

**Band / Volume 49/50, Jahrgang / Issue 1998/99**

**ZÖTL, J. G., M. A. GEYH, F. RIEPLER, A. METTOS & Ch. GEORGIU:** Klimaepochen, eustatische Meeresspiegelschwankungen und Strandterrassen im östlichen Mittelmeer (Griechenland)  
*Climatic Cycles, Eustatic Changes of the Sea Level and Shore Terraces of the Eastern Mediterranean (Greece)*

**Zusammenfassung, Folgerungen und Bemerkungen**

Das Studium mariner Strandterrassen im östlichen Mittelmeer setzte eine sorgfältige Planung und Durchführung der notwendigen Feldarbeiten unter Berücksichtigung der Entwicklungsgeschichte sowohl des Themas als auch der Arbeitsmethoden und Hilfswissenschaften voraus. Die Einführung brachte daher in gebotener Kürze Hinweise auf die Geochronologie des Pleistozäns. Von Bedeutung waren Messungen des Gehaltes von Deuterium und Oxygen-18 im Abfluß der großen Quellen der Kalkhochalpen sowie des Anteils des Niederschlages der verschiedenen Jahreszeiten (Fig. 2.1). Diese Meßergebnisse aus den Jahren 1968-1971 gehören zu den kleinen Schritten vor der Erfassung langzeitiger Perioden von Warm- und Kaltzeiten von weltweitem Umfang.

Figur 3.1 ist ein Diskussionsbehelf zur Nutzung der O-18-Werte. Die Kurve Fig. 3.1/A ist eine Auswertung der von N. G. PISIAS & N. J. SHACKLETON (1984) und D. G. MARTINSON et al. (1987) aufgebaute Datenprojektion. Sie dient als solche der Subsumierung der Daten, die H. SCHWARCZ & C. YOUNGE (1983) zur Eingrenzung der Kalt-(Glazial-) und Warm-(Interglazial-)Zeiten und Freilegung der Übergangsperioden nutzten. Letztere erfaßten deutlich das (oder die) Würm-Interstadial(e), was sich später für Vergleiche der Terrassen verschiedener Untersuchungsgebiete hilfreich erwies.

Von Bedeutung waren die mit der U/Th-Altersbestimmung verbundenen Schwierigkeiten. Mit den Datierungsproblemen der Strandterrassen hat sich M. A. GEYH im Kap. 5 auseinandergesetzt.

Bei den Feldarbeiten wurden möglichst dicke Mollusken mit dem Preßlufthammer freigelegt. Die Meßergebnisse waren das Produkt von Laborarbeiten, wobei in wichtigen Fällen auf empirische Erkenntnisse von M. A. GEYH zurückgegriffen werden konnte. Die gesamten Meßdaten mit detaillierten Zahlen (Tab. 5.1) bilden den Abschluß. Gekürzte Angaben begleiten die Beschreibungen der Arbeitsgebiete. Die zu Beginn getroffene Entscheidung,

die Untersuchungen nicht auf ein Gebiet zu konzentrieren, sondern gezielt auf mehrere erfolgversprechende Bereiche des östlichen Mittelmeeres anzusetzen, erwies sich als richtig.

Die Feldarbeiten und Probenahmen auf **Kreta** konzentrierten sich aufgrund des vom IGME vorgegebenen zeitlichen Rahmens auf Gebiete, von denen bereits entsprechende geologische Untersuchungen vorlagen. Bereiche dieser Art waren die mittlere und östliche Nordküste der Insel. Das Gebiet ist durch eine Anzahl starker Störungen von sehr heterogener Natur. Am Beginn des mittleren Abschnittes beherrschen Karstphänomene die Küste. Starke submarine Quellen in etwa 30 m Tiefe und die Zirkulation von Meer- und Süßwasser aus dem Gebirge des Hinterlandes sind nachgewiesen, ebenso wie die in dieser Tiefe ausgedehnten Terrassen auf eine langzeitige Vorflutwirkung zurückblicken. Auch die weiter östlich am Westrand der Bucht von Heraklion entspringende stärkste Quelle Kretas (Almyros) ist ein Brackwasserüberlauf. Weiter bis zum Ostende der Nordküste wurden nur vier Einzelproben gezogen, von denen die aus einem Konglomerat bei Malia entnommene eine Altersbestimmung von 84 ka (Eem-Zeit) aufweist. Im NE wird eine gegenwärtige neotektonische Senkung von 2,5 mm/a angenommen.

Die Südostküste zeigt für die Probenahme günstige Bedingungen. Über eine Strecke von ca. 50 km erstrecken sich Terrassen in verschiedener Seehöhe von 2 m bis zu 40 m a.s.l., deren später gemessenes U/Th-Alter zwischen 93 und >336 ka liegt. Weitere Bereiche wurden noch im S und N der Westküste beprobt. Der Schwerpunkt lag hier im NW. Dort liegt der Strand des noch im Jahr 365 A.D. geschichtlich erwähnten Hafens von Falasarna heute 6,6 m über dem Meeresspiegel (P. A. PIRAZZOLLI et al., 1992).

Wesentlich stärker als auf Kreta tritt im südlichen Teil des **Peloponnes** die Parallelität der Küsten mit dem Verlauf der jungen Störungslinie der quartären Tektonik zutage. Figur 7.1 erspart uns, was die Tektonik anbelangt, einführende Worte. Den quartären Verwerfungen entlang der Küsten folgen auch die Strandlinien der Eem-Zeit in den Golfbereichen des Südens.

Im Vergleich der Abschnitte A und B auf Fig. 7.1 sind verschiedene tektonische Gegebenheiten von Kreta und dem Peloponnes augenscheinlich. Selbst im kleinen Maßstab kommt die blockartige Zerbrechung Kretas zum Ausdruck. Der tektonische, SW-NE verlaufende Graben von der Ostseite der Bucht von Mirabella und Ierapetra wurde eingefügt. Beachtenswert ist auch, daß die in die in Teil B durch Punktreihen eingetragenen Richtungen seichtliegender submariner geomorphologischer Linien genau an jenem Teil der

Nordküste Kretas entlang ziehen, wo in der Beschreibung der Feldarbeiten die submarinen Terrassen eines kaltzeitlichen Erosionsniveaus entstanden sind.

Der Tabelle 6.4 ist zu entnehmen, daß die eem-zeitlichen Terrassen im Golf von Lakonien sehr niedrig liegen (ca. 3 m a.s.l.), auch die Terrassen aus dem Mindel-Riss-Interglazial (Holstein, >230 ka) liegen nur um 20 m a.s.l.. Ähnliche Verhältnisse herrschen im Golf von Messenien, wo eine Terrasse aus einem Spät-Riss-Interstadial (139 ka) bei ca. 15 m a.s.l. liegt. Diese auf die quartäre Tektonik zurückgehende Situation läßt für eine Gliederung der Terrassen nach der Höhe und für die Einschaltung eines Tyrrhenien keinen Spielraum.

