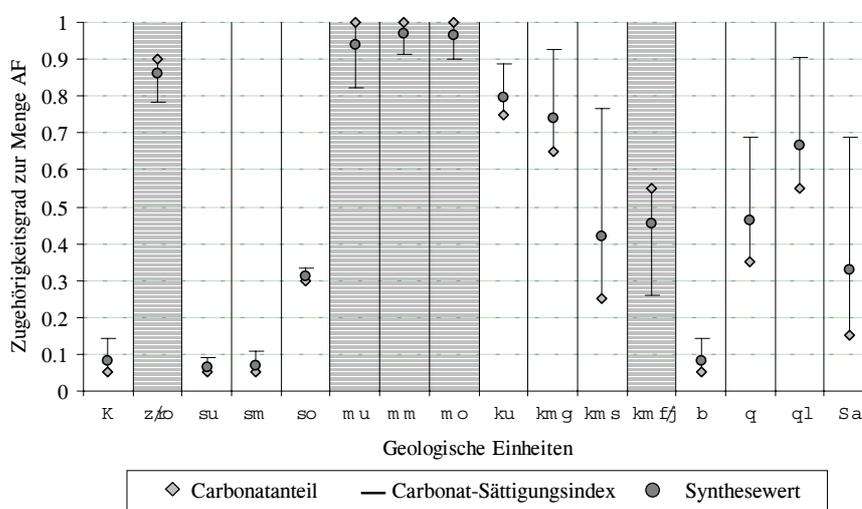


Abb. 7-7: Vergleich zwischen den Fuzzy-Sets Carbonatanteil und Carbonat-Sättigungsindex. Die grau schattierten Bereiche markieren jene Geologischen Einheiten, bei denen der Carbonat-Sättigungsindex eine Reduzierung des Zugehörigkeitsgrades bewirkt. Die Punkte markieren den jeweiligen Synthesewert, berechnet nach der Gleichung: $[\text{fuzHychem}] = ([\text{fuzCa}] * 2) + [\text{fuzCsi}] / 3$.

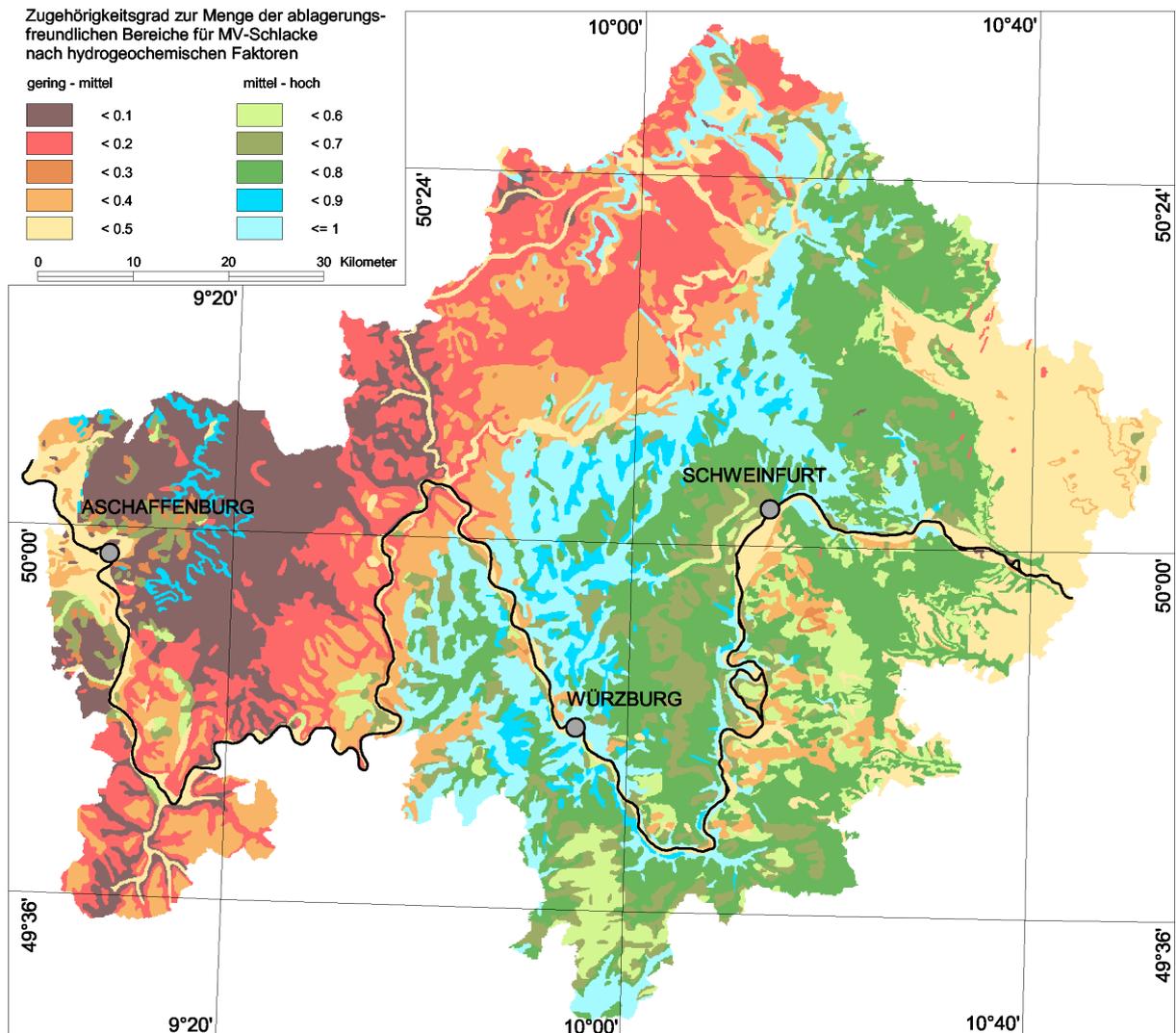


Abb. 7-8: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche *Zugehörigkeitsgrades zur Menge AF*, ermittelt aus dem Anteil carbonatischer Materialien am Normalprofil der geologischen Einheiten und dem Carbonat-Sättigungsindex oberflächennaher Grundwässer. Die Berechnung der Synthesekarte erfolgte nach der im Text, Abschnitt 7.2 dargestellten Gleichung.

Im Diagramm der Abbildung 7-7 ist dargestellt, welche Unterschiede sich zwischen den Fuzzy-Sets des Carbonatanteils [fuzCa] und des Carbonat-Sättigungsindex [fuzCSi] im Bezug auf die geologischen Einheiten zeigen. Gleichzeitig wurde ein Synthesewert [fuzHychem] ermittelt, der sich nach der folgenden einfachen Gleichung berechnet:

$$[\text{fuzHychem}] = (([\text{fuzCa}] * 2) + [\text{fuzCSi}]) / 3$$

Wie aus der Gleichung ersichtlich, wurde das Fuzzy-Set des Carbonatanteils doppelt bei der Berechnung des modifizierten, arithmetischen Mittelwertes berücksichtigt und damit stärker gewichtet.

Als Ergebnis kann nun festgehalten werden, daß aus hydrogeochemischer Sicht besonders die Ausstrichbereiche der Muschelkalkeinheiten und im weiteren auch die des Unteren und Gipskeupers günstige Milieubedingungen für eine Schlackeablagerung bieten. Eine Modifikation erfolgt dort dann, wenn zusätzliche Deckschichten wie Löß, Lößlehm und Flugsand nachgewiesen sind. Prinzipiell zählen hierzu auch die Verbreitungsgebiete der Zechsteinsedimente, wobei diese immer im Kontext ihrer siliziklastischen bzw. kristallinen Nachbareinheiten zu beurteilen sind. Weniger günstige Ablagerungsbedingungen bieten sich im Bereich des Oberen Buntsandsteins, des Sandsteinkeupers und der Feuerletten bzw. Rhät-Lias-Übergangsschichten, was vor allem auf die anteilmäßige Zunahme siliziklastischer Sedimente zurückzuführen ist. Besonders ungünstig erweisen sich erwartungsgemäß die Ausstrichbereiche des Kristallins im Vorspessart und des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Odenwald, Spessart und Rhön bzw. Rhönvorland (vgl. Abb. 7-8).

7.3 Synthese

Im Rahmen der folgenden Synthese wurden die Resultate [fuzHydro] und [fuzHychem] obiger Kartenverschneidungen miteinander kombiniert. Die Verschneidung erfolgte mittels der bereits vorgestellten Gamma-Funktion. Das Bestreben lag in einer alternativen Betrachtung und führte damit zur Wahl eines mittleren Gamma-Wertes von 0,6. Ein mittlerer Gamma-Wert gewährleistet, daß einmal als ungünstig eingestufte Bereiche innerhalb einer Teilmenge durch Verschneidung mit der anderen Teilmenge keine durchgreifende Aufwertung erfahren. Dies gilt z. B. für die als Tiefenbereiche aus

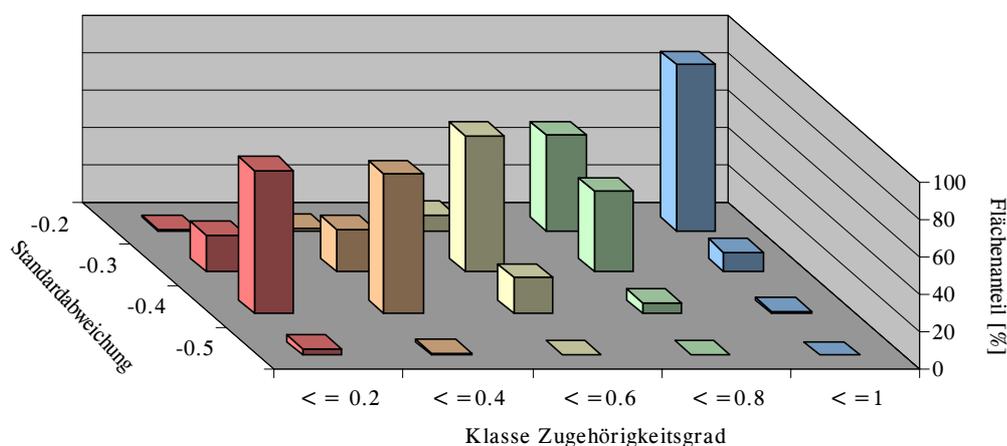


Abb. 7-9: Standardabweichung zwischen den Werten der einzelnen Fuzzy-Sets. Für die im Diagramm dargestellte Verteilung wurde für jede Modellzelle die Standardabweichung aller berechnet und bezogen auf die Klassenbereiche *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF* einer Häufigkeitsanalyse unterzogen.

gewiesenen, durch geringe Zugehörigkeitsgrade charakterisierten Gebiete. Das Ergebnis der Verschneidung ist in der Abbildung 7-10 dargestellt.

Bisher wurden in den einzelnen Kapiteln und Abschnitten umgangssprachliche Formen zur Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit verschiedener Naturräume gegenüber Schlackedepositionen gebraucht. Ausschlaggebend waren dabei die jeweils berechneten Fuzzy-Sets, die den Zugehörigkeitsgrad jeder einzelnen Modellzelle zur Menge der für MV-Schlacke ablagerungsfreundlichen Bereiche angeben. Anhand der vorliegende Synthese soll nun die sprachliche Form der Beurteilung festgelegt und erläutert werden. Zur Klasseneinteilung wurde der Wertebereich der Fuzzy-Sets, unterteilt in 5 Klassen, herangezogen. In der Tabelle 7-4 erfolgt die Zusammenstellung der Beurteilungsstufen und zugehöriger Aussagen.

Tab. 7-4: Qualitative Beurteilungsstufen im Vergleich

Zugehörigkeitsgrad zur Menge der für MV-Schlacke ablagerungsfreundlichen Bereiche	Ablagerungsfreundlichkeit gegenüber Schlackedepositionen	Eignung des Naturraums gegenüber Schlackedepositionen	Bedeutung
0 - 0,2	gering	ungeeignet	Diese Gebiete erscheinen nach den Betrachtungen der Arbeit prinzipiell als ungeeignet für eine Schlackeablagerung, da mindestens ein wesentlicher Faktor einen geringen Zugehörigkeitsgrad aufweist. Das Berechnungsverfahren ist so angelegt, daß insbesondere Bereiche mit hydrologisch ungünstigen Positionen diesen Klassenbereich bestimmen. Hierunter fallen neben den Talräumen (Tiefenbereiche) auch die aus geotechnischer Sicht ungünstigen Hangbereiche.
0,2 - 0,4	gering bis mittel	wenig geeignet	Die Mehrzahl der Faktoren erreichen auch hier nur geringe Zugehörigkeitsgrade, was zur Ausweisung für Schlackeablagerung wenig geeigneter Gebiete führt. Vom Klima und der Geologie abhängige Faktoren sorgen dabei für eine flächenhafte Verbreitung des Klassenbereichs. Hierzu zählen vor allem die Naturräume Hochspessart, Rhön, Vorspessart und Odenwald. Mit Hinweis auf die Abb. 7-10 werden, wie unter Klassenbereich 0 - 0,2, deutliche Standardabweichungen zwischen den einzelnen Faktoren beobachtet, was zum einen auf die Variation möglicher Zugehörigkeitsgrade einer einzelnen Modellzelle hinweist, zum anderen aber den Einfluß der Faktoren auf den Synthesewert unterstreicht, aus denen sich gebietsspezifisch ein geringer Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF ableitet.
0,4 - 0,6	mittel	bedingt geeignet	In diesem Klassenbereich besteht ein vergleichsweise ausgewogenes Verhältnis zwischen den abgeleiteten Zugehörigkeitsgraden der einzelnen Faktoren, was die Verteilung der Standardabweichungen zwischen den ermittelten Zugehörigkeitsgraden belegt (vgl. Abb. 7-10). Prinzipiell wird kein einzelner Faktor einen höheren Zugehörigkeitsgrad erreichen, was letztendlich auf die nur bedingte Eignung dieser Gebiete als Ablagerungsräume hinweist. Hierzu zählen im wesentlichen weite Teile der Austrichbereiche des Oberen Buntsandsteins und der mehr oder weniger sandig ausgebildeten Keuperflächen.
0,6 - 0,8	mittel bis hoch	geeignet	Aus der Mehrheit der Beurteilungsfaktoren leitet sich bereits ein höherer Zugehörigkeitsgrad ab, was sich schließlich im Sinne der Ablagerungsfreundlichkeit positiv auf den Synthesewert auswirkt. Die Verteilung der Standardabweichung belegt die vergleichsweise geringen Abweichungen zwischen den Zugehörigkeitsgraden der einzelnen Faktoren (vgl. Abb. 7-10). Dies gilt hauptsächlich für die Bereiche des Muschelkalkes, des Unteren und Gipskeupers und der carbonatischen Lößdecken.
0,8 - 1	hoch	gut geeignet	Die höchste Beurteilungsstufe wird dann erreicht, wenn für die Mehrzahl der Faktoren ein hoher und für den Rest mindestens ein mittlerer Zugehörigkeitsgrad vorliegt. Die geringen Abweichungen bei der Standardabweichung zwischen den einzelnen Faktoren deuten auf den oben genannten Umstand hin (vgl. Abb. 7-10). Zu den für Schlackeablagerung gut geeigneten Gebieten zählen Teilbereiche des Muschelkalkes, Unteren Keupers und Gipskeupers, allerdings immer jenseits der Talgebiete und oberflächennahen Grundwasserbereiche sowie ungünstiger Hangabschnitte.