Starke tektonische Verstellungen wurden in den Ufern der Straße von Korinth im N der Halbinsel registriert. Eem-Terrassen (nach älterer Bezeichnung „Tyrrhen“) wurden im Raum von Korinth in verschiedensten Höhenlagen gemessen (vgl. Tab. 5.1), wobei nicht klar feststellbar ist, inwieweit die Höhendifferenzen auf tektonische Versetzungen zurückzuführen sind. Eindeutige Bestimmungen des Eem-Alters liegen noch von den Proben Kap Ireon (92 ka, ca. 40 m a.s.l.) und Mavra Lithawia (91 ka, 5-6 m a.s.l.) im mittleren Bereich der Straße von Korinth nach Patras vor.

Es ist den geologisch-geomorphologischen Verhältnissen von **Zakynthos**, der südlichsten der Ionischen Inseln, zuzuschreiben, daß sich die Probenahme auf den äußersten SE beschränkte. Die Werte der Altersbestimmung liegen am Beginn des älteren Würm-Interstadials. Die Seehöhe der Terrassen schließt eine leichte tektonische Hebung nicht aus (vgl. Tab. 6.6).

Die ebenfalls geologisch bedingte Beschränkung der Probenahme auf die neogenen Küsten brachte im Fall der Insel **Kephallinia** den Vorteil einer Konzentration von Altersdaten. Es überraschte, daß von den Altersmessungen im SW sechs älter als 130 ka, die folgenden drei eem-zeitlich (94-118 ka) sind. Die einzige im SE durchgeführte Messung ergab 65 ka. Daß kein U/Th-Alter im Bereich des sonst stets vertretenen Würm-Interstadials liegt, ließ die Überlegung aufkommen, inwieweit daraus auf eine Schrägstellung der Insel zu schließen sei, durch die die jüngsten Terrassen heute unter dem Meeresspiegel zu liegen kamen. Diese Annahme wurde bestärkt durch die mit dem schweren Erdbeben von 1953 erfolgte Hebung, die die bisher nicht beachtete Schrägstellung noch vergrößerte.

Die endgültige Bestätigung brachte der Einblick in die neotektonische Darstellung der Kephallinia Bruchzone bei H. G. KAHLE et al. (1995). Die Situation ist übrigens im Detail der Seekarte von G. GIERMANN & M. PFANNENSTIEL (1960) bestätigt (Fig. 6.12).

Die Altersdaten der im Küstengebiet von **Prevesa** gesammelten Proben umspannen den Bogen vom Prä-Eem zum Eem, über das Würm-Stadial bis zum nacheiszeitlichen Küstenrand.

Die Zusammenfassung der jeweiligen geologischen Situation der Arbeitsgebiete und die Abhängigkeit der Terrassen von tektonischen Faktoren drängen zu einem Rückblick auf den geologischen Hintergrund. Dem folgt der Versuch, entsprechende Folgerungen und abschließende Bemerkungen vorzulegen.

Das Mittelmeer ist der Rest eines weit größeren Meeres, der Tethys der geologischen Vergangenheit. Der Rückzug des Meeres steht in einem gewissen Gleichgewicht mit der Orogenese der alpidischen Gebirge der Eurasischen Platten. Die Plattentektonik ist komplizierter als angenommen. Bei einem Zusammenstoß dieser beweglichen Körper wird im allgemeinen eine ozeanische Platte unter die kontinentale Platte geschoben (subduziert), was einerseits zur Bildung der langen Gebirgsketten (Alpen, Karpaten), andererseits zum Schmelzen der ehemaligen ozeanischen Platten und zur Entstehung von Vulkanen und zu Erdbeben an den Plattengrenzen führte (mio- und pliozäne Vulkane im Steirischen Becken).

Mit der Beruhigung der alpidischen Genese im weiteren Hinterland haben sich diese „Randerscheinungen“ tektonischer Unruhe an den Nordrand des Mittelmeeres verlagert. Vergleiche der Erdbeben im Bereich der Südwestküste der Balkanhalbinsel, im Ionischen Meer (Kephallinia 1953 mit dem Epizentrum unter Zakynthos), die Ausbrüche von Vulkanen und Erdbeben in Italien und besonders die Vulkanexplosion der Insel Santorin in der Ägäis. Auswirkungen der Druckspannungen zwischen der Afrikanischen Platte und Teilen der Europäischen Platte (Adria) haben unlängst zu den Erdbeben in Umbrien geführt (Fig. 7.2).

Dazu muß auf die nunmehr lebendigen Seitenverschiebungen, verbunden mit Nebenerscheinungen von Zerrungsbecken (pull apart) und Grabenzonen, verwiesen werden. Was das Wiener Becken in Mitteleuropa ist, finden wir, auf das Ionische Meer übertragen, in der KFZ (Kephallinia fault zone) (H. G. KAHLE et al., 1995 und Fig. 7.2.).

Dazu gehören schließlich die Schrägstellungen von Plattenresten (Kephallinia) und von der Kruste durchschlagende tektonische Versetzungen an der Erdoberfläche.

Einen entscheidenden Informationssprung von den nur geringfügigen Veränderungen epirogenetischer Natur (z. B. Hebung der Alpen gleichmäßig ca. 1-2 mm/a) bilden die Meßergebnisse neotektonischer Plattenbewegungen durch die Präzision der Satellitengeodäsie. So wurde für den gesamten Bereich des Ionischen Meeres eine tektonische Bewegungsrichtung NE–SW mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/a festgestellt (H. G. KAHLE et al., 1995). Das bedeutet auch eine Veränderung des Verlaufes der Inselküsten von 20 m pro tausend Jahren. **Die Zeitspanne seit dem Höhepunkt des letzten Hochglazials beträgt um 20 ka, dem entspricht eine Küstenverschiebung von 400 m**, was eine bedeutende Veränderung durch die Abtragung zur Folge haben kann. Eine Aussage von entscheidender Bedeutung für das gesamte Thema dieser Arbeit ist dann gegeben, wenn es um die Beträge der vertikalen Bewegung geht. Legt man einem Küstenbereich eine Hebung im Ausmaß von 5 mm/a (gemessen wurden an der Küste des Ionischen Meeres bis 7 mm/a) zugrunde, so bedeutet dies eine tektonische Hebung von 5 m pro tausend Jahren bzw. 50 m/10 ka oder **100 m/20 ka**. Was Angaben des Ausmaßes neotektonischer Senkungen betrifft, darf auf Werte im Text verwiesen werden.

Zu den **wesentlichsten Erfahrungen aus den Ergebnissen der Feldarbeiten und Altersbestimmungen** zählt die Tatsache, daß die Typisierung der Terrassen im östlichen Mittelmeer weder nach einem scheinbaren locus typicus, noch nach der Höhenlage oder einem Leitfossil erfolgen kann. Daraus ergibt sich weiters, daß Vergleiche mit Bereichen langfristig tektonisch stabiler Küsten wie etwa des Südchinesischen Meeres (H. D. TJI A et al., 1975, 1976, N. J. SHACKLETON, 1987) oder auch nur des Atlantik nicht zielführend sind.

Es wäre jedoch ein fataler Fehlschluß, von diesen Vergleichen die Annahme abzuleiten, daß die klimabedingten Meeresspiegelschwankungen im europäischen Mittelländischen Meer etwa mit den Spiegelschwankungen des Atlantischen Ozeans nicht im Einklang stünden. Die Gründe der gegensätzlichen Umstände sind ausschließlich tektonischer Natur, die den Nordsaum des östlichen Mittelmeeres in eine Kette tektonisch verstellter Terrassen verwandelten.

Schließlich ist die Frage zu beantworten, inwieweit gemessene Werte einer klimatischen Epoche bzw. deren Unterteilung zur Bemessung von Terrassen herangezogen werden können (z. B. Eem-Terrassen, Terrasse des Würm-Interstadials). Dies scheint uns grundsätzlich möglich. Da in einer breiteren fossilführenden Schicht aber häufig Klimagrenzen überschreitende Alterswerte vorkommen, soll dies (soweit bekannt) auch in der Benennung zum Ausdruck kommen (z. B. Eem-Würm-Interstadial, WI-Terrasse), wobei der jüngsten Zeitspanne der Vortritt geboten werden sollte, weil sie – die Oberfläche bildend – Träger des geomorphologischen Geschehens der Gegenwart ist.

Eine letzte Bemerkung gilt der Darstellung des zeitlichen Ablaufes der Meeresspiegelschwankungen.

Bei der Darstellung einer Zeitkurve von Strandterrassen auf der Basis von U/Th-Altern müßte auch der fortlaufende Einfluß der Tektonik berücksichtigt werden. P. A. PIRAZOLLI et al. (1991) haben eine diesbezügliche Berechnung unter Annahme einer gleichmäßigen Hebung von 0,5 mm/a für den Zeitraum von 1 Mio. Jahren durchgeführt und dazu das Modell eines Bezugsdiagrammes von Strandlinien, Isotopenkurve und epirogenetischer Hebung konstruiert (P. A. PIRAZOLLI et al., 1991, Fig. 2). Als Bezugsbeispiel diente den Autoren die Abfolge der Korallen-Riffterrassen der Küste der Insel Sumba (Indonesien) von 0-300 ka.

Die daraus abzuleitende Folgerung, auf diese Art auch eine Kurve der Wasserspiegelschwankungen über mehrere Klimaepochen abzuleiten entwarfen E. BARDE et al. (1992). Sie konstruieren eine Kurve der Meeresspiegelschwankungen in Metern entsprechend den U/Th-Altersmessungen bis 270 ka.

Der in dieser Kurve liegende Höhepunkt der Eem-Zeit (120 ka) liegt dort 7 m höher als jener des Holozäns. Der nächstältere warmzeitliche Höhepunkt des Wasserspiegels vor 220 ka liegt weitere 10 m höher als der Peak der Eem-Zeit.

Zunächst war verlockend, diese Kurve durch die eigenen Meßdaten zu ergänzen, zumal die auf dieser Kurve liegenden U/Th-Meßdaten sich auf die Zeit des Holozäns bis zum Hoch-Würm und auf das Hoch-Eem konzentrierten. Für die dazwischenliegende Würm- und Eem-Zeit liegen nur sieben U/Th-Alter vor. Ein Zeitabschnitt, der durch unsere Aufnahmen mit über 30 Meßdaten abgedeckt wird.

Ein Hauptgrund von der Nutzung dieser Kurve der Meeresspiegelschwankungen abzusehen war vor allem der Umstand, daß sich diese Kurve ausschließlich auf Meßdaten von ungestörten Korallenriffen (der Insel Barbados) stützt.

Alle Überlegungen führten schließlich zu der Entscheidung, die gewonnenen U/Th-Alter der beschriebenen Untersuchungsgebiete in die von den Autoren N. G. PISIAS & N. J. SHACKLETON (1984) bzw. D. G. MARTINSON et al. (1987) entworfenen Standardkurve einzuordnen (Fig. 7.3), wobei für die Proben der einzelnen Untersuchungsgebiete verschiedene Signaturen verwendet wurden.

Eine Schwierigkeit tat sich durch den kleinen Maßstab der Kurven auf: Selbst die so klein wie möglich gehaltenen Zeichen gemessenen Altes von Proben der jeweiligen Versuchsgebiete vereinnahmen ein Zeitausmaß von etwa 2 ka.

Optisch signalisiert das Auge auf den ersten Blick die fehlenden Signaturen des Ionischen Bereiches im Zeitabschnitt des Würm-Interstadials, eine Bestätigung der abgesunkenen Terrassen dieses Zeitabschnittes. Klar ersichtlich in Fig. 7.3 sind gewisse Ballungsbereiche, von denen vor allem jene zu beachten sind, die alle drei Signaturen enthalten. Wenig ins Auge stechen „leere“ Zeitabschnitte plus/minus mit kaum einem Beleg, von denen zwei durchaus nennenswert sind (73–81 und 111–116 ka). Beide liegen an einem steilen Abfall der Kurve zu jüngeren Phasen: Am Ende des Hoch-Eem bzw. in der Übergangszeit vom Spät-Eem zum Früh-Würm.

Bezüglich des Riss-Würm-Interglazials bestehen Unstimmigkeiten in der Benennung der Epoche. M. A. GEYH sieht im Eem nur den Zeirabschnitt von 125–112 ka des gesamten Riss-Würm-Interglazials von ca. 125–80 ka, während andererseits der Abschnitt von 125–112 ka als Hoch-Eem aus dem gesamten Interglazial herausgehoben wird. Es herrscht in der Tat mehr Klarheit, wenn wie bei den anderen Warmzeiten die Benennung der begrenzenden Kaltzeiten mit einbezogen wird. Aus internen Gründen wird jedoch das Eem als Bezeichnung des gesamten Riss-Würm-Interglazials beibehalten.

Das Fehlen von U/Th-Altersdaten für die Zeit von 116-110 ka spricht in der Tat für ein Absinken des Meeresspiegels mit einem durchschnittlichen Gefälle von 95 mm/a, ohne Ruhephase für die Bildung von Korallenbänken. Entsprechend der nächsten datierten Messung von E. BARD et al. (1992), die in Fig. 1 von den Autoren leider in die Konstruktion der Kurve nicht eingebunden wurde, könnte ein „event“ vorliegen, der durch

eine Einschaltung eines kurzen Intervalls von Wiederanstieg und Fortsetzung der Absenkung den allgemeinen Zyklus zwar unterbrach, im großen aber nicht störte. Ein Blick in den Anhang der Daten der gemessenen Klimaindikatoren bei den Autoren D. G. MARTINSON et al. (1987, p. 25) zeigt für die Zeit von 97–103 ka schwankende  $^{18}\text{O}$ -Werte, die die Annahme dieser Klimaschwankungen unterstützen. Dasselbe gilt für die  $^{18}\text{O}$ -Kurve von Fig. 7.3.

Es besteht demnach aber auch kein Grund, die Zeit von 116-73 ka nicht der Eem-Epoche zuzurechnen. Ähnliches gilt für das Spät-Eem 81-73 ka B.P..