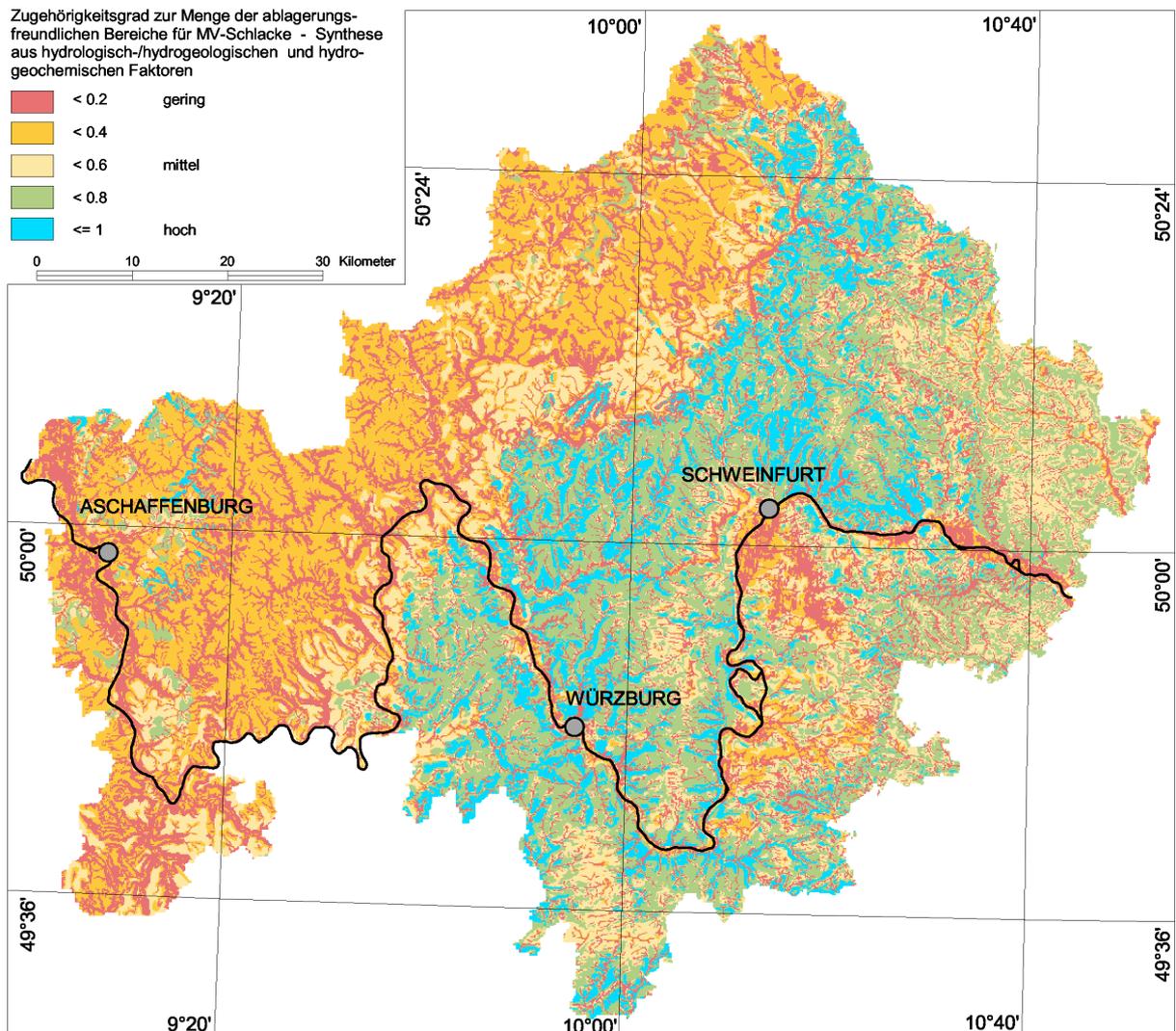


Abb. 7-10: Räumliche Verteilung der Klassenbereiche *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF* verschiedener Naturräume in Unterfranken – Synthesekarte, ermittelt aus den Fuzzy-Sets hydrologisch-/hydrogeologischer und hydrogeochemischer Faktoren. Zur Bildung und Verknüpfung der einzelnen Fuzzy-Sets siehe insbesondere Abschnitte 7.1 und 7.2.

Als Besonderheit läßt sich feststellen, daß nach dem Berechnungsverfahren im Gebiet des Muschelkalkes ein vergleichsweise hoher Flächenanteil mittlere bis gute Ablagerungseigenschaften aufweist. Dies hängt vor allem zusammen mit dem durchwegs carbonatischen Charakter der gesamten Abfolge. Bei der Berücksichtigung lokaler hydrogeologischer Verhältnisse (z. B. Grad der Verkarstung, Durchlässigkeitsverhältnisse, Deckschichtenmächtigkeiten) sind, wie bereits bei der Ermittlung der Rangfolge nach hydrologisch-/hydrogeologischen Gesichtspunkten (vgl. Tab. 7.2 und 7.3), Einschränkungen bezüglich der Ablagerungseignung zu erwarten.

7.4 Sensitivitätsanalyse

Unter Sensitivitätsanalyse versteht man im allgemeinen die Analyse der Wirkung einzelner Parameter innerhalb eines Vorganges und hier im speziellen der Bewertungsfaktoren innerhalb der Berechnungsmethode zur qualitativen Beurteilung einer Modellfläche (Modellzelle) hinsichtlich ihrer Zugehörigkeit zur Menge der für Schlackedepositionen ablagerungsfreundlichen Bereiche.

GROSSMANN & LANGE (1999) ermittelten z. B. im Rahmen von Grundwasserneubildungsverfahren aus Niederschlag die Sensitivität der innerhalb des Berechnungsvorganges benutzten Parameter auf den Zielwert durch ihre natur- und meßfehlerbedingten Variationen. Diese Art der Analyse kann im vorliegenden Fall nur unter einem erheblichen Aufwand realisiert werden, da im Prinzip jeder Parameter, der zur Berechnung der Beurteilungsfaktoren herangezogen wurde, gesondert betrachtet und ausgewertet werden müßte. Da in der angewendeten Fuzzy-Logik die Unschärfe der Wirkgrößen bereits einget, wurde auf eine detaillierte Sensitivitätsanalyse verzichtet. Stattdessen wurde lediglich die raumbezogene Abweichung jedes Faktors vom Synthese- bzw. Zielwert untersucht und dargestellt (vgl. Abb. 7-12). Es muß jedoch angesprochen werden, daß die statistisch ermittelten

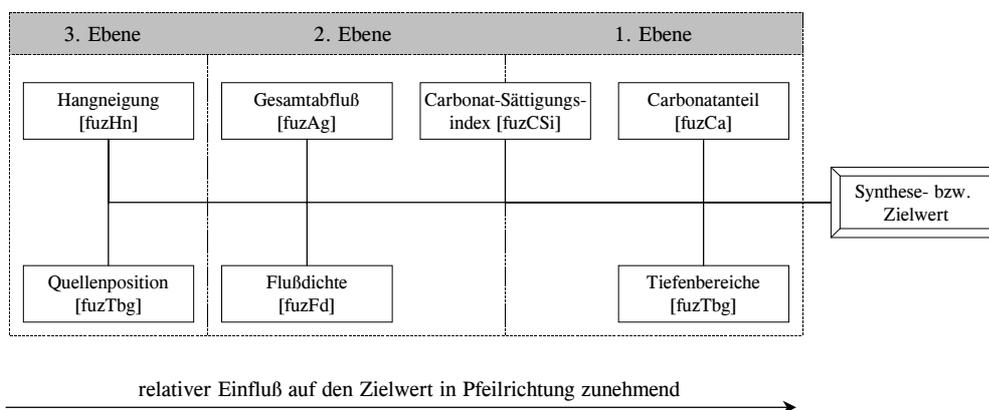


Abb. 7-11: Hierarchische Rangfolge der Faktoren, die auf die Berechnung des Synthese- bzw. Zielwertes gemäß ihrer Stellung unterschiedlich starken Einfluß ausüben. Da für alle Berechnungsschritte die Gamma-Funktion verwendet wurde (z. T. in abgewandelter Form), können durch Variation von Gamma und Stellung der einzelnen Faktoren innerhalb des Berechnungsvorganges unterschiedliche Sensitivitäten dieser auf den Zielwert erreicht werden.

Abweichungen nicht immer einen kausalen Zusammenhang haben müssen und deshalb nur bedingt die Sensitivität eines Faktors auf den Zielwert widerspiegeln. Würde man eine Sensitivitätsrangfolge rein nach den durchgeführten Berechnungsschritten entwickeln, so ergibt sich ein, wie in Abbildung 7-11 hierarchisch angelegtes Schema.

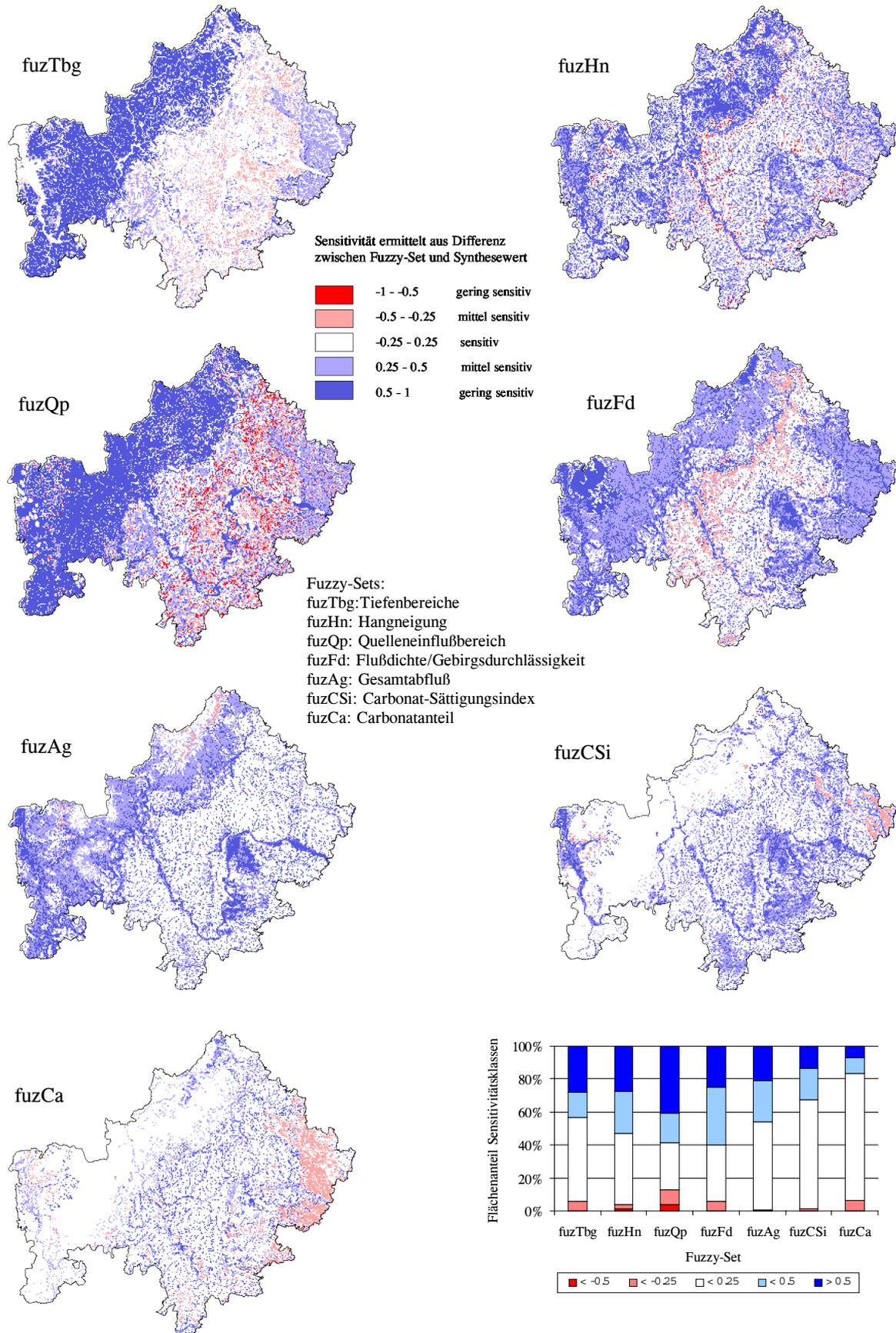


Abb. 7-12: Abweichungen der einzelnen Fuzzy-Sets vom Synthese- bzw. Zielwert, berechnet für jede Modellzelle. Die Darstellung zeigt ihre Häufigkeiten und räumlichen Verteilungen in Unterfranken.

Die Verteilung der Abweichung der einzelnen Fuzzy-Sets vom Synthesewert (vgl. Abb. 7-12) vermittelt einen hohen Abhängigkeitsgrad dessen von den Faktoren Carbonatanteil und Carbonat-Sättigungsindex. Berücksichtigt man ebenso die vergleichsweise geringe räumliche Ausdehnung der Tiefenbereiche, so wirkt gleichnamiger Beurteilungsfaktor ebenso sensitiv innerhalb des Berechnungsvorganges. Gering erscheint der Abhängigkeitsgrad des Zielwertes von den Faktoren Quellenposition und Flußdichte, was eindeutig auf die Stellung dieser innerhalb des Berechnungsvorganges zurückzuführen ist. Gleiches würde man für die Faktoren Hangneigung und Gesamtabfluß erwarten, die jedoch aufgrund ihrer räumlichen Ausprägung häufig ein ähnliches Wertespektrum beschreiben wie die Faktoren der 1. Ebene und daher nicht so stark vom Zielwert abweichen wie es vielleicht nach dem Berechnungsvorgang zu erwarten wäre. Dabei ist ebenso zu erwähnen, daß aus Darstellungsgründen und im Hinblick der z. T. sehr unterschiedlichen Maßstäbe zwischen den einzelnen Faktoren Filteroperationen angewendet wurden, die abschnittsweise zur Elimination von Detailinformation geführt und damit die Verteilung der Abweichungen statistisch verändert haben.

8 Zusammenfassung und Schlußbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Die Beurteilung einer Ablagerung erfolgt heute in erster Linie nach dem Stoff, der abgelagert werden soll. So erfährt jedes abzulagernde Material eine Einstufung nach allgemein gültigen Verordnungen, Regeln und Richtlinien auf Grundlage des feststofflichen Inhaltes und der Auslaugungseigenschaften unter konstanten Randbedingungen. Unter Berücksichtigung einheitlich gefaßter, hydrogeologischer Standortkriterien, darf das Material entsprechend abgelagert oder im weiteren Sinne auch verwertet werden. Auffällig scheint bei dieser Vorgehensweise, daß eine differenzierte Betrachtung der Stoffflüsse zwischen Ablagerung und Naturraum ausbleibt, was gleichsam bedeutet, daß eine notwendige Unterscheidung spezifischer Naturräume prinzipiell nicht vorgenommen wird. Je nach den hydrologischen, hydrogeologischen und geochemischen Bedingungen, wird jedoch mit zunehmender Dauer jeder Naturraum verschieden empfindlich auf eine Ablagerung reagieren. Es erscheint daher recht zweifelhaft, ob die herkömmliche Verfahrensweise bei der Ablagerung von Reststoffen als nachhaltig zu bezeichnen ist. Nach BACCINI et al. (1994) erfordert eine nachhaltig umweltgerechte Reststoffablagerung, daß diese zusammen mit der Ablagerungsumgebung ein langfristig stabiles und nahezu immissionsneutrales Verhalten gewährleisten. Vor diesem Hintergrund kommt der differenzierten Betrachtung verschiedener Naturräume als Ablagerungsumgebung eine bedeutende Rolle zu. Insbesondere der geologische Aspekt muß bei einer langfristigen Einschätzung von Ablagerungssystemen eine wichtige Bewertungskomponente darstellen.

Vergleicht man die durchschnittlichen Zusammensetzungen von Schlacken und Gesteinsmaterialien, so wird deutlich, daß mit der Schlacke ein vergleichsweise naturnaher Reststoff zur Ablagerung oder Verwertung ansteht. Das Gefährdungspotential der Schlacke liegt vor allem in den allgemein erhöhten Schwermetallkonzentrationen. Der hohe Anteil instabiler Phasen verleiht der Schlacke zudem ein hochreaktives Potential, das allerdings während der Alterung (Verwitterung) durch zahlreiche Prozesse, die diese Reaktivität bedingen, wie z. B. Hydratation und Carbonatisierung, verhältnismäßig schnell abgebaut wird. Aufgrund ihrer physiko-chemischen Eigenschaften stellt die Schlacke somit spezifische Anforderungen an den Ablagerungs- bzw. Verwertungsstandort. Bei der Ablagerung erscheint es generell unerheblich, ob technische Sicherungsmaßnahmen unternommen werden, denn diese leisten einen nur zeitlich befristeten Schutz.

Zahlreiche Untersuchungen zum chemischen Verhalten der Schlacke im allgemeinen (z. B. BACCINI et al., 1994; JOHNSON, 1994) und zum Ablagerungsverhalten unter Deponiebedingungen im speziellen (z. B. KERSTEN et al., 1995; HIRSCHMANN & FÖRSTNER, 1997; HUBER et al., 1997) lassen

den Schluß zu, daß die langfristige Entwicklung der Schlacke maßgeblich vom Stoffein- und austrag beeinflußt wird und prinzipiell durch die Wahl geeigneter Ablagerungsmilieus gesteuert werden kann. Von Bedeutung sind im wesentlichen der Wasserumsatz innerhalb und im Nahbereich des Schlackekörpers sowie die Qualität der in- und exfiltrierenden Sickerwässer. Daraus ergibt sich letztendlich eine Vielzahl unterschiedlicher Umgebungsfaktoren, die sich in ihrer Relevanz für eine Bewertung der Ablagerungseignung einer natürlichen Umgebung unterscheiden.

In der vorliegenden Arbeit wurden Umgebungsfaktoren gewählt, die auf Grundlage der verfügbaren Datenbasis eine Differenzierung verschiedener Naturräume Unterfrankens bei der Bewertung zuließen, wobei dem Schutz des Grundwassers hierbei besondere Bedeutung zukam.

Der Wasserumsatz im Bereich des abgelagerten Reststoffes Schlacke spielt eine entscheidende Rolle. Alle standortbedingten Einflüsse, die sowohl hohe Mengen als auch hohe Verweilzeiten von Sickerwasser in der Schlacke provozieren, vermindern die Ablagerungsfreundlichkeit der Ablagerungsumgebung, da sie verstärkt zur Auswaschung und -laugung potentieller Schadstoffe aus der Schlacke beitragen können. Für die qualitative Bewertung der Ablagerungseignung aus hydrologisch-/hydrogeologischer Sicht wurden neben dem aus der klimatischen Bilanz ableitbaren Gesamtabfluß morphologische Faktoren wie Hangneigung und Tiefenbereich räumlich zueinander in Bezug gesetzt. Gebiete mit hohen Gesamtabflußraten, Hangversteilungen sowie im allgemeinen die Tiefenbereiche zeigen geringe Ablagerungsfreundlichkeit an. Den Tiefenbereichen kommt besondere Gewichtung im Bewertungsprozeß zu, da sie im Vergleich zur Umgebung geringere Grundwasserflurabstände anzeigen und generell als Sammelstellen ober- und unterirdischen Wassers gelten.

Über die Gewässernetzdichte nach der TK25 konnten typische Durchlässigkeitsverhältnisse für die einzelnen geologischen Einheiten angenommen und entsprechend beurteilt werden. Hohe Gewässernetzdichten zeigen vor allem Gebiete mit gering durchlässigen Deckschichten, aber auch solche, die aufgrund ihres Untergrundaufbaus dazu neigen, kleinräumige Grundwasservorkommen zu bilden und diese über Quellaustritte seitlich zu entwässern und dem Gewässernetz zuzuführen.

Anhand der räumlichen Verteilung von Quellen, Flachbrunnen und Gewässerursprüngen nach der TK25 konnten im Bezug zur Geländeoberfläche theoretische Grundwasserbereiche stellvertretend für die lokalen Grundwasserflurabstände berechnet und in die Bewertung integriert werden.

Aus hydrologisch-/hydrogeologischer Sicht bieten günstigere Ablagerungsbedingungen für Schlacke vor allem die Austrichbereiche jenseits der Täler- und Tiefenbereiche im Verbreitungsgebiet der Feuerletten, des Unteren- und Gipskeupers, der Löß- und Lößlehmdecken und untergeordnet des Oberen Muschelkalkes, Oberen Buntsandsteins und Kristallins. Als weniger günstig sind vor allem die Gebiete des Unteren- und Mittleren Buntsandsteins, des Unteren- und Mittleren Muschelkalkes sowie der Flugsanddecken und Quartären Schüttkörper zu sehen.

Zur qualitativen Einschätzung der hydrogeochemischen Bedingungen in der Grundwasserüberdeckung, wurden einerseits geochemische, andererseits hydrochemische Betrachtungen angestellt. Für

Schlackebalagerungen günstige Bedingungen können, insbesondere nach den Untersuchungen von JOHNSON (1994), HUBER et al. (1997) und HIRSCHMANN & FÖRSTNER (1997), im carbonatischen Milieu erwartet werden. So lange keine carbonatischen Pufferphasen aus der Schlacke ausgewaschen werden, wird es nicht zum verstärkten Austrag von Schwermetallen kommen. Dies bedingt letztendlich in der Schlacke und ihrer Umgebung pH-Werte im neutralen bis leicht alkalischen Bereich. Sofern diese Bedingungen stabil bleiben, werden sich langfristig Carbonatisierungseffekte in der Schlacke durchsetzen, was nach obigen Autoren gleichsam eine dauerhafte Bindung relevanter Schwermetalle zur Folge haben wird.

Für die aus hydrogeochemischer Sicht qualitative Beurteilung der Ablagerungsfreundlichkeit von Naturräumen gegenüber Schlackedepositionen, eignet sich zum einen der zu erwartende Carbonatanteil in den oberflächennahen Schichten der Grundwasserüberdeckung (Deckschichten) und zum anderen die Beschaffenheit oberflächennaher Grund- bzw. quellnaher Oberflächenwässer als Spiegel verfügbarer Puffersubstanzen. Der Carbonatanteil oberflächennaher Schichten leitet sich im wesentlichen aus der Verbreitung und petrographischen Ausbildung geologischer Einheiten ab. Aus Profilbeschreibungen, sedimentpetrographischen Untersuchungen und geochemischen Analysen (pH-Werte, Carbonatgehalte) wurde hierbei der zu erwartende Carbonatanteil in den entsprechenden Schichten abgeschätzt, regionalisiert und einer Bewertung zugeführt. Zur Ermittlung und Bewertung verfügbarer carbonatischer Puffersubstanzen, wurden 3169 Grund- und Oberflächenwasseranalysen unterschiedlicher Datenbestände, im Untersuchungsraum verteilt auf 1625 Entnahmestellen, ausgewertet. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Ermittlung des Carbonat-Sättigungsindex, der letztendlich die wässrigen, oberflächennahen Milieuverhältnisse widerspiegelt. Unter Kombination einer punkt- und flächenbezogenen Regionalisierung der Daten kam es zur Definition charakteristischer Indices, bezogen auf (quasi-)homogene geologische Einheitsflächen. Je höher nun der geschätzte Anteil carbonatischer Spezies am Aufbau der Deckschichten und je gesättigter - bezüglich der Carbonatlösung - zugehörige Grundwässer sind, desto günstiger sind die Bedingungen für eine Schlackedepositionierung. Erwartungsgemäß zeigen die Austrichbereiche der Muschelkalkeinheiten, des Unteren- und Gipskeupers sowie der Lößdecken vergleichsweise hohe Ablagerungsfreundlichkeit, wobei insbesondere sulfatbeeinflusste Wässer übersättigte Verhältnisse anzeigen. Wechselnde Verhältnisse und daher bedingte Ablagerungsfreundlichkeit gelten vor allem für die Gebiete des sandsteinbetonten Keupers. Als gering ablagerungsfreundlich erweisen sich vornehmlich die Gebiete des Mittleren- und Unteren Buntsandsteins im Spessart, Odenwald und der Vorrhön sowie des Kristallins im Vorpessart.

Wesentliches Gewicht bei der qualitativ angelegten Bewertung kam der unscharfen Behandlung aller zur Auswertung eingesetzten Datenmengen zu. Die mathematische Behandlung der Daten erfolgte nach dem Prinzip der unscharfen Mengen oder Fuzzy-Logik. Über spezifische Funktionen wurden den einzelnen Datenmengen Zugehörigkeitsgrade zur *Menge der ablagerungsfreundlichen Bereiche*

im reellen Einheitsintervall $I = [0,1] = \{0 \leq x \leq 1\}$ zugeordnet. Die Wertemengen der einzelnen Beurteilungsfaktoren wurden so in dimensionslose Fuzzy-Mengen (Fuzzy-Sets) überführt, die vorwiegend über die Gamma-Funktion nach ZIMMERMANN & ZYSNO (1980) miteinander verknüpft und bewertet wurden. Hieraus erfolgte eine Synthesekarte der Ablagerungsfreundlichkeit verschiedener Naturräume aus hydrologisch-/hydrogeologischer und hydrogeochemischer Sicht. Relativ unabhängig zeigen sich dabei die Tiefenbereiche, die über den gesamten Untersuchungsbereich hinweg als ungünstig eingestuft wurden. Zur hohen Ablagerungsfreundlichkeit neigen beispielsweise die lößbedeckten Muschelkalkflächen sowie Teilbereiche des Unteren- und Gipskeupers, die sowohl hydrologisch günstige Positionen einnehmen, als auch eine gesicherte Versorgung oberflächennaher Schichten mit carbonatischen Puffersubstanzen anzeigen. Den gegensätzlichen Fall stellen z. B. die buntsandsteindominierten Gebiete dar, die hydrologisch vergleichsweise ungünstige Positionen aufweisen und denen es an wirksamen Puffersubstanzen in den Deckschichten fehlt.

Alle Auswertungen erfolgten im Rahmen eines GIS mit entsprechender Datenbankanbindung. Nach erfolgter Datenrecherche und –aufbereitung, gewährleistet ein solches System mit aufeinander abgestimmten Einzelkomponenten, den vergleichsweise komfortablen Umgang mit raumbezogenen Daten. Die vielfältigen Methoden der Datenaufbereitung und –auswertung des GIS waren notwendige Voraussetzung der vorliegenden Arbeit. Vor allem in der modellhaften Umsetzung der Beurteilungsfaktoren und ihrer anschließenden Verknüpfung, zeigte sich der Einsatz eines GIS als unerlässlich und somit vom Aufwand her gerechtfertigt. Die abschließende Sensitivitätsanalyse zeigte, daß der Einfluß einzelner Bewertungsfaktoren auf den Bewertungsvorgang gemäß der ihnen zugeordneten Bedeutung folgt. Aufgrund des offen gestalteten Systems können die Gewichtungen der einzelnen Faktoren relativ einfach verlagert werden, so daß mit den gleichen Basisdaten modifizierte Aussagen getroffen werden können. Insgesamt hat die Arbeit Ansätze aufgezeigt, wie mit verhältnismäßig einfach zu erhebenden Daten, eine Differenzierung verschiedener Naturräume eines größeren Untersuchungsraums, hier im Bezug auf ihre Ablagerungseignung gegenüber Schlacken, durchgeführt werden kann.

8.2 Schlußbetrachtung

Verwertung und Deponierung von Reststoffen stellen in der regionalen sowie kommunalen Planung eine wichtige Komponente dar. Öffentliches Interesse, wirtschaftliche Aspekte und letztendlich politische Ziele, beeinflussen die abfallwirtschaftliche Handlungsweise und sind damit richtungweisend bei der Entwicklung von Entsorgungs- und Verwertungsstrategien. Für die Regionalplanung ist es daher generell von Bedeutung, Ergebnisse von Standortbewertungsvorgängen flächenmäßig auf einzelne Planungsregionen zu beziehen. In der abschließenden Betrachtung dieser Arbeit wurde die

räumliche Verteilung der nach ihrer Ablagerungsfreundlichkeit klassifizierten Flächen für die Planungsregionen **Bayerischer Untermain, Würzburg, Main-Rhön** und die Landkreise in Unterfranken berechnet und dargestellt (vgl. Anlage Karte 4). Ohne an dieser Stelle näher auf die Verteilungsmuster einzugehen, stehen in der Region Bayerischer Untermain kaum ablagerungsfreundliche Räume für Schlackedepositionen zur Verfügung. Aber auch für die beiden anderen Regionen gilt, daß der Anteil nur gering bis bedingt ablagerungsfreundlicher Flächen jeweils immerhin 50% ausmacht. Die Flächenverteilung, wie sie in Anlage Karte 4 dargestellt ist, weist schließlich auf die Notwendigkeit hin, nicht nur bei der klassischen Deponierung, sondern gleichfalls bei der Verwertung von Schlacken, spezielle hydrogeologische Untersuchungen vorzuschalten, die auch die Frage nach der Immissionsneutralität des Reststoffes und seiner Umgebung, insbesondere nach Versagen eventueller technischer Sicherungsmaßnahmen, behandeln müssen.

Bei der Planung und Entwicklung von Konzepten drängen sich oftmals wirtschaftliche Aspekte und hinsichtlich der Schlacken sicherlich die Verwertungsmöglichkeiten in den Vordergrund. Nach KLEPPMANN (1995) sind Schlacken vor allem als Verfüllmaterialien im Rahmen von Großbaumaßnahmen einsetzbar. Limitierender Faktor ist neben der Eignung des Standortes insbesondere der Transportweg von der Aufbereitungsanlage zum Verwertungsstandort. Die künftigen Betreiber von Aufbereitungsanlagen für Schlacken rechnen nach KLEPPMANN (1995) bei Transport auf der Straße mit einem Aktionsradius von etwa 50 km, bei Transport mit der Bahn mit mehr als 100 km. Auf dem Wasserweg wird die mögliche Transportentfernung nahezu als unbegrenzt angesehen. Setzt man diese Angaben für Unterfranken kartographisch um (vgl. Anlage Karte 5), so zeigt sich, daß mit der Lage der Aufbereitungsanlage in Würzburg der Transport von Schlacke für einen Großteil von Unterfranken über das Straßennetz erfolgen kann. Mit dem Schienennetz und dem Main als Wasserstraße ist bei Kombination der Transportvarianten nahezu jeder Bereich in Unterfranken – vorzugsweise unter ökonomischen Gesichtspunkten der Schlackeverwertung – erreichbar. Dieser überaus positiven Einschätzung der Betreiber, steht immer noch der ökologische Aspekt gegenüber. So dürfen nach dem Ergebnis dieser Arbeit derartige ökonomische Betrachtungen nicht dazu verleiten, daß sich Schlacke generell als Verfüllmaterial bei Großbaumaßnahmen eignet. Meßlatte sollte immer noch der Standort (Naturraum) sein, an dem der Reststoff Schlacke verwertet und somit auch abgelagert wird.