Nach diesen Erkenntnissen ist die Sauerstoff-18-Kurve die Basis der Klimaepochen Würm (W), Weichsel-Kaltzeit, Eem (Würm-Riss-Interglazial), Saale (Riss-Kaltzeit), Holstein (Riss-Mindel-Interglazial) und Mindel-(Elster-)Kaltzeit eingeteilt. Unterteilungen wie Holozän (H), Spätwürm (SW) etc. (siehe Fig. 7.3) sind Übergangsphasen. Das Spät-Eem (SE) ist der oben bereits erwähnte strittige Abschnitt zwischen Würm- und (Hoch-)Eem (HE). Die ebenfalls lange in ihrem Zeitabschnitt nicht genau begrenzte Saale-(Riss-)Epoche ist durch die erhebliche Anzahl von neuen Meßdaten weitgehend geklärt.



**MENNE, B.:** Carbonatolyse und Biokonservierung als Mechanismen der Verkarstung und Speläogenese

*Carbonatolysis and Bioconservation as Mechanisms of Karstification and Speleogenesis*

### **Zusammenfassung**

Verkarstungsprozesse und Höhlenbildung sind Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufes. Die wichtigsten Modelle der Kalklösung sind auf abiotische Vorgänge konzentriert. Dabei werden vor allem der Erosion, Normalkorrosion, der Mischungskorrosion und in neuester Zeit den kinetisch geprägten Lösungsmodellen Aufmerksamkeit geschenkt. Obwohl biogene Stoffumwandlungen als wesentlicher Faktor der Bildung von Karbonatgesteinen betrachtet werden und als wichtigste CO<sub>2</sub>-Quelle während der Bodenpassage gelten, sind solche Überlegungen in der Vergangenheit zumeist mit dem Eintritt des potentiellen Karstwassers in selbigen Gesteinsuntergrund abgebrochen worden. Erst beim Wiederaustritt in der Quelle interessierten dann aus epidemiologischer Sicht wieder biologische Fragen. Dafür gibt es jedoch keine objektiven Begründungen.

Mikrobiologische Untersuchungen an Höhlensedimenten, vorwiegend mit Hilfe der Myxobakterien, zeigen, daß typische Bodenbakterien weder zufällig noch rein durch hydrologische Vorgänge verteilt im Subterranum vorkommen. Arttypische und reproduzierbare Biotopmuster sowie Besiedlungsstrategien sind im Verein mit physiologischen Anpassungen nachgewiesen worden. Biofilme wurden in reicher Anzahl auf allen unterirdischen Kluftsystemen beobachtet. Hier finden Stoffumsetzungen unterschiedlichster Art statt. Manganfixierung oder Carbonatfällung sind beobachtete Beispiele.

Da der Verkarstungsprozess an sich als Grenzflächenreaktion am Interface Wasser/Gestein aufzufassen ist, nehmen alle Biocoenosen, die sich auf dieser Grenzfläche befinden, auf unterschiedliche Art Einfluß auf die Korrosionsdynamik und das Kalk-Kohlensäure-System. Ein korrosionsfördernder Einfluß wird im Rahmen dieser Arbeit als „Carbonatolyse“ bezeichnet, ein hemmender Effekt mit dem Terminus „Biokonservierung“ belegt.

**FANK, J.:** Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich)

*The Role of the Unsaturated Zone for Groundwater Recharge and Nitrate Leaching to Groundwater in Quaternary Porous Aquifer Systems illustrated in the "Leibnitzer Feld" (Styria, Austria)*

### **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit hat das primäre Ziel, den Gesamtkomplex der ungesättigten Zone eines Aquifers in fluviatil verlagerten glazialen Schottern mit geringmächtigen Bodenbildungen hinsichtlich Grundwasserneubildung und Stofftransport auf der Grundlage von Meßdaten analytisch und interpretativ zu beleuchten. Dieser Anspruch definiert ein ausgesprochen paxisorientiertes Ziel: Nicht die wissenschaftliche Identifikation von neuen Prozessen steht im Vordergrund, sondern die Umsetzung von vorhandenem Wissen zur Erfassung und Lösung von Problemen in einem interdisziplinären Ansatz. Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Sachgebiete in ihrer räumlichen Ausprägung erhält das Projekt auch seinen geographischen Bezug: Die Frage der zeitlich und räumlich differenzierten Grundwasserneubildung und der Stickstoffemission in Abhängigkeit von unterschiedlichen Landnutzungsformen, unterschiedlichen Bewirtschaftungsweisen und differenzierten Bodenformen unter Berücksichtigung gegebener klimatologischer, hydrogeologischer und wasserwirtschaftlicher Rahmenbedingungen ist eine hochgradig geographische Fragestellung.

In einem Großteil der bis dato durchgeführten Untersuchungsprogramme wurde die Frage der Wasserbewegung und noch stärker der Stoffumsetzung entweder aus der Sicht der Bodenkunde und der Landwirtschaft oder aus der Sicht der Grundwasserhydrologie betrachtet. Während für die Landwirtschaft - und mit Einschränkungen auch für die Bodenkunde - das Ausgangsgestein zur Bodenbildung als nahezu inerter Körper betrachtet wurde, interpretierte die Grundwasserhydrologie ihrerseits die ungesättigten Deckschichten über dem Grundwasserkörper in ihrer Gesamtheit als einen undifferenzierten Sicherheitspolster für den Schutz des Grundwassers sowohl was die Verweildauer als auch die Filterwirkung des Bodens betraf. Genau an der Schnittstelle der genannten Wissenschaftsbereiche sollen die methodischen Ergebnisse dieser Arbeit wirksam werden und zu einem besseren

Verständnis der Prozesse der Anreicherung des Grundwassers und des damit verbundenen Stoffeintrages führen.

Das „Leibnitzer Feld“, eine Talweitung des Murtales zwischen Wildon im N und dem Übergang in das „Untere Murtal“ bei Straß im S, stellt aufgrund der hydrogeologischen Rahmenbedingungen einen hervorragenden Grundwasserleiter dar, in dem in erster Linie durch infiltrierendes Niederschlagswasser ein Trinkwasserreservoir gespeist wird, das heute für die Einzel-, kommunale, regionale und überregionale Wasserversorgung von etwa 80 000 Menschen genutzt wird. Die Intensivierung der Landwirtschaft auf den gut durchlässigen Böden der Schotterterrassen führte zwangsläufig zu Qualitätsproblemen im Grundwasser. Es bildete sich ein Konfliktfeld zwischen der Wasserversorgung und der Landwirtschaft aus, wobei es galt, Lösungssysteme zu erstellen, die es erlauben, bei einer ökonomisch sinnvollen Landwirtschaft die Einhaltung der von Seiten des Wasserrechtsgesetztes vorgegebenen Trinkwassergrenzwerte, und hier vor allem des Nitratgehaltes im Grundwasser zu gewährleisten.