9 Literaturverzeichnis

Im folgenden Verzeichnis sind alle Literaturzitate aufgelistet, die in der Arbeit verwendet wurden. Alle Diplomarbeiten, die am Institut für Geologie der Universität entstanden sind und den Raum Unterfranken betreffen, wurden, soweit verfügbar, gesichtet. Diese sind ausnahmslos in der Anlage Karte 3 verzeichnet. Zitiert wurden jedoch nur diejenigen, die auch für die vorliegende Arbeit tatsächlich verwertbare Daten lieferten.

- AG BODEN** (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 4. Aufl., 392 S., 33 Abb., 91 Tab.; Schweizerbart, Stuttgart.
- AL-AZAWI, A., EBHARDT, G., HOBLER, M. & KANZ, W.** (1978): Hydrogeologie der quartären Talfüllung des Mittelmains. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe des BayLFW 7 : 154 - 174; München.
- ALBINET M. & MARGAT J.** (1970): Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France. - Bull. BRGM, 2nde sér., sec. 4 : 13 - 22; Orléans, BRGM.
- ALLER, L., LEHR, J. H., PETTY, R., BENNETT, T.** (1987): Drastic: A standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. - J. Geol. Soc. India 29 : 23 - 37 .
- AN, P., MOON, W. M., RENCZ, A.** (1991): Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. - Can. J. of Exploration Geophysics 27 : 1 -11 .
- AULBACH, E.** (1991): Hydrogeologische Untersuchungen im Einzugsgebiet des Klingensbachs bei Diebach. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- AUST, H., VIERHUFF, H., WAGNER, W.** (1980): Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland. - Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau 043 : 67 S., 3 Karten; Waisenhaus, Braunschweig.
- AYAD, M.** (1980): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem mittleren Drittel des Blattes Nr. 6123 Marktheidenfeld der topographischen Karte von Bayern. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- BACCINI, P.** (1994): Warum neue Qualitätsanforderungen in der Abfallwirtschaft. - In: Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft, Endlager-Qualität am Beispiel der Müllschlacke, Tagung in der Kartause Ittingen, 14. - 16. September 1993 PEAK V ; vdf, ETH Zürich.
- BACCINI, P., BADER, H.-P., BELEVI, H., FERRARI, S., GAMPER, B., JOHNSON, A., KERSTEN, M., LICHTENSTEIGER, TH., ZELTNER, CH.** (1994): Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft, Endlager-Qualität am Beispiel der Müllschlacke. - Tagung in der Kartause Ittingen, 14. - 16. September 1993 PEAK V1/93 ; vdf ETH Zürich.
- BANDEMER, H. & GOTTWALD, S.** (1993): Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen. - 4. Aufl., 264 S.; GAM Media, Berlin.
- BÄRLE, F. & UDLUFT, P.** (1995): Wasser- und Stofftransport an bewirtschafteten Steilhängen (Rebhänge). - DFG-Projekt Nr. UD3/18, Abschlußbericht : 149 S.; Universität Würzburg [unveröff.].
- BARTELME, N.** (1995): Geoinformatik, Modelle - Strukturen - Funktionen. - 414 S.; Springer, Berlin.
- BARTHEL, R.** (1995): Hydrogeologische und geophysikalische Untersuchungen im oberen Einzugsgebiet des Elsbachs, Hohe Rhön. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 232 S.; Würzburg [unveröff.].
- BARTHEL, R.** (2000): Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur geologischen Standortbewertung, zur Analyse des regionalen Potentials und als Planungshilfsmittel für die thermische Nutzung des flachen Untergrundes bis 200m Tiefe als Wärmequelle und Wärmespeicher in Unterfranken/Bayern. - Diss. Univ. Würzburg : 353 S.; Würzburg.

- BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J.** (1996): Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie. - Lehrbuch der Hydrologie **Bd 1**, 2. Aufl., 694 S., 347 Abb., 126 Tab.; Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- BAYFORKLIM - BAYERISCHER KLIMAFORSCHUNGSVERBUND** (1996): Klimaatlas von Bayern. - 48 S., 57 Karten; München.
- BAYGLA - BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT** (1993): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main - Hydrogeologie. - 138 S., 53 Abb., 19 Tab.; München.
- BAYGLA - BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT** (1998): Vorversion der Digitalen Geologischen Karte von Bayern 1:500.000, - CD-ROM; München [unveröff.].
- BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT** (1978): Das Mainprojekt. - Schriftenreihe des BayLFW **7** : 315 S., 198 Abb., 105 Tab., 8 Beil.; München.
- BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT** (1994): Auswirkungen des Sauerens Regens und des Waldsterbens auf das Grundwasser. - Materialien des BayLFW **40** : 387 S.; München.
- BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT** (1995): Internat. Symp. Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition, 26. - 28. Oktober 1994, Bayreuth. - Informationsberichte des BayLFW **3/95** ; München.
- BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT** (1996): Die Grundwasserneubildung in Bayern. - Informationsberichte des BayLFW **5/96** ; München.
- BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT** (1998): Grundwasser in Bayern - Wasserbeschaffenheit 1993/97. - Informationsberichte des BayLFW **1/98** ; München.
- BAYSTLMU - BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN** (1985): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Donau und Main. - 204 S.; München.
- BAYSTLMU - BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN** (1994): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main - Kurzfassung. - 208 S.; München.
- BERGG** (1980): Bundesberggesetz. Fassung vom 14.05.1990.
- BELEVI, H., STÄMPFLI, D. M., BACCINI, P.** (1992): Chemical behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash in monofills. - Waste Management & Research **10** : 153 - 167; ISWA.
- BERNEKER, E.** (1979): Erläuterungen zur geologischen Kartierung des NE-Quadranten des Blattes 5924 Gemünden a. Main. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- BILL, R. & FRITSCH, D.** (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. - **Bd 1** ; Wichmann, Karlsruhe.
- BIMSchG (BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZ-GESETZ)** (1990): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Fassung vom 14.05.1990.
- BITTERSOHL, J.** (1980): Versickerung und Grundwasserneubildung in den Quartären Deckschichten der Bayerischen Rhön. - Diss. TU München : 234 S.; München.
- BODEM, M.** (1991): Auswirkungen saurer Depositionen auf Grundwasser und Stoffbilanz im Buntsandstein Nordhessens. - Forschungsberichte der hessischen forstlichen Versuchsanstalt **14** : 126 S.; Hann, Münden.
- BOLSENKÖTTER H., HILDEN H. D.** (1973): Karte der Verschmutzungsgefährdung der Grundwasservorkommen in Nordrhein-Westfalen 1 : 500000. - Krefeld, GLA Nordrhein-Westfalen .
- BONHAM-CARTER, G. F.** (1994): Geographic Information Systems For Geoscientists - Modelling with GIS. - Computer Methods in the Geosciences **13** ; Pergamon.
- BORGENHEIMER, M. & KREUTZ, R.** (1988): Hydrologische Ergiebigkeit verschiedener Sedimentgesteine bezogen auf Flußnetzdaten. - Ex. Arb. F. d. L. ; Geogr. Inst. Heidelberg [unveröff.].
- BRANDIS, F.** (1998): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen an der Volkach zwischen Maintal und Steigerwald (Teileinzugsgebiet Seehausbach). - Diplomarbeit Universität Würzburg : 104 S.; Würzburg [unveröff.].
- BRAUN, G.** (1999): Visualisierung der Gefährdung von Grundwasser durch Altablagerungen. - In: GIS in Geowissenschaften und Umwelt, Asch, K. [Hrsg.] : 127 - 140; Springer, Berlin.

- BREEUWSMA A., VAN DUIJVENBOODEN W.** (1987): Mapping of groundwater vulnerability to pollutants in the Netherlands. In: Van Duijvenbooden W. & Waegeningh G. [eds.]: Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. - Proc. Intl. Conf. RIVM, Noordwijk aan Zee, Netherlands, 30.03-03.04.1987 : 309 - 320; Den Haag, Organization for Applied Scientific Research.
- BREITNER, M.** (1986): Erläuterungen zu einer geologischen Karte auf dem NW-Quadranten des Blattes 6026 Werneck. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- BREUCH-MORITZ, M., HÄCKEL, H.** (1989): Die Berechnungsberatung nach dem Weihenstephaner Modell. - Beiträge zur Agrarmeteorologie 3 ; DWD, Offenbach.
- BRUNNACKER, K.** (1978): Deckschichten. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe des BayLFW 7 : 21 - 23, Beil. 2; München.
- BUCHNER, S.** (1990): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf der Nordhälfte des Blattes 5825 Hammelburg der Topographischen Karte 1 : 25 000. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- BURROUGH, P. A.** (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. - 50 S.; Oxford Univ. Press, New York.
- BURROUGH, P.A.** (1989): Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. - J. Soil Science 40 : 477 - 492 .
- BÜTTNER, G.** (1989): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5928 Obertheres. - 164 S., 30 Abb., 6 Beil.; München.
- CLARKE, J. S. & SORENSEN, J. W.** (1992): Development of a ground-water-vulnerability data base for the southeastern United States using a geographic information system. - U.S. Geol. Surv. Bull. 2016 : C1 - C17 .
- CRAMER, P.** (1964): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6227 Iphofen. - 126 S., 14 Abb., 1 Beil.; München.
- CRAMER, P. & WEINELT, W.** (1978): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5922 Frammersbach. - 137 S., 16 Abb., 3 Tab., 1 Beil.; München.
- CROCOLL, R.** (1990): Der hydrogeologische Standorttyp "Gipskeuper" am Beispiel des "naturdichten" Modellstandortes Mühlacker. - Z. dt. geol. Ges. 141 : 306 - 309; Hannover.
- DAMM, K.-W.** (1994): Einsatz von Müllverbrennungsaschen im Straßenbau in verschiedenen Schichten - Überprüfung der physikalischen Eigenschaften im Langzeitversuch. - In: BMFT-Verbundvorhaben Einsatz von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau, Ergebnisse eines Statusseminars 1993 an der Ruhr-Universität Bochum : 17 - 34; Berlin.
- DFG** (1992): Regionalisierung in der Hydrologie. - Mitteilung XI der Senatskommission für Wasserforschung : 443 S.; VCH, Weinheim.
- DIEPOLDER, G. W.** (1995): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, Grundlagen - Bewertung - Darstellung in Karten. - GLA Fachberichte 13 : 5 - 79; München, GLA.
- DÖPFNER, V.** (1999): Hydrogeologische Untersuchungen im Bereich der Oberen Wern. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 158 S.; Würzburg [unveröff.].
- DREXLER, O.** (1985): Die Böden. - In: Geol. Karte v. Bayern 1:25.000, Erl. zum Blatt 6128 Ebrach : 94 - 96; München.
- DVWK** (1989): Immissionsbelastung des Waldes und seiner Böden - Gefahr für die Gewässer. - DVWK Mitteilungen 17 :548 S.; DVWK, Bonn.
- DYCK, S. & PESCHKE, G.** (1995): Grundlagen der Hydrologie. - 3. Aufl., 536 S., 265 Abb., 72 Tafeln; Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EASTMAN, J. R.** (1997): IDRISI User's Guide, Version 2.0. - ; Worcester, Clark University.
- EBHARDT, G.** (1971): Die Hydrogeologie des Raumes Würzburg. - Zeit. dt. geol. Ges., 121: 41 -43; Hannover.

- ELLING, W., HÄCKEL, H., OHMAYER, G.** (1990): Schätzung der aktuell nutzbaren Wasserspeicherung des Wurzelraums von Waldbeständen mit Hilfe eines Simulationsmodells. - Forstw. Cbl. **109** : 210 - 219; .
- EMMERT, U.** (1968): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6328 Scheinfeld. - 124 S., 20 Abb., 5 Tab.; München.
- EMMERT, U.** (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6428 Bad Windsheim. - 172 S., 32 Abb., 6 Tab., 1 Beil.; München.
- EMMERT, U.** (1985): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6128 Ebrach. - 120 S., 29 Abb., 9 Tab., 3 Beil.; München.
- ERNSTBERGER, H.** (1987): Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Wasserbilanz. - Beiträge zur Hydrologie ; Kirchzarten.
- FÄLLMANN, A.M. & HERTLEN, J.** (1994): Leaching of slags and ashes - controlling factors in field experiments versus in laboratory tests. - In: Goumans, J.J.J.M., Van der Sloot, H.A., Aalbers, T.G. (Hrsg.), Environmental aspects of construction with waste materials : 39 - 54; Elsevier, Amsterdam.
- FEIX, T.** (1999): Hydrogeologische Untersuchungen an der Volkach zwischen Maintal und Steigerwald (Teileinzugsgebiet Weidachbach). - Diplomarbeit Universität Würzburg : 92 S.; Würzburg [unveröff.].
- FEZER, F., STOBER, I.** (1998): Morphohydrographische Maße und die Wasserdurchlässigkeit der Gesteine in Baden-Württemberg. - Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen **42** : 201 - 207 .
- FICHEL, K. & OELTZSCHNER, H.** (1979): Die Reinigungswirkung von Lockersedimenten auf Sickerwässer aus Schlackedeponien. - Bay. Landesamt für Umweltschutz, Schriftenreihe Abfallwirtschaft, **6** ; Oldenburg Verl., München.
- FLÜGEL, W. A.** (1979): Untersuchungen zum Problem des Interflow. - Heidelberg. Geograph. Arbeiten **56** : 170 S.; Geogr. Inst., Heidelberg.
- FOSTER, S. S. D.** (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. - Proceedings of the international Conference on the vulnerability of soil and groundwater to pollutants : 69 - 86; .
- FRANK, A.** (1983): Datenstrukturen für Landinformationssysteme - semantische, topologische und räumliche Beziehungen in Daten der Geowissenschaften. - Mitteilung des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich **34** ; ETH, Zürich.
- FREUDENBERGER, W.** (1996): Gesteinsfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund. - In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000 : 55 - 60; München.
- FREUDENBERGER, W.** (1997): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6425 Röttingen. - 133 S., 22 Abb., 17 Tab. 2 Beil.; München.
- GALLENKEMPER, B. & REGENER, D.** (1993): Emissionsarmer Einsatz von Bauschutt, Straßenaufbruch und Rost- und Kesselasche aus der Müllverbrennung. - LWA-Materialien, **10/93** ; Düsseldorf.
- GATTENLÖHNER, H.** (1996): Ermittlung geogener Stoffkonzentrationen im Grundwasser. - Diss. Univ. Würzburg : 182 S.; Würzburg.
- GEORGOTAS, N.** (1972): Hydrogeologische und Hydrogeochemische Untersuchungen im Bad Kissinger Raum unter besonderer Berücksichtigung der dortigen Heil- und Mineralquellen. - Diss. TU München : 197 S.; München.
- GEORGOTAS, N. & UDLUFT, P.** (1978): Sinn und Fränkische Saale. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe BayLFW **7** : 65 - 84; München.
- GEYER, G.** (i. Druck): Die Geologie von Unterfranken und den angrenzenden Gebieten. - Fränkische Landschaft **3** : 400 S.; Justus-Perthes, Gotha.
- GHOLAMI, A.** (1984): Geologische Kartierung auf dem NE-Quadranten des Kartenblattes Nr. 6026 Werneck mit Erläuterungen. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- GLA BADEN WÜRTTEMBERG** (1999): Anwendung geowissenschaftlicher Informationssysteme. - Informationen **11** ; LGRB, Freiburg.
- GLASER, M.** (1995): Hydrogeologische und Hydrochemische Untersuchungen im Einzugsgebiet des Kellerbachs und des Dürren Waldbachs. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].