Die bis Anfang der 90er Jahre durchgeführten Untersuchungsprogramme zeigten, daß der überwiegende Teil der Nitratbefrachtung des Grundwassers aus der intensiven landwirtschaftlichen Düngung stammt. Während über die Verhältnisse in der gesättigten Zone ein sehr guter Wissensstand vorlag, fehlten bis dahin über die Sickerwasserbewegung in der ungesättigten Zone des Leibnitzer Feldes jegliche Meßdaten. Die fachlichen Grundlagen für die Nutzungsbeschränkungen der Landwirtschaft in den Schutz- und Schongebieten mußten aus Unterlagen und Berechnungen von anderen Gebieten abgeleitet werden, was sich jedoch sehr bald als Schwachpunkt der gesamten Modellkonzeption herausstellte, da ohne Bezugnahme auf die realen Verhältnisse des Leibnitzer Feldes und seiner naturräumlichen, wie auch klimatologischen Rahmenbedingungen sowohl im wissenschaftlichen Bereich als auch bei den betroffenen Landwirten Unsicherheiten über die Zweckmäßigkeit der Maßnahmen bestehen blieben und keine konkreten Vorstellungen über die Zeiträume bis zu deren Wirksamwerden im Grundwasser vorlagen.

In Kap. 2. werden die physisch-geographischen und hydrographischen Charakteristika des Leibnitzer Feldes zusammenfassend dargestellt. Über den wasserstauenden jungtertiären Ablagerungen bilden jungquartäre Lockergesteinsablagerungen der Mur den Hauptgrundwasserleiter mit typischen Durchlässigkeiten in der Größenordnung  $10^{-3}$  m/s.

Dieser Aquifer wird von der Mur in das nordöstliche, das westliche und das südliche Leibnitzer Feld geteilt. Laßnitz und Sulm bilden die Westgrenze des Leibnitzer Feldes und wirken auf den Aquifer durch Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken ein. Die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag über die ungesättigte Bodenzone bildet einen entscheidenden Faktor für die hydrogeologische Situation und die Nitratproblematik im Leibnitzer Feld. Aufgrund der Verteilung der Grundwasserneubildung in räumlicher und zeitlicher Ausprägung und der herrschenden hydraulischen Verhältnisse im Grundwasserkörper bezüglich der existierenden Vorfluter ist nur der unterste Teil der quartären Talfüllung mit Grundwasser erfüllt. Der darüberliegende Bereich der Sande und Kiese sowie die überlagernden feinklastischen Böden bilden zusammen die ungesättigte Zone des Grundwassersystems mit mittleren Mächtigkeiten von großteils  $< 3$  m im Bereich der Murtalau und Werten zwischen 4 und 8 m auf der Niederterrasse. Im Bereich älterer Terrassenreste erreicht die Mächtigkeit der ungesättigten Deckschichten maximal 9 m. Bei mittlerem Grundwasserstand weist der Grundwasserkörper im nordöstlichen Leibnitzer Feld in Abhängigkeit zu den Hauptanreicherungsgebieten und der Ausformung des stauenden Untergrundes Mächtigkeiten zwischen 1 und 8 m auf. Im westlichen und südlichen Leibnitzer Feld liegen die Grundwassermächtigkeiten zwischen 1 und 10 m, der überwiegende Teil des westlichen Leibnitzer Feldes weist Grundwassermächtigkeiten zwischen 3 und 6 m auf.

Das Klima des Leibnitzer Feldes kann als schwach kontinentales, sommerwarmes und mäßig winterkaltes Talbodenklima beschrieben werden, das seine Charakteristik vor allem aufgrund der Lage südlich der Alpen erhält. Im langjährigen Mittel (1901 bis 1980) fallen in Leibnitz jährlich 949 mm Niederschlag, zum weitaus überwiegenden Teil als Regen, das mittlere Jahresmittel der Lufttemperatur liegt bei  $8,9^{\circ}$  C.

Die hydrologischen Verhältnisse im Leibnitzer Feld werden aufgrund der hohen Bedeutung dieses Grundwasserreservoirs bereits seit längerer Zeit intensiv erkundet. In der Anfangsphase trat der quantitative Aspekt sehr deutlich in den Vordergrund, galt es doch die Frage nach der verfügbaren Wassermenge abzuklären. Eine Aufarbeitung des gesamten Datenbestandes im Leibnitzer Feld erfolgte schließlich im Rahmen der Erstellung eines regionalen Grundwasserströmungsmodells, wo auch die Grundwasserqualitätssituation - vor allem hinsichtlich der inzwischen aufgebrochenen Nitratproblematik - bedeutungsvoll wurde. Generell sind Ende der 80er Jahre im gesamten Leibnitzer Feld überhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser zu

beobachten. Eine Ausnahme davon bilden lediglich die Bereiche der Murauen zwischen dem Weissenegger Mühlkanal und der Mur, den Laßnitz- und Sulmauen im westlichen Leibnitzer Feld und dem Bereich der Tillmitscher Seen, die als Nitratfalle wirken. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Qualitätsuntersuchungen im Jahr 1997 zeigt, daß sich an den prinzipiellen Verteilungsmustern nur sehr wenig geändert hat. Das Niveau der Nitratbelastung des Grundwassers ist aber wesentlich niedriger als noch wenige Jahre zuvor. Untersuchungen unter Zuhilfenahme von  $^{18}\text{O}$ - und Tritiumanalysen im Zuge der Erstellung des Grundwassermodells Leibnitzer Feld ergaben ein mittleres Wasseralter von vier bis fünf Jahren, sodaß im Grundwasser des Leibnitzer Feldes mit mittleren Austauschzeiten von 5 bis 10 Jahren in Abhängigkeit von der lokalen Position zu rechnen ist.

Da die in dieser Arbeit zu diskutierenden Probleme der Grundwassernutzung des Leibnitzer Feldes aus den Eingriffen des Menschen in seiner wirtschaftenden Aktivität auf die natürlichen Systeme und deren Rahmenbedingung resultieren, sind in Kap. 3. die humangeographischen Faktoren zusammengefaßt, die im Leibnitzer Feld auf das Grundwasser in seiner quantitativen Verfügbarkeit und seiner qualitativen Entwicklung einwirken. Eine Stärken-Schwächen-Analyse weist die Region Leibnitz als einen Raum mit Lagevorteilen zwischen den Großräumen Graz und Marburg aus, der durch hochrangige Verkehrsnetze an beide angebunden ist. Das hohe Bevölkerungspotential wird durch ein wachsendes - immer besser ausgebildetes - Erwerbstätigenpotential ergänzt, wobei die Strukturbereinigung im Industriebereich weitgehend abgeschlossen ist. Im Umweltbereich wird ein hochwertiges Ressourcenpotential erkannt. Die Nähe zu Slowenien wird aber auch mit der Entstehung eines neuen Konkurrenten im S in Zusammenhang gebracht. Da das hohe Bevölkerungs- und Erwerbstätigenpotential nicht befriedigt werden kann, ist ein hoher Auspendleranteil vorhanden, der durch Abwanderungstendenzen vor allem aus den peripheren Bereichen unterstützt wird. Im Umweltbereich deutet sich eine Bedrohung der Wasserreserven durch die Intensivlandwirtschaft und durch Industrie und Gewerbe an. Für die qualitative Situation des Grundwassers des Leibnitzer Feldes ist die Entwicklung der landwirtschaftlichen Strukturen von entscheidender Bedeutung. Im Jahre 1990 standen im Leibnitzer Feld 48 % der Katasterfläche unter landwirtschaftlicher Nutzung. Die Strukturveränderungen innerhalb der Landwirtschaft des Leibnitzer Feldes waren massiv, die wirtschaftlichen Notwendigkeiten führten zur Intensivierung, der Preisverfall landwirtschaftlicher Produkte sowie der vermehrte Einsatz von Maschinen hatte eine Abnahme der