- GOETZ, D. & GERWINSKI, W.** (1989): Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Müllverbrennungsschlacken im Straßenbau. - VGB Kraftwerkstechnik, **69** : 504 - 508 .
- GOLD, H.** (1994): Hydrogeologische und Hydrochemische Untersuchungen im Grenzbereich Zechstein-Buntsandstein des Spessarts. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- GOLDSCHNEIDER, N., KLUTE, M., STURM, S. & HÖTZL, H.** (2000): The PI Method - A GIS-based Approach to Mapping Groundwater Vulnerability with special Consideration of Karst Aquifers. - Z. angew. Geol. **46/3** : 157 - 166; Schweizerbart.
- GOLWER, A.** (1983): Underground purification capacity. - IHP-Symposium Groundwater in Water Resources Planning, 23.08.-03.09.1983, Koblenz **II** : 1063 - 1072; Bundesanstalt f. Gewässerkunde, Koblenz.
- GROSSMANN, J.** (1997): Modell zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Großraum Hamburg. - Fachliche Berichte HWW **1/16** : 38 - 48; Wullenwever-Druck, Lübeck.
- GROSSMANN, J. & LANGE, F.** (1999): Eine Sensitivitätsanalyse zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. - Grundwasser **1/99** : 11 - 17; Springer, Berlin.
- HAAR, U., KELLER, R., LIEBSCHER, H.-J., RICHTER, W. & SCHIRMER, H. [HRSG.]** (1979): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. - 365 S.; DFG, Bonn.
- HAARLÄNDER, W.** (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6229 Schlüsselfeld. - 111 S., 10 Abb., 2 Tab.; München.
- HAERTLE, T., JOSOPAIT, V.** (1982): Methodik u. Arbeitsweise zur Anfertigung von Karten über die natürliche Grundwasserschutzbedingung. - Veröff. D. Inst. F. Stadtbauwesen, TU Braunschweig **34** : 91 - 110; Braunschweig.
- HAHN, J.** (1988): Konzept einer umweltfreundlichen Abfallentsorgung. - Zukunftsweisende Wege der Abfallwirtschaft; Ergebnisse des Symposiums zur Sonderabfall-Problematik in Mainhausen im Dezember 1988, : 115 - 142; Gemeinde Mainhausen.
- HAHN, P.** (1986): Biogeochemische, geochemische und sedimentpetrographische Untersuchungen an Gesteinen des Unteren Keupers (Trias) in Franken, S-Deutschland. - Diss. Univ. Würzburg : 192 S.; Würzburg.
- HAKANSON, L.** (1980): An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. - Water Res. **14** : 975 - 1001; .
- HAMMER, H.** (1985): Systematische ingenieurgeologische Untersuchung von Hangrutschungen im Nordbayerischen Deckgebirge. - Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern **42** ; Nürnberg (LGA).
- HAUNSCHILD, H.** (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6528 Marktbergel. - 148 S., 18 Abb., 11 Tab.; München.
- HAUNSCHILD, H.** (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6327 Markt Einersheim und 6427 Uffenheim. - 139 S., 32 Abb., 2 Tab., 3 Beil.; München.
- HAUNSCHILD, H.** (1997): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6426 Aub. - 137 S., 25 Abb., 15 Tab., 1 Taf., 1 Beil.; München.
- HEGENBERGER, W.** (1969): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5926 Geldersheim. - 126 S., 14 Abb., 10 Tab., 2 Beil.; München.
- HEINRICH, K.** (1997): Entwicklung eines Soil Assessment Fuzzy Expert Systems - SAFES. - 11. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 23. Bis 25. April 1997 in Würzburg : 329 - 344; VGE, Essen.
- HEITFELD, K.-H.** (1985): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. - ; Berlin – Heidelberg, Springer.
- HEROLD, B.** (1981): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem NE-Quadranten des Kartenblattes Nr. 6126 Dettelbach. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- HIMMELSBACH, TH. & WENDLAND, E.** (1999): Schwermetalltransport in Sandsteinen unter Bedingungen einer hochsalinaren Porenwasserlösung - Laborversuch und Modellierung. - Grundwasser **3** : 103 - 112; Springer, Berlin.

- HIRSCHMANN, G. & FÖRSTNER, U.** (1997): Langfristiges Deponieverhalten von Müllverbrennungsschlacken. - BMBF-Verbundvorhaben Deponiekörper - Inerte Abfälle, Förderkennzeichen 1460799A ; Univ. Hamburg.
- HOFFMANN, U.** (1967a): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6225 Würzburg Süd. - 134 S., 17 Abb., 2 Tab.; München.
- HOFFMANN, U.** (1967b): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6125 Würzburg Nord. - 94 S. 21 Abb., 1 Tab., 4 Beil.; München.
- HOFMANN, M.** (1989): Hydrogeochemische und hydrodynamische Modellrechnungen zur Genese und Verbreitung von Tiefengrundwässern Unterfrankens. - Diss. TU München : 154 S.; München.
- HÖLTING, B.** (1992): Hydrogeologie. - 4. Aufl., 415 S., 110 Abb., 40 Tab.; Enke, Stuttgart.
- HÖLTING, B., HAERTLE, T., HOHBERGER, K.-H., NACHTIGALL, K. H., VILLINGER, E., WEINZIERL, W. & WROBEL, J.** (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. - Geol. Jb C 63 : 5 - 24; Hannover.
- HUBER, H., JAROS, M., LECHNER, P.** (1997): Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach forcierter Alterung. - Waste Reports 06 : 5 - 70; Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- HÜGGENBERG, E.** (1984): Geologische Kartierung auf dem NE-Quadranten des Blattes 6326 Ochsenfurt mit Erläuterungen. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- JENSON, S. K. & DOMINGUE, J. O.** (1988): Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 8, No. 11 : 1593 - 1600 .
- JERZ, H.** (1996): Gesteinsfolge des Quartärs. - In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000 : 236 - 248; München.
- JOHNSON, C. A., BRANDENBERGER, S. & BACCINI, P.** (1995): Acid neutralizing capacity of municipal waste incinerator bottom ash. - Environ. Sci. Technol. 29 : 142 - 147 .
- JOHNSON, C.A.** (1994): Das Langzeitverhalten von Müllschlacke im Hinblick auf die Mobilität von Schwermetallen und Salzen. - Entsorgung von Schlacken und sonstigen Reststoffen, Beihefte zu Müll und Abfall, 31 : 92 - 96; ESV, Berlin.
- JOST, P.** (1995): Bodenphysikalische, geochemische und tonmineralogische Untersuchungen an ausgewählten nordbayerischen Tonlagerstätten. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 146 S.; Würzburg [unveröff.].
- KANY, M., HAMMER, H.** (1985): Statistische Untersuchungen von Rutschungen im Nordbayerischen Deckgebirge. - In Heitfeld K.-H. (Hrsg.): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich Locker- und Festgestein : 256 - 265; Springer, Berlin.
- KANZ, W.** (1977): Das Talgrundwassers des Maintals im Grenzbereich Muschelkalk-Buntsandstein. - Diss. Univ. Tübingen : 118 S.; Tübingen.
- KANZ, W.** (1978): Die Uferfiltrationsanlage von Karlstadt a. M. - eine Modelluntersuchung. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe BayLFW 7 : 174 - 182; München.
- KELLER, R.** (1986): Erweiterte Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem SW-Quadranten des Blattes 5925 Gauaschach der Topographischen Karte 1:25.000 von Bayern. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- KERSTEN, M., MOOR, CH., JOHNSON, C. A.** (1995): Emissionspotential einer Müllverbrennungsschlacken-Monodeponie für Schwermetalle. - Müll und Abfall 11 : 749 - 758; EVS, Berlin.
- KIEMSTEDT** (1977): Wissenschaftliches Gutachten zu ökologischen Planungsgrundlagen im Verdichtungsraum Nürnberg-Fürth-Erlangen-Schwabach. - Raumforschung, Raumordnung und Landesplanung TU München ; München [unveröff.].
- KLEEBOG, H.-B. & CEMUS, J.** (1992): Regionalisierung hydrologischer Daten - Definitionen. - In: Regionalisierung i. d. Hydrogeologie, Mitteilung XI d. Senatskommission f. Wasserforschung : 1 - 16; VCH, Weinheim.

- KLEPPMANN, F.** (1995): Zentrales Verwertungskonzept von MV-Schlacken einschließlich Schlacke-Monodeponien am Beispiel ZAR Würzburg. - Handbuch Schlackeaufbereitung, -verwertung und -entsorgung, VDI-Seminar vom 09.03 bis 10.03.1995 in München **BW 43-76-03** ; VDI Bildungswerk, Düsseldorf.
- KOCH, R.** (1999): Hydrogeochemische Charakterisierung des Gipskeupers von Franken unter besonderer Berücksichtigung der Gradabteilungsblätter Wiesentheid, Schlüsselfeld, Scheinfeld und Baudenbach. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 105 S.; Würzburg [unveröff.].
- KÖNIG, R.** (1993): Quantifizierung der Bodenwasserbewegungen im Hinblick auf die Grundwasserneubildung mit Hilfe deckschichtenphysikalischer Kenngrößen. - Hydrogeologie & Umwelt **6** ; LFB Hydrogeologie & Umwelt, Univ. Würzburg.
- KORALEWSKA, R.** (1999): Naßchemische Behandlung von Rostschlacken aus der Hausmüllverbrennung. - Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft **151** ; TU München.
- KOWALCZYK, U., SCHIRMER, U., TRUPPAT, R.** (1995): Differenzierung zwischen gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) und dem abbaubaren organischen Kohlenstoff (AOC) in Rostaschen von Verbrennungsanlagen für Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle. - VGB Kraftwerkstechnik **75**, **11/95** : 961 - 967 .
- KRASS, K., KELLERMANN, CH., KOCH, C.** (1997): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1995, Teil 2. - Straße und Autobahn **4** : 200 - 204 .
- KRÄUCHI, P., OLSCHEWSKI, A., GUBLER, A., LICHTENSTEIGER, TH.** (1995): Müllverbrennungsschlacke als Wegebauaterial: Schadstoffauswaschung aus Forstwegen. - Wasser & Boden **47/11** : 49 - 53 .
- KRAUS, H.** (1998): Hydrochemische und bodenphysikalische Untersuchungen im Muschelkalk bei Retzstadt unter Berücksichtigung natürlicher Grundgehalte und anthropogener Anreicherungen von Schwermetallen in den Deckschichten. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 144 S.; Würzburg [unveröff.].
- KRW/ABFG - KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ** (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. Fassung vom 27.09.1994 .
- KUMMER, F.** (1996): Müllverbrennungsschlacke und potentielle Verwertungsgebiete. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 124 Seiten; Würzburg.
- KUS, G.** (1995): Felsmechanische Untersuchungen am Mittleren- und Oberen Muschelkalk im Maintal zwischen Goßmannsdorf und Kitzingen. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 86 Seiten; Würzburg [unveröff.].
- KUS, G., UDLUFT, P. & WIMMER, M.** (1999): Long Term Behaviour of Bottom Ash from MSW Incineration in Natural Environment. - Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 1999, Landfill Processes and Waste Pre-Treatment, Proceedings **volume1** : 589 - 597; CISA, Cagliari.
- KUS, G. & BARTHEL, R.** (2000): GIS-gestützte Analysen von Georisiken und -potentialen unter Verwendung geologischer 3D-Untergrundmodelle. - Z. angew. Geol. **46/3** 167 - 173; Schweizerbart, Stuttgart.
- KUS, G., UDLUFT, P. & WIJNEN, J.** (2000): Strategie zur einfachen Erfassung der Verschmutzungsempfindlichkeit eines Grundwasservorkommens in Paraná, Brasilien. - HydroGeoEvent 2000 Wasser-Gesteinswechselwirkungen, Schriftreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft **Heft 12** ; Heidelberg.
- LAGA - LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL** (1994-1997): Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle. - Merkblatt ; Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [Hrsg.].
- LAGA- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL** (1994-1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen. - Technische Regeln ; Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [Hrsg.].
- LÄNDERAUSSCHUB BERGBAU** (1995): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen / Abfällen als Versatz unter Tage: Technische Regeln für den Einsatz von bergbaufremden Reststoffen / Abfällen als Versatz .

- LEHMANN R. (1990): Geographisch-geologische Standortaspekte der Gewässerversauerung in Bayern. - Laufener Seminarbeiträge **4** : 8 - 22; ANL, Laufen.
- LICHENSTEIGER, TH. (1996): Müllschlacken aus petrologischer Sicht. - Geowissenschaften **14**, Heft **5** :173 - 179; Springer, Berlin.
- LICHTENSTEIGER, TH. & ZELTNER, CH. (1994): Wie lassen sich Feststoffe beurteilen ?. - In: Baccini, P., Gamper, B. [Hrsg.]: Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft - Endlager-Qualität am Beispiel Müllschlacke : 11 - 34; vdf, ETH Zürich.
- LÖPMEIER, F.J. (1983): Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung. - Beiträge zur Agrarmeteorologie ; Braunschweig.
- LYNCH S. D., REYNDERS A. G., SCHULZE R. E. (1994): Preparing input data for a national-scale groundwater vulnerability map of Southern Africa. - ESRI Map Book **10** :8 - 9; ESRI, Redlands.
- MAGIERA, P. (2000): Methoden zur Abschätzung der Verschmutzungsempfindlichkeit des Grundwassers. - Grundwasser **5/3** : 103 - 114; Springer, Berlin.
- MAHMUD, A. (1983): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem SW-Quadranten des Blattes 6326 Ochsenfurt. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- MARGANE, A., HOBLER, M. & SUBAH, A. (1999): Mapping of Groundwater Vulnerability and Hazards to Groundwater in the Irbid Area, N Jordan. - Z. angew. Geol. **45/4** : 175 - 187; Schweizerbart, Stuttgart.
- MARTIN, W., RUPPERT, H. & FRIED, G. (1991): Veränderung von Elementgehalten, pH-Wert und potentieller Kationenaustauschkapazität in ausgewählten Böden Bayerns. - GLA Fachberichte **6** : 3 - 35; München.
- MÄRZ, K. (1977): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Buntsandstein und Muschelkalk Nordbayerns. - Hydrochem. Hydrogeol. Mitt. **2** : 1 - 170; München.
- MATTHESS, G. (1973): Beschaffenheit des Grundwassers. - 324 S., 89 Abb., 86 Tab.; Borntraeger, Berlin.
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - Lehrbuch der Hydrogeologie **Bd. 1** : 438 S, 214 Abb., 75 Tab.; Borntraeger, Berlin.
- MERKEL, B. (1993): Grundwassergefährdungskarten: Ein Werkzeug für die Wasserwirtschaft. - Wasserwirtschaft **83** : 64 - 70 .
- MERKEL, B. (1999): Qualität von Grundwasser und seine Beeinflussung. - Wasser und Gewässer, F. H. Frimmel [Hrsg.] : 283 - 322; Spektrum Akad. Verlag, Berlin.
- MEYNEN, E., SCHMITHÜSEN, J., GELLERT, J., NEEF, E., MÜLLER-MINY, H. & SCHULTZE, J. H. (1961): Naturräumliche Gliederung und Waldverbreitung 1:1000000. - Die BRD in Karten, Bl 5111 ; Bad Godesberg.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT & MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR (1991): Gemeinsamer Runderlaß: Anforderungen an die Verwendung von aufbereiteten Altbaustoffen (Recycling-Baustoffen) und industriellen Nebenprodukten im Erd- und Straßenbau aus wasserwirtschaftlicher Sicht. - Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen **Nr. 45** : 906 S.; Düsseldorf.
- MOEGERLE, N. & SCHÜLLER, K. (1994): Kommunikationswerkzeuge mit unterschiedlichen GIS-Systemplattformen zum Austausch raumbezogener Daten. - UBA Texte **37/94** : 1 - 45; Berlin.
- MOGHIMI, M. (1976): Geologie des Niederschlagsgebietes der Sulz bei Ostheim v. d. Rhön und die Hydrochemie seiner Quellen. - Diplomarbeit FU Berlin ; Berlin [unveröff.].
- MÜLLER, G. (1979): Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veränderungen seit 1971. - Umschau **79** : 778 - 783 .
- MÜLLER, J. (1996): Grundzüge der Naturgeographie von Unterfranken: Landschaftsökologie - Landschaftsgenese - landschaftsräumlicher Vergleich. - 1. Aufl., 324 S.; Perthes, Gotha.
- MURAWSKI, H. (1983): Geologisches Wörterbuch. - **8. Aufl.** ; Enke, Stuttgart.
- NANI, M. (1984): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung auf dem Blatt 6224 Helmstadt. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].

- OKRUSCH, M., STREIT, R. & WEINELT, W.** (1967): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5920 Alzenau. - 336 S., 48 Abb., 25 Tab., 5 Beil.; München.
- OPITZ, CH.** (1986): Geochemische Untersuchungen zum Grenzbereich Mittlerer/Oberer Muschelkalk. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 142 S.; Würzburg [unveröff.].
- ORLIC, B. & SUNARIC, D.** (1994): Assessment of engineering geological suitability for urban planning by fuzzy logic. - Proceedings 7th International IAEG Congress, Rotterdam 1994, **Vol. 3** : 2329 - 2335; IAEG, Rotterdam.
- PFRANG-STOTZ, G.** (1998): Bedeutende Mineralphasen als Metallträger in MV-Schlacken. - in Vorbereitung ; Institut f. techn. Chemie / Thermische Abfallbehandlung, Forschungszentrum Karlsruhe.
- PIOTROWSKI J. A., BARTELS F., SALSKI A., SCHMIDT G.** (1997): Regionalisierung der Durchlässigkeitsbeiwerte mit unscharfen Zahlen: Der Natur näher ?. - Grundwasser **1** : 3 - 10; Springer, Berlin.
- PLÖTHNER, D.** (1979): Hydrogeologie des Buntsandsteins im östlichen Rhön-Vorland - Geologie, Hydrochemie, Wasserhaushalt, Aquifer-Kennziffern. - Berliner geowiss. Abh. **A 16** : 139 S.; Dietrich Reimer, Berlin.
- PRENZEL** (1985): Verlauf und Ursachen der Bodenversauerung. - Z. dt. geol. Ges. **136** : 293 - 302; Hannover.
- PRIESTER, T., KÖSTER, R., EBERLE, S. H.** (1996): Charakterisierung kohlenstoffhaltiger Bestandteile in Hausmüllverbrennungsschlacken unter besonderer Berücksichtigung organischer Stoffe. - Müll und Abfall **6/96** : 387 - 398; ESV, Berlin.
- RAJAB, R.** (1975): Grundwasserumsatz und Chemismus in drei Teileinzugsgebieten der Tauber. - Diss. Univ. Würzburg : 126 S.; Würzburg.
- RASSINEUX, F., PETIT, J.C., MEUNIER, A.** (1989): Ancient analogues of modern cement: Calcium-hydrosilicates in mortars and concretes from Gallo-Roman thermal baths of western France. - J. Am. Ceram. Soc. **72** : 1026 - 1032 .
- RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN** (1998): Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz - Ein Schritt zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung (Sondergutachten). - 207 S.; Universitäts-Buchdruckerei, Bonn.
- REGENER, D.** (1997): Wasserwirtschaftliche Aspekte bei der Verwertung von Müllverbrennungssaschen. - Abfall-Recycling-Altlasten **13** ; RWTH Aachen.
- REGIERUNG V. UNTERFRANKEN** (1981): Trinkwasserversorgung von Unterfranken. Unterlagen zum Raumordnungsverfahren für eine Trinkwassertalsperre im Spessart oder in der Rhön. - **80 S.** ; Würzburg.
- REICHELT, J.** (1996): Mineralogische Aspekte bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Müllverbrennungsschlacken. - Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Univ. Karlsruhe, **Heft 47** ; Karlsruhe.
- REIS, O. M.** (1928): Erläuterungen zum Blatt Würzburg Nr. XXIII der Geognostischen Karte von Bayern 1:100.000, Teilblatt Würzburg; München.
- RICHTER, D.** (1989): Ingenieur- und Hydrogeologie. - 608 S.; De Gruyter, Berlin.
- RODA, B.** (1984): Geologische Kartierung auf dem NW-Quadranten des Blattes 6126 Dettelbach. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- ROHRMÜLLER, J., MIELKE, H. & GEBAUER, D.** (1996): Gesteinsfolge des Grundgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund. - In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000 : 16 - 50; München.
- RÖTZER, T.** (1997): Wasserhaushalt. - In: Erläuterungen zum Agrarklimatologischer Atlas von Bayern, Deutscher Wetterdienst Weihenstephan [Hrsg.] CD-ROM; Weihenstephan.
- RÖTZER, T., WÜRLÄNDER, R. & HÄCKEL, H.** (u. a.) (1997): Agrarklimatologischer Atlas von Bayern, Deutscher Wetterdienst Weihenstephan [Hrsg.]. - CD-ROM; Weihenstephan.
- RUPPERT, H.** (1987): Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherung von Schwermetallen in Böden Bayerns. - GLA Fachberichte **2** : 97 S.; München.

- SABBAGH, N.** (1982): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem NE-Quadranten des Blattes 6025 Arnstein. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- SBRESNY, J.** (1997): Fehlerquellen in Raumbezogenen Informationssystemen. - Geol. Jb. **F 33** : 132 S.; Hannover.
- SCHAEFFER, W. & USDOWSKI, E.** (1987): Modelle der Kalk-Auflösung und C13/C12-Entwicklung von Karbonat-Grundwässern. - Z. Wasser - Abwasser - Forschung **20** : 69 - 81; Weinheim.
- SCHAEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P.** (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 13. Aufl., 491 S., 220 Abb., 102 Tab., 1 Farbtafel; Enke, Stuttgart.
- SCHLEYER, R.** (1993): Kartierung der Verschmutzungsempfindlichkeit von Grundwasser durch multivariate statistische Auswertung geologischer, geographischer und hydrogeochemischer Daten. - WaBoLu-Hefte **4** : 142 S., 74 Abb., 7 Tab.; Bundesgesundheitsamt, Berlin.
- SCHLEYER, R. & KERNDORFF, H.** (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen. - 249 S.; VCH, Weinheim.
- SCHMITT, P.** (1982): Herkunft und Beschaffenheit oberflächennaher Grundwässer und mineralstoffreicher Tiefenwässer im Muschelkalk-Keupergebiet des Grabfeldgaus (Ufr.). - Diss. TU München : 235 S.; München.
- SCHNEIDER, J. , PFRANG-STOTZ, G., KÖSSL, H.** (1994): Charakterisierung von MV-Schlacken. - Entsorgung von Schlacken und sonstigen Reststoffen, Beihefte zu Müll und Abfall, **31** : 38 - 45; ESV Berlin .
- SCHOLZ, P.** (1982): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf dem SW-Quadranten des Kartenblattes 6126 Dettelbach. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- SCHRÖDER, B.** (1976): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5929 Hofheim. - 116 S.; München.
- SCHULTHEISS, P.** (1999): Hydrogeologische Untersuchungen an der Volkach zwischen Maintal und Steigerwald, Teil B: Beschaffenheit der Quellen und Oberflächengewässer bezüglich ihrer geogenen Herkunft und anthropogenen Beanspruchung. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- SCHWARZMEIER, J.** (1977): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6024 Karlstadt und 6124 Remlingen. - 155 S., 34 Abb., 11 Tab., 5 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1979): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6123 Marktheidenfeld. - 174 S., 31 Abb., 9 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1980): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6023 Lohr. - 159 S., 23 Abb., 5 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1981): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6027 Grettstadt. - 126 S., 18 Abb., 2 Tab., 4 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1982): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 5927 Schweinfurt. - 139 S., 23 Abb., 1 Tab., 6 Beil.; München.
- SCHWARZMEIER, J.** (1984): Über den Buntsandstein an unterer Saale und Sinn. - Geologica Bavarica **89** : 95 - 115; München.
- SHERLOCK, E. J., LAWRENCE, R. W. & POULIN, R.** (1995): On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. - Environmental Geology **25** : 43 - 54; Springer, Berlin.
- SLABBERS, P.J.** (1980): Practical prediction of actual evapotranspiration. - Irr. Sci. **1** : 185 - 196 .
- SPÄTH, H.** (1978): Naturräumliche Gliederung. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe BayLFW **7** : 3 - 5; München.
- SPRINGER, A.** (1985): Erläuterungen zu einer geologischen Kartierung des SE-Quadranten des Blattes Nr. 6324 Grünsfeld. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- STAMATIS, G.** (1981): Erläuterungen zur geologischen Kartierung auf Blatt 6129 Burgwindheim. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].

- STAMATIS, G.** (1986): Hydrogeologische Untersuchungen im Mittleren Bereich des Maindreiecks unter besonderer Berücksichtigung der Hydrochemie und hydraulischen Zusammenhänge zwischen Talgrundwasser und Main im Stadtbereich Würzburg. - Diss. Univ. Würzburg : 270 S.; Würzburg.
- STREIT, R. & WEINELT, W.** (1971): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6020 Aschaffenburg. - 398 S., 52 Abb., 14. Tab., 5 Beil.; München.
- STUMPF, TH.** (1997): Hydrogeologische, hydrochemische und deckschichten-physikalische Untersuchungen eines intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebietes westlich von Kitzingen. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 108 S.; Würzburg [unveröff.].
- TASI - TA SIEDLUNGSABFALL** (1993): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz - Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung und Verbrennung von besonders Überwachungsbedürftigen Abfällen. - Fassung vom 12.03. 1991 .
- UDLUFT, P.** (1969): Hydrogeologie und Hydrochemie der Südrhön unter besonderer Berücksichtigung der Mineralquellen im Brückenauer Raum. - Diss. TU München : 240 S.; München.
- UDLUFT, P.** (1978a): Das Grundwasser Frankens und angrenzender Gebiete. - Habilitationsschrift, TU München : 201 S.; München.
- UDLUFT, P.** (1978b): Hydrochemie oberflächennaher Grundwässer im Main Einzugsgebiet 1:500.000. - In: Das Mainprojekt, Schriftenreihe des BayLFW 7 : Beil. 7; München.
- UDLUFT, P. & GATTENLÖHNER, H.** (1999): Geogene und anthropogene Stoffkonzentrationen in Wässern der Germanischen Trias. - Hallesches Jahrb. Geowiss. **B 21** : 79 - 106; Halle (Saale).
- UDLUFT, P., DÖPFNER, V., KUS, G. & SCHÄFERS, B.** (2000): Langzeitverhalten von Schlacken und Aschen im Naturraum. - Abschlußbericht (vorläufig) zum BayFORREST-Forschungsvorhaben F151 ; Würzburg [unveröff.].
- VILLUMSEN A., JACOBSEN O. S., SONDRERSKOV C.** (1982): Mapping the vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. - Danm. Geol. Unders., Arborg 1982 : 17 - 38; DGU, Kopenhagen.
- VOGEL, F.** (1961): Erläuterungen zur Bodenkundlichen Übersichtskarte v. Bayern 1:500.000. - 168 S.; München.
- VRBA J., ZAPOROZEC A.** (1994): Guidebook on mapping groundwater vulnerability. - Intl. Contrib. to Hydrogeol. **16** : 131 S.; Heise, Hannover.
- WALTER, J.** (1995): Hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen des Einzugsgebietes der Brend bis Pegel Schweinhof. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 185 S.; Würzburg [unveröff.].
- WEID, G.** (1984): Geologische Kartierung auf dem SE-Quadranten des Blattes 6326 Ochsenfurt mit Erläuterungen. - Diplomarbeit Universität Würzburg : 93 S.; Würzburg [unveröff.].
- WEINELT, W.** (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6021 Haibach. - 246 S., 41 Abb., 4 Tab. 2 Beil.; München.
- WENDLING, U.** (1995): Richtlinien zur Ermittlung der potentiellen und der realen Verdunstung von Land- und Wasserflächen. - ; DWD, Offenbach.
- WHG - WASSERHAUSHALTSGESETZ** (1996): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes. - Fassung vom 12.11.1996 .
- WIMMER, M.** (2000): MV-Schlacke – Ein anthropogenes Sediment ?. – Dissertation Universität Würzburg.
- WITTMANN, O.** (1972): Erläuterungen zur Geologischen Karte v. Bayern 1:25.000, Blatt 6022 Rothenbuch. - 102 S., 11 Abb., 5 Tab. 2 Beil.; München.
- WITTMANN, O.** (1991): Standortkundliche Landschaftsgliederung von Bayern - Übersichtskarte 1:1.000.000. - GLA Fachberichte **5** : 5 - 47; München.
- WOINACK, M.** (1982): Geologische Kartierung auf dem NW-Quadranten des Blattes 6026 Werneck. - Diplomarbeit Universität Würzburg ; Würzburg [unveröff.].
- WROBEL, J.-P., HANKE, K.** (1987): Karten der Gefährdung der Grundwässer in Bayern durch Nitrat. - GLA Fachberichte **3** : 3 - 27; München.

-
- WÜRLÄNDER, R.** (1997): Methodik der Kartographie. - In: Erläuterungen zum Agrarklimatologischer Atlas von Bayern, Deutscher Wetterdienst Weihenstephan [Hrsg.] CD-ROM; Weihenstephan.
- ZADEH, L. A.** (1965): Fuzzy-Sets. - IEEE Information and Control **Vol. 8** : 338 - 353 .
- ZAPOROZEK, A.** (1989): Groundwater protection maps. - Mem. Intl. Symp. on Hydrogeological maps as tools for economic and social development : 153 - 162; Hannover.
- ZEVENBERGEN, C. & COMANS, R. N. J.** (1994): Geochemical factors controlling the mobilization of major elements during weathering of MSWI bottom ash. - In: Goumans, J.J.J.M., Van der Sloot, H.A., Aalbers, T.G. [Hrsg.], Environmental aspects of construction with waste materials : 179 - 194; Elsevier Science.
- ZIMMERMANN, H. J. & ZYSNO, P.** (1980): Latent connectives in human decision making. - Fuzzy Sets and Systems **4** : 37 - 51 .