Vollerwerbslandwirtschaften und einen gleichzeitigen Anstieg der Nebenerwerbslandwirtschaften zur Folge. Durch Aufgabe zahlreicher kleinerer Landwirtschaften kam es über Zukauf oder Pacht zu einer Abnahme der kleineren und einer besseren Flächenausstattung der größeren Betriebe. Dennoch besitzen die Betriebe im Leibnitzer Feld eine relativ geringe Flächenausstattung, was zu einer extremen Intensivierung und hier vor allem des Maisanbaues mit der daraus resultierenden Schweineproduktion führte.

Die Mur ist in ihrem gesamten Verlauf im Leibnitzer Feld durch eine Kette von Kraftwerken wasserwirtschaftlich genutzt. Der seichtliegende Grundwasserkörper des Leibnitzer Feldes dient als Trinkwasserreservoir, das für die Versorgung aus kommunalen Brunnenanlagen und für die überregionale Versorgung genutzt wird. Durch die großflächige Ausweisung von Schutz- und Schongebieten für die kommunalen Versorgungsanlagen ist nahezu die gesamte wasserhöfliche Würmterrasse in einer Schutzzone gelegen, was naturgemäß zu wirtschaftlichen Konflikten mit anderen Nutzungsformen in diesem Bereich führt (Schottergewinnung, Landwirtschaft, Industrie etc.). Aus den kommunalen Versorgungsbrunnen des Leibnitzer Feldes werden im Jahresschnitt etwa 100–110 l/s entnommen. Davon entfallen auf das nordöstliche und das südliche Leibnitzer Feld je etwa 15 %, die restlichen 70 % werden aus den Brunnen im westlichen Leibnitzer Feld entnommen. Der Jahressgang der Grundwasserentnahmen hat sein Maximum in den Spätfrühlings- und Sommermonaten, die geringsten Mengen werden im Winter gefördert.

Basierend auf der Erkenntnis, daß ein Schlüssel zur Erfassung der Prozesse, die zum Nitratproblem im Leibnitzer Feld geführt hatten, in der wasserungesättigten Zone zu suchen sei, wurde im Problemgebiet eine Forschungsstation errichtet, die es erlaubt, die Vorgänge der Wasserbewegung und des Stofftransportes von der Atmosphäre über den Boden, die ungesättigten Sande und Kiese der quartären Talfüllung bis in das Grundwasser zu untersuchen. Die wohl wichtigste Funktion der in Kap. 4 beschriebenen Anlage war die Möglichkeit der Erkundung der Wasserbewegung und des Stofftransportes in der ungesättigten Zone bis in das Grundwasser auf der Basis von hydrochemischen und isotopehydrologischen Analyseergebnissen auf der Grundlage natürlicher Landbewirtschaftung. Diese Forderung impliziert die Notwendigkeit der Einrichtung tiefengestaffelter, aber auch lateral versetzter Probenahmemöglichkeiten in der ungesättigten Zone, deren Ausformungen in Abhängigkeit von den natürlichen

Rahmenbedingungen durchaus unterschiedlich zu gestalten waren. Direkt mit diesem Anspruch verbunden ist auch die Forderung nach dem Einbau von Meßsystemen in der ungesättigten Zone, die es erlauben, die Untersuchungen unter ortsüblichen Bewirtschaftungsmaßnahmen durchzuführen. Es war notwendig, die Systeme so auszurichten, daß an der Oberfläche eine Befahrung mit Traktoren und eine maschinelle Bearbeitung uneingeschränkt ermöglicht wurde. Die Realisierung dieser Forderungen führte zu einer Anlage, in der von einem zentralen Meßschacht aus Meßsonden und Probenahmesysteme in unterschiedlichen Tiefen horizontal bis unter die bewirtschaftete Parzelle vorgetrieben wurden. Im Bereich des Oberbodens wurden monolithische Lysimeter eingebaut, die trotzdem eine maschinelle Bewirtschaftung der Flächen erlaubten. Eine intensive Beobachtung der obersten Schichte mußte allerdings zugunsten einer Intensivierung der Datenaufnahme in den unterlagernden Kiesen und Sanden im Standarduntersuchungsprogramm unterbleiben. Ein geeigneter Standort wurde im Bereich der Versuchsflächen des land- und forstwirtschaftlichen Versuchswesens des Landes Steiermark in Wagna gefunden, wo im Rahmen von Großparzellenversuchen mit Parzellengrößen von ca. 1000 m<sup>2</sup> seit den 80er Jahren die Auswirkung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Ertragssituation und auch auf den Stickstoffhaushalt im Boden untersucht wurden. Die Forschungsanlage konnte in einer Fahrgasse zwischen zwei Parzellen mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftung, einerseits einer Maismonokultur mit Schwarzbrache während der Wintermonate – die in diesem Bereich bis zum Beginn der 90er Jahre übliche Bewirtschaftungsform – und andererseits einer Parzelle mit einer Fruchtfolge, in der Mais nur noch zu 50 % enthalten war und wo während der Wintermonate eine winterharte Gründecke angebaut wurde, errichtet werden. Da die hier angeführten Versuchsfolgen bereits seit mehreren Jahren abliefen, konnte durch die Errichtung der Forschungsstation im Bereich dieser Versuchsfelder nach einer sehr kurzen Einlaufzeit mit signifikanten Ergebnissen gerechnet werden.

Die Forschungsstation Wagna besteht aus vier Haupteinheiten:

(a) Meteorologische Meßstation mit einer kontinuierlichen Aufzeichnung von Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Strahlung, Luftdruck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

(b) Zwei Meßprofile in der ungesättigten Zone unter Maismonokultur und unter der Fruchtfolgeparzelle. Beide Meßprofile beinhalten Meßsonden in fünf unterschiedlichen Tiefen mit einer automatischen Registrierung der Bodentemperatur, des Matrixpotentials und des Wassergehaltes sowie Saugkerzen zur Probenahme. Monolithische Lysimeter mit unterschiedlichen Erfassungstiefen im Bodenbereich und kleine Feldlysimeter in größeren Tiefen im Schotter ergänzen die Bilanzierungs- und Probenahmemöglichkeiten.

(c) Zwei Gefäßlysimeter mit denselben Landnutzungsbedingungen wie auf den Versuchspartellen, von denen jeder mit einer hydrologischen Wippe zur automatischen Registrierung des Sickerwasserflusses ausgestattet ist.