10 Anlagen

Karte 1: Naturräumliche Gliederung Unterfrankens

Das Relief wurde aus dem DGM 50 der Bayerischen Vermessungsverwaltung generiert. Hierzu wurde ein sogenanntes *hillshade-image* oder *hillshade-relief* als Beleuchtungsquelle verwendet. Die naturräumlichen Grenzen entstammen dem Klimaatlas von Bayern (BAYFORKLIM, 1996). Da die geometrischen Daten nicht zur Verfügung standen, wurde das entsprechende Kartenblatt des Atlas (Karte 1, 1:1.000.000) gescannt, georeferenziert und digitalisiert (Vektorlinien). Die maßstabs- und aus den verschiedenen Arbeitsschritten bedingten Abweichungen wurden manuell nachgebessert. Für die Nummerierung bzw. Bezeichnung der Flächen diente ebenso der Klimaatlas, wobei die Einheiten im Bereich der *Bayerischen Rhön* umbenannt wurden. Diese werden im Rahmen des Klimaatlas zum *Osthessischen Bergland* gestellt. Für den Begriff *Lange Rhön* wurde *Hohe Rhön* eingesetzt. Alle weiteren topographischen Elemente entstammen dem ATKIS 25 und 500.

Karte 2: Geologie und Relief in Unterfranken

Die Darstellung des Reliefs erfolgte wie unter Karte 1. Zur Verstärkung der morphologischen Strukturen wurde ein *hillshade-relief* mit 2,5-facher Überhöhung als Beleuchtungsquelle verwendet. Die Geologie entstammt der digitalen Fassung der GUK 500 von Bayern (BAYGLA, 1998). Die Farben wurden so gewählt, daß die Strukturen möglichst deutlich hervorkommen. Gesättigte Grundfarben wie Grün und Rot eignen sich in dieser Darstellungsform und bei den verwendeten Ausgabegeräten nur bedingt. Bei den Einheiten Flugsand (rot) und Tertiär (grün) werden die Strukturen größtenteils verdeckt. Mit der Anzahl der dargestellten Einheiten ist jedoch die Palette brauchbarer Farben nahezu erschöpft, so daß dieser Umstand bei den beiden o. g. Geologischen Einheiten in Kauf genommen wurde.

Karte 3: Geowissenschaftliche Spezialliteratur in Unterfranken

In der Karte 3 wurden alle Dissertationen und Diplomarbeiten, die im Rahmen der Arbeit gesichtet wurden, aufgeführt. Die Darstellung orientiert sich an den Blattschnitten der TK 25. Die Zitate erscheinen jeweils auf den Blattschnitten, auf denen im Rahmen der Arbeiten Untersuchungen durchgeführt wurden. Die topographische Angaben entstammen dem ATKIS 25 und 500.

Karte 4: Ablagerungsfreundlichkeit von Regionen in Unterfranken gegenüber Schlackedepositionen

Für die Erstellung der Karte 4 wurden die Häufigkeiten der Klassen *Zugehörigkeitsgrad zur Menge AF* der Synthesekarte (vgl. Abb. 10-9), bezogen auf die Planungsregionen und Landkreise in Unterfranken, berechnet. Über die Funktion *summarize zone* von ARCVIEW wird dabei die Anzahl von Rasterzellen gleicher Klassenzugehörigkeit, bezogen auf frei wählbare Polygonflächen, berechnet. Die Polygonflächen *Planungsregion* und *Landkreis* entstammen dem ATKIS 25.

Karte 5: Aufbereitungsanlage und potentielle Transportwege für MV-Schlacken in Unterfranken

Karte 5 zeigt potentielle Transportwege für MV-Schlacken vom Aufbereitungs- zum Verwertungs- bzw. Ablagerungsstandort nach KLEPPMANN (1995). Alle dargestellten topographischen Elemente entstammen dem ATKIS 25. Die dargestellte 50km-Zone entspricht dem 50km-Radius vom Aufbereitungsstandort Würzburg und bezieht sich auf die maximal vertretbare Transportentfernung auf der Straße. Theoretisch ist bei der Einschränkung der Transportweite über Straßen auch die Art der Straße sowie die tatsächliche Entfernung (hier wurde nur die Luftlinie berücksichtigt) einzubeziehen. Über die Bahn und die Wasserstraße Main kann, nach der Beurteilung von KLEPPMANN (1995), der Transport von Schlacke überregional und damit außerhalb der Planungsregionen von Unterfranken erfolgen. Die angegebenen Entfernungsgrenzen für die einzelnen Transportkategorien sind relativ und hängen sehr stark von der Marktsituation ab. Stehen alternative Materialien regional zur Verfügung, entscheidet letztendlich der Preis darüber, welche Transportentfernungen noch tragbar sind. Weitere Einschränkungen ergeben sich prinzipiell aus der ökologischen Verträglichkeit des Materials bezogen auf den Verwertungs- bzw. Ablagerungsstandort.

Naturräumliche Gliederung Unterfrankens

modifiziert nach Klimaatlas Bayern (BayFORKLIM, 1995)

Topographische Angaben: TK 500
Höhenmodell: DGM 50

Fränkisches Keuper-Lias-Land

- 115 Steigerwald
- 116 Haßberge
- 117 Itz-Baunach-Hügelland

Gäuplatten im Neckar- und Tauberland

- 129 Tauberland

Mainfränkische Platten

- 130 Ochsenfurter- und Gollachgau
- 132 Marktheidenfelder Platte
- 133 Mittleres Maintal
- 134 Gäuplatten im Maindreieck
- 135 Wern-Lauer-Platte
- 136 Schweinfurter Becken
- 137 Steigerwaldvorland
- 138 Grabfeld
- 139 Hesselbacher Wald

Odenwald, Spessart und Südrhön

- 140 Südrhön
- 141 Sandstein-Spessart
- 142 Vorderer Spessart
- 144 Sandstein-Odenwald

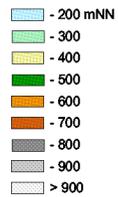
Rhein-Main-Tiefland

- 232 Untermainebene

Rhön

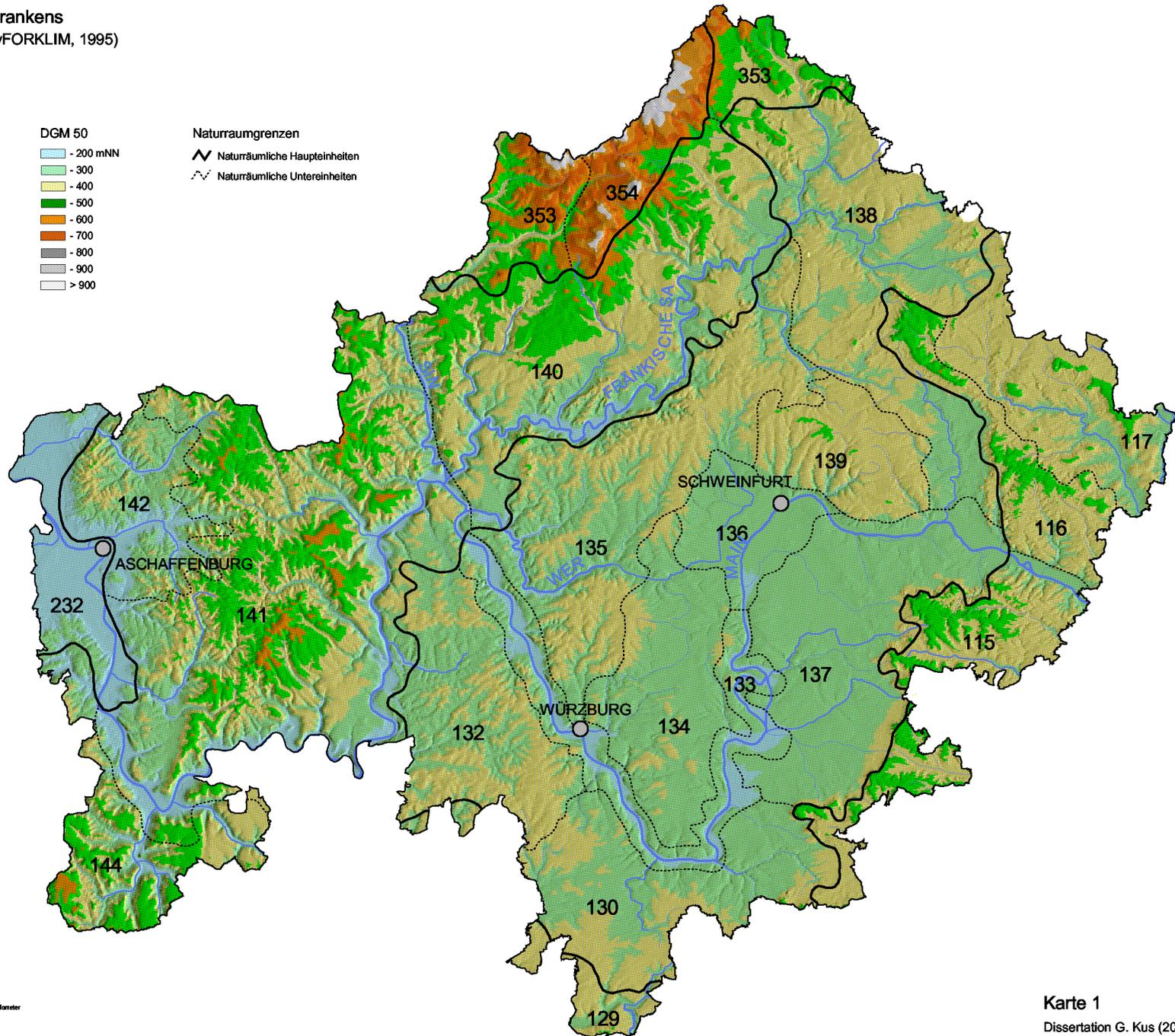
- 353 Vorder- und Kuppenrhön
- 354 Hohe Rhön

DGM 50



Naturraumgrenzen

- Naturräumliche Haupteinheiten
- Naturräumliche Untereinheiten



Geologie und Relief in Unterfranken

Geologische Einheiten modifiziert nach
Geologischer Karte v. Bayern 1:500.000

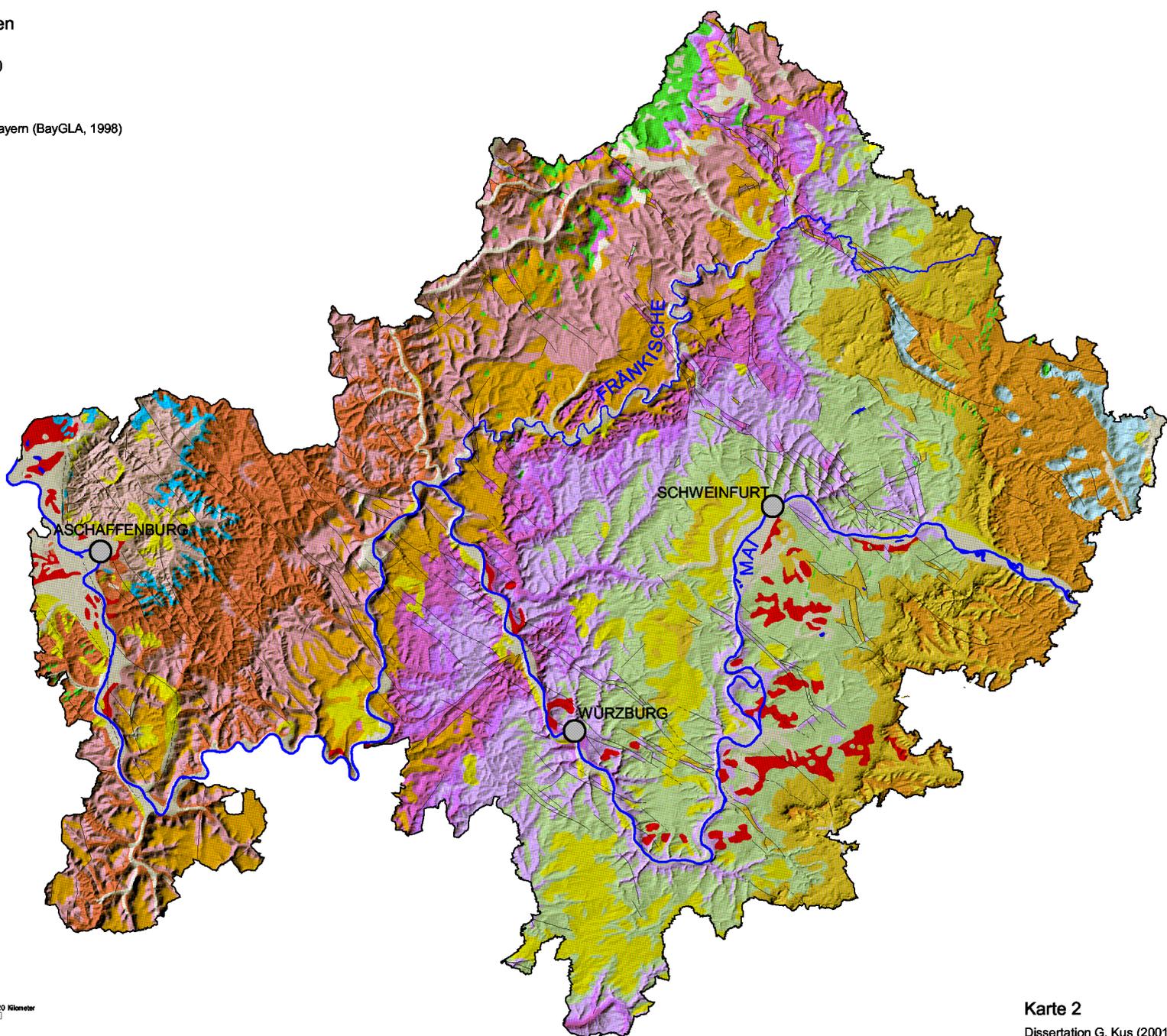
Topographische Angaben: TK 500, TK 25

Relief: DGM 50

Geologie: digitale Fassung der Geol. Karte v. Bayern (BayGLA, 1998)

Geologische Einheiten

	Gewässer
	Quartär ungegliedert
	Löss, Lösslehm
	Flugsand
	Tertiär (vorwiegend Basalt)
	Feuerletten, Rhät-Lias-Übergangsschichten
	Sandsteinkeuper
	Gipskeuper
	Unterer Keuper
	Oberer Muschelkalk
	Mittlerer Muschelkalk
	Unterer Muschelkalk
	Oberer Buntsandstein
	Mittlerer Buntsandstein
	Unterer Buntsandstein
	Zechstein (untergeordnet Rotliegend)
	Kristallin
	nachgewiesen
	Störungen
	vermutet



Geowissenschaftliche Spezialliteratur in Unterfranken
bezogen auf die Blattsnitte der TK25

-  TK 25 - Gitter mit Angabe der Blattnummer
-  GK 25 vorhanden
-  GK 25 + BK 25 vorhanden

Hahn (1986): Dissertation

Udluft (1969): Dissertation mit hydrogeologischen Daten

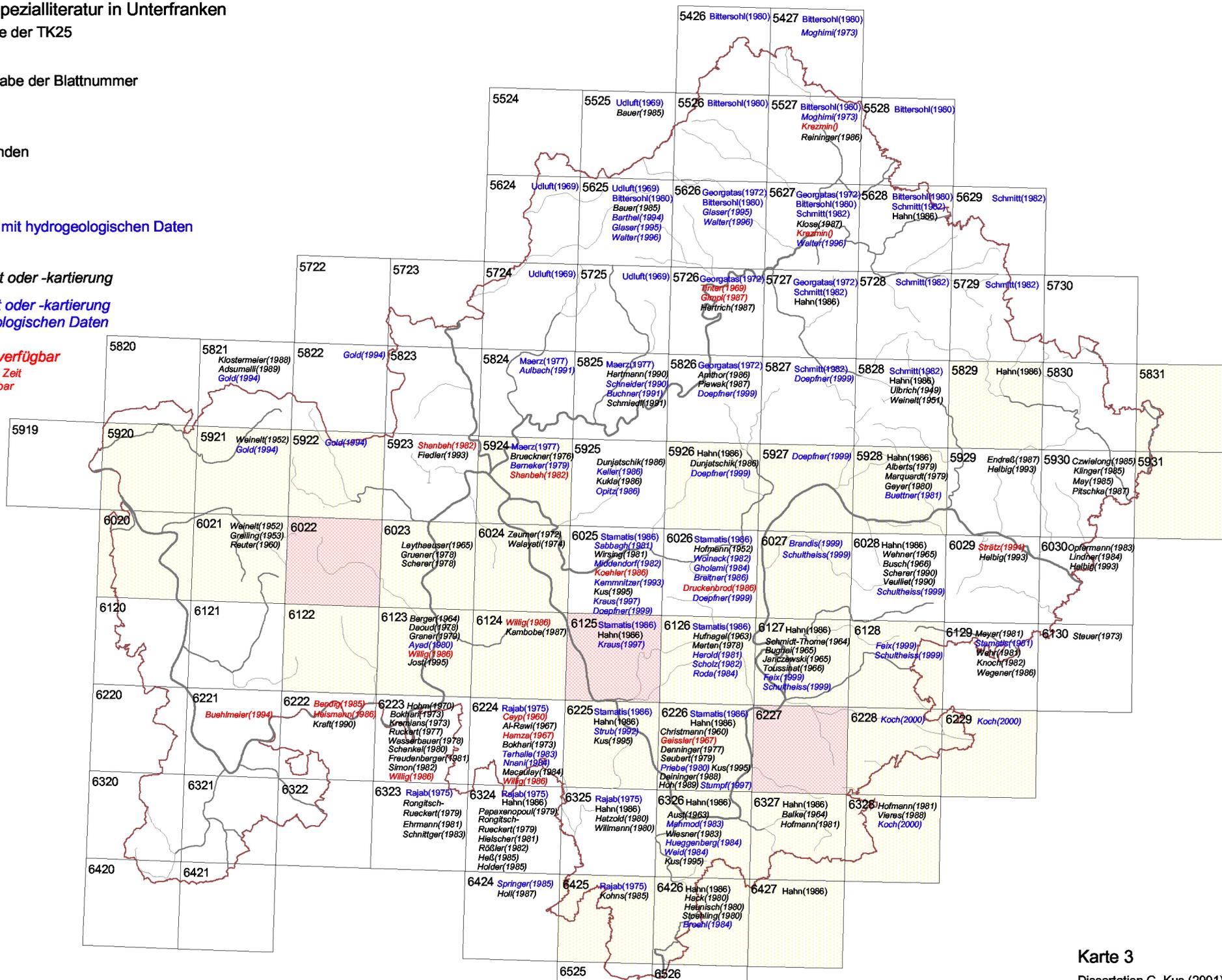
Geyer (1980): Diplomarbeit oder -kartierung

Koch (2000): Diplomarbeit oder -kartierung
mit hydrogeologischen Daten

Straetz (1991): Arbeit nicht verfügbar

Arbeit war entweder auf unbestimmte Zeit
entliehen oder prinzipiell nicht einsehbar

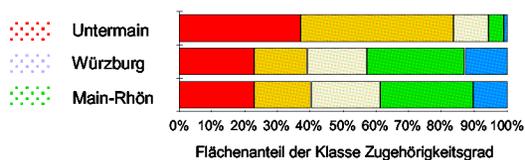
 RBZ-Grenze
Unterfranken



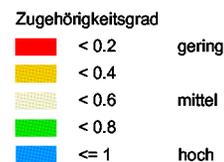
Ablagerungsfreundlichkeit von Regionen in Unterfranken gegenüber Schlackedepositionen

Topographische Angaben: TK 500, ATKIS 25 (Vorstufe)

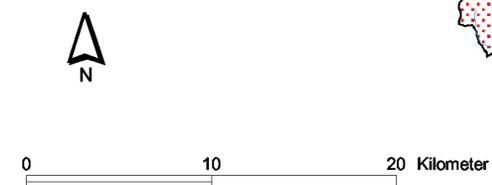
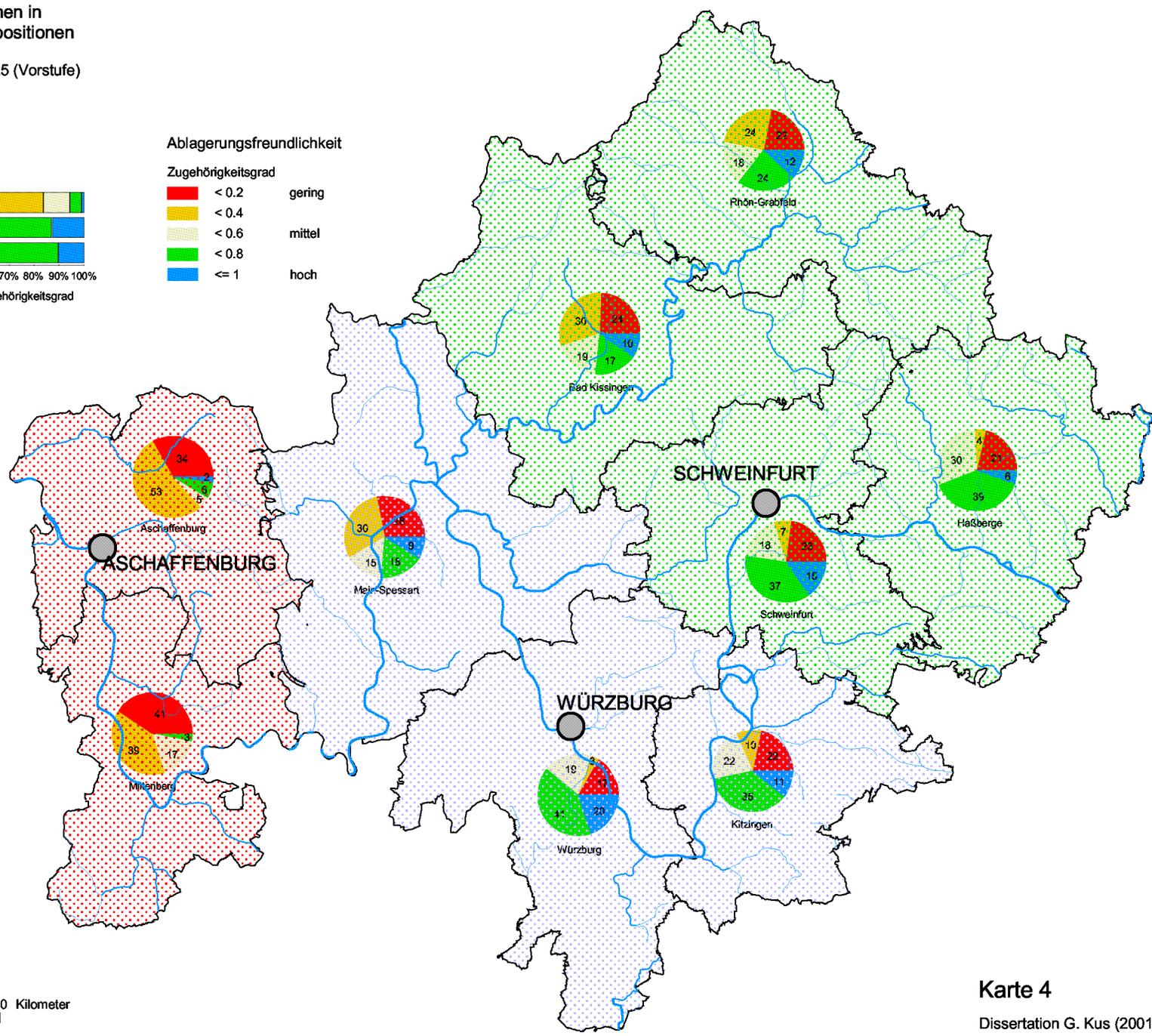
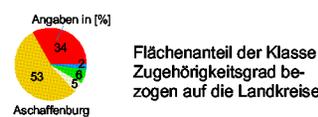
Planungsregionen



Ablagerungsfreundlichkeit



Landkreise



Aufbereitungsanlage und potentielle Transportwege für MV-Schlacken in Unterfranken

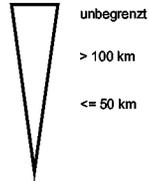
Topographische Angaben: ATKIS 25 (Vorstufe)

potentielle Transportwege für MV-Schlacken

-  Main als Schifffahrtsweg
-  Bahnlinie
-  Bundesautobahn
-  Bundesstraße, Landstraße, etc.

vertretbare Transportentfernung

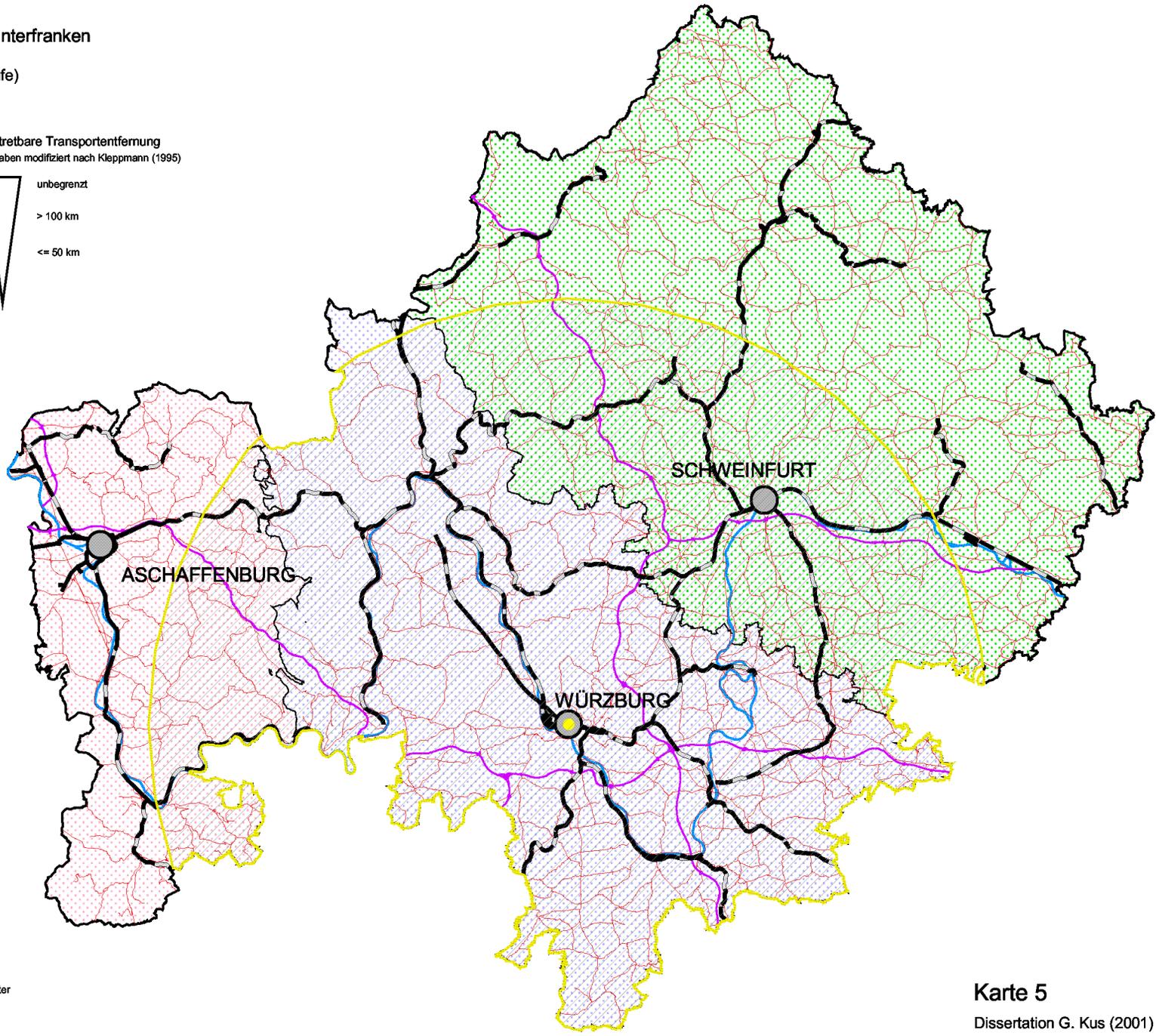
Angaben modifiziert nach Kleppmann (1995)



Planungsregionen

-  Bayerischer Untermain
-  Main-Rhön
-  Würzburg

-  MV-Schlacke-Aufbereitungsanlage Würzburg
-  50 km Zone bezogen auf die MV-Schlacke-Aufbereitungsanlage Würzburg



Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name: Günter Joachim Kus
Geburtsdatum: 01.06.1966
Geburtsort: Würzburg
Adresse: Am Wasserhaus 6, 97236 Randersacker

Ausbildung:

1981 – 1985: Berufsausbildung zum Elektroinstallateur bei der Firma Elektro Pfeuffer in Würzburg (Gesellenbrief)
1985 – 1986: Berufsaufbauschule (Fachschulreife)
1988 – 1988: Berufsoberschule in Würzburg (Abitur)
1988 – 1989: Wehrpflichtiger

Studium und Universität:

1990 – 1995: Studium der Geologie-Paläontologie an der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg (Diplom).
1995 – 1996: Nebenberufliche wissenschaftliche Hilfskraft im Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt der Universität Würzburg.
Okt. 1997: zweiwöchige Lehrveranstaltung an der Universidade Federal do Paraná zum Thema „GIS in der Hydrogeologie“, gefördert durch den DAAD.
1997 – 2000: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt der Universität Würzburg.
Dez. 1998 – Feb. 1999: Forschungsaufenthalt in Curitiba, Brasilien. Zusammenarbeit mit den Behörden der Stadt Curitiba und des Bundesstaates Paraná bei der Erörterung verschiedener Projektvorschläge im Bereich Ressourcennutzung und -schonung, gefördert durch die Bayerische Staatskanzlei.

Weitere Praxis:

1998 – 2000: Freiberufliche Tätigkeit bei verschiedenen Ingenieurbüros im Bereich Altlastenerkundung und Grundwassererschließung.
seit 2001: Angestellter im Büro für Geotechnik und Umweltfragen – Dr. Schott und Partner in Würzburg.