(d) Ein Grundwasserpegel, an dem der Grundwasserspiegel, die elektrische Leitfähigkeit in zwei Tiefen und die Grundwassertemperatur in fünf Meßtiefen erfaßt wird. An einer weiteren Sonde werden auch Grundwasserproben für die hydrochemische und isotopehydrologische Analyse gezogen.

Die feldbodenkundliche Aufnahme der beiden Bodenprofile ergab für die Fruchtfolgeparzelle eine Feinbodenmächtigkeit von 110 cm ausgebildet als kalkfreier lehmiger Sand auf Grobsand mit einem sehr hohen Anteil von Kies und Schotter. Im Unterschied dazu beträgt die Mächtigkeit des lehmigen Sandbodens für die Maismonokulturparzelle nur 70 cm. Die Humusgehalte in den Krümen haben mit 2 bzw. 1,7 % bereits ein sehr tiefes Niveau erreicht, die Schwermetallgehalte zeigen eine geringe anthropogene Belastung. Die Unterschiede ergeben sich aufgrund der differierenden Gründigkeit im unterschiedlichen Wasserspeichervermögen. Die Durchlässigkeit bei wassergesättigten Verhältnissen ist bei beiden Böden hoch. Auf die herkömmlich bearbeitete Körnermaisvariante wird die Gülle von drei Schweine-GVE (Großvieheinheiten) in zwei Teilgaben (ca. 90 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  vor dem Anbau, 90 kg im Juni) aufgebracht. Bei der Fruchtfolgevariante handelt es sich um eine vierschlägige Fruchtfolge, bei der auf zwei Maisanbaujahre Wintergetreide mit anschließendem Körnerraps folgen. Nach Mais bzw. Körnerraps wird ein winterhartes Zwischenfruchtgemenge eingesät. Je nach Fruchtart erfolgt die Gülleaufbringung in zwei bzw. drei Teilgaben mit Gesamtaufbringungsmengen zwischen 120 und 180 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Die Bodenbearbeitung auf der Fruchtfolgeparzelle erfolgt durch eine seichte Grubberung.

Der Beobachtungszeitraum an der Forschungsstation Wagna ist im Vergleich zur zeitlichen Variabilität hydrometeorologischer Parameter mit vier bis fünf Jahren



außerordentlich kurz. Die Ableitung von Kenngrößen für unterschiedliche Einflußgrößen auf den Wasserkreislauf aus dieser kurzzeitigen Aufzeichnung kann nur erfolgen, weil der Meßzeitraum im Vergleich zu langjährigen Untersuchungen ein breites Spektrum der auftretenden Verteilung widerspiegelt. Ein Vergleich der Daten der meteorologischen Station Wagna mit denen der Station Leibnitz/Sulm (ZAMG) zeigt, daß beide Stationen dasselbe Regime repräsentieren und somit die Station Leibnitz/Sulm für langfristige Auswertungen und Vergleiche herangezogen werden kann.

Die Auswertungen des Bodentemperaturverlaufes in den verschiedenen Tiefen im Vergleich der beiden unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen in den Jahren 1991 und 1992 zeigten deutliche Differenzen im Temperaturverlauf des Bodens bis in eine Tiefe von 250 cm, die auf die unterschiedliche Vegetationsbedeckung und Bewirtschaftungsweise zurückgeführt wurden. Es sind Auswirkungen der Temperaturdifferenzen auf die chemischen Umsetzungsprozesse in der Bodenzone zu erwarten, da für die Nitrifikationsprozesse im Boden neben den Feuchteverhältnissen die Temperaturverteilungen im Boden von großer Bedeutung sind.

Durch die an der Forschungsstation Wagna eingesetzten TDR-Sonden war es möglich, praktisch lückenlose Reihen der Wassergehaltsänderung in den einzelnen Horizonten des ungestörten Bodens aufzunehmen und somit die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen auf den Bodenwasserhaushalt zu dokumentieren. Sehr markant tritt die Ausschöpfung des Bodenwasservorrates durch die Kulturpflanzen während der Sommermonate in Erscheinung. Die Dauer dieser Trockenphasen im Boden resultiert aus den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen während des gesamten Jahres. Praktisch jedes Jahr wird im Winter bzw. Frühjahr im Bodenprofil ein Wassergehalt erreicht, der eine Auffüllung über Feldkapazität charakterisiert. Die in diesem Zeitraum auftretenden Spitzen sind Reaktionen auf Niederschlagsereignisse, die aufgrund der hohen Wassersättigung unmittelbar zu Grundwasserneubildungsereignissen führen.

Adsorptionskräfte und Kapillarkräfte bewirken zusammen mit Einwirkungen von außen die Bewegungen des Wassers im Boden und steuern die Aufnehmbarkeit für Pflanzen. In einem derart heterogenem System wie dem Boden sind Angaben über Größe, Richtung und Ansatzpunkte dieser Kräfte sehr schwer zu definieren, weshalb anstelle der Kräfte die Arbeit oder noch öfter die Arbeitsfähigkeit – das Potential – betrachtet werden kann, die diese Kräfte zu verrichten imstande sind. Das Potential ist dabei als jene Arbeit

definiert, die erforderlich ist, um der Bodenmatrix eine Menge von Wasser zu entziehen. Durch dieses Konzept lassen sich alle Bewegungsvorgänge (Infiltration, Dränung, kapillarer Aufstieg etc.) im Boden auf einen Nenner bringen. Weil mit einem Freiwerden von Energie verbunden, bewegt sich das Wasser immer von Stellen höherer potentieller Energie zu solchen niedrigeren Potentials, wobei dieser Vorgang so lange anhält, bis an allen Stellen das Gesamtpotential den gleichen Wert aufweist oder eine externe Störung eintritt. Im Freiland ist das Gesamtpotential des Bodenwassers das Produkt aus der Masse des Wassers, der Erdbeschleunigung und der Höhe über der freien Grundwasseroberfläche, an der ja das Potential im Ausgleich mit der Atmosphäre gleich Null ist. Das Gesamtpotential des Bodenwassers kann unter Freilandbedingungen nur sehr schwer gemessen werden. Wesentlich einfacher ist die Bestimmung des Matrixpotentials, die mit Tensiometern durchgeführt wird und unter humiden Bedingungen neben dem Gravitationspotential das wichtigste Teilpotential darstellt. Für die Betrachtung des Wasser- und Stoffflusses im Boden können bei den gegenständlichen Untersuchungen das Gaspotential und das osmotische Potential vernachlässigt werden. Das Matrixpotential entspricht bei stationärem Gleichgewichtszustand im Boden der Entfernung zur freien Grundwasseroberfläche, da dieses dem Gravitationspotential oder bei der Verwendung des Gewichtes als Bezugseinheit der Ortshöhe entgegenwirkt. Durch die an der Forschungsstation Wagna eingesetzten Tensiometer und Gipsblöcke ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der Matrixpotentialwerte in den unterschiedlichen Bodenhorizonten umfassend aufzunehmen. Aus der Auswertung dieser Daten und basierend auf der Potentialtheorie ist erkennbar, daß Wasserbewegung entgegen der Schwerkraft am Standort Wagna auch unter extremen hydrometeorologischen Bedingungen nur in Bereichen oberhalb von 200 cm unter GOK auftritt. Eine Wasserversorgung der Kulturpflanzen aus dem Grundwasser ist auf den Würmterrassenflächen praktisch ausgeschlossen.

Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung (bzw. Matrixpotential) ist von der Porengrößenverteilung und dem Porenvolumen abhängig und daher in verschiedenen Horizonten der Böden unterschiedlich. Da der Verlauf dieses Zusammenhanges außer von der Körnung auch vom Gefüge und dem Gehalt an organischer Substanz beeinflusst wird, läßt dieser mehr Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt eines Bodens (z. B. Speichereigenschaften, Geschwindigkeit der Entwässerung, Verfügbarkeit für Pflanzen) zu als allein die Korngrößenverteilung. Die pF-Kurve, die diesen Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Saugspannung

beschreibt, wird deshalb in Bezug auf den Wasserhaushalt als Charakteristikum eines Bodens verwendet. Durch die Gegenüberstellung der Wasserspannungswerte und der zeitgleich in den gleichen Horizonttiefen gemessenen Wassergehalte ist die Ermittlung von „Feld-pF-Kurven“ möglich. Naturgemäß decken diese Messungen nur Saugspannungsbereiche ab, die im Meßzeitraum auch tatsächlich aufgetreten sind. An der Forschungsstation Wagna wurden Saugspannungs- und Wassergehaltswerte in Bereichen von nahe der Sättigung bis zum permanenten Welkepunkt erfaßt, sodaß der gesamte Bereich, in dem Wasser mobil ist, durch Meßdaten erfaßt werden konnte. Gegenüber Laborwerten haben diese Feldmeßdaten den Nachteil, daß die Messungen der unterschiedlichen Parameter nicht an exakt der gleichen Probe erfolgen (die Sonden sind zwar im selben Horizont, aber in einer Horizontalabstreckung von bis zu mehreren Metern eingebaut). Der Vorteil der Feldmessungen gegenüber Labormessungen ist darin zu sehen, daß die natürlich herrschenden Verhältnisse wiedergegeben werden. Die Anschließung der ungesättigten Leitfähigkeitskurven als Grundlage für die Berechnung des Wasserflusses erfolgte auf der Basis der Porengrößen-Häufigkeitsverteilung der vervollständigten Feld-pF-Kurven (durch Vergleich mit gemessenen pF-Kurven ähnlicher Bodenarten aus der Datenbank des Institutes für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt), welche mit ähnlichen Porengrößen-Häufigkeitsverteilungen von Böden mit gemessenen Durchlässigkeitskurven graphisch verglichen wurden.

Für den Standort Wagna wurde die Grundwasserneubildung unter Anwendung unterschiedlicher Verfahren und unter Berücksichtigung verschiedenster Meßdaten einerseits für den Intensivbeobachtungszeitraum 1992 bis 1996 und andererseits als langjähriger Mittelwert abgeschätzt. Alle Verfahren sind entweder punktuelle Ergebnisse von Messungen - die fehlerbehaftet sind - oder über indirekte Verfahren abgeleitete Schätzungen, wobei auch hier die zugrunde liegenden Meßdaten naturgemäß mit größeren oder kleineren Fehlern behaftet sind. Aus der klimatischen Wasserbilanz errechnet sich aus den meteorologischen Daten der Station Leibnitz/Sulm und dem Wasserspeichervermögen des Bodens an der Forschungsstation Wagna für den Ackerstandort Wagna für den Zeitraum von 1971 bis 1996 im regionalen Maßstab eine mittlere jährliche aktuelle Verdunstung von 540 mm. Unter Berücksichtigung einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 877 mm aus dem gleichen Zeitraum ergibt sich eine langfristige mittlere Grundwasserneubildung von 337 mm oder eine Rate von 38 % des Niederschlags. Die Auswertung der Grundwasserstandsganglinie im Bereich der Forschungsstation Wagna - die methodischen Grundlagen und die Randbedingungen,

unter denen eine derartige Berechnung zulässig ist, sind in Kap. 4.4.1.5.5. zu finden - liefert auch Informationen über die flächenhafte Integration der Neubildung im näheren Umfeld und berücksichtigt naturgemäß auch die unterschiedlichen Nutzungsarten und im Detail differierenden Bodenausformungen. Nach dieser Auswertung liegt die langfristige mittlere Grundwasserneubildung bei etwa 46 % der mittleren Jahresniederschlagssumme oder etwa 400 mm. Die übrigen angewandten Verfahren beziehen sich entweder auf punktuelle Messungen über Lysimeter oder auf einfachere und komplexere Modellrechnungen, in die jedenfalls die Auswirkung der differenzierten Bodenprofile und auch die der unterschiedlichen Landbewirtschaftung auf die Sickerwassermengenbildung eingehen. Auf der Maismonokulturparzelle mit einer geringen Bodenmächtigkeit von nur etwa 70 cm zeigt sich unter Berücksichtigung der Fehlergrößen der einzelnen Auswerteverfahren eine Grundwasserneubildungsrate von etwa 45 % des Jahresniederschlags, auf der Fruchtfolgeparzelle von etwa 35 % (ca. 300 mm) des mittleren Jahresniederschlags. In diesen Werten ist auch die kleinräumige Heterogenität, die sich aufgrund der unterschiedlichen Lage der Meßstellen im Bereich der Forschungsstation Wagna begründet, bereits berücksichtigt. Neben den Jahressummen der Grundwasserneubildung ist für Detailfragen vor allem des Stofftransportes auch die zeitliche Verteilung des Sickerwasseranfalles von großer Bedeutung. Sowohl die gemessenen Sickerwassermengen in Kleinlysimetern als auch die Ermittlung der Neubildung über ein einfaches Einschicht-Bodenwassermodell – basierend auf der klimatischen Wasserbilanz nach HAUDE und der nutzbaren Feldkapazität der betrachteten Bodenschichte (siehe Kap. 4.4.1.5.3.) – wie auch die Berechnung der Sickerwassermenge über das Bodenwasserhaushaltsmodell STOTRASIM (die Grundlagen der Modellberechnungen sind in Kap. 4.4.1.5.4. kurz zusammengefaßt) zeigen in ihrem zeitlichen Verlauf und auch in den Absolutmengen eine sehr gute Übereinstimmung. Unter den hydrometeorologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen des westlichen Leibnitzer Feldes treten langfristig keine Jahreszeiten ohne Grundwasserneubildung auf. Die Hauptzeit der Grundwasserneubildung liegt in den Monaten Februar, März sowie Oktober und November, also in jenen Zeiten, in denen bei schneefreiem Boden die Vegetation kaum Wasser verbraucht. Das Minimum der Grundwasserneubildung liegt im Jänner, auch im Dezember treten relativ niedrige Werte auf. Dies sind jene Monate, in denen im langjährigen Mittel aufgrund der Schneedecke die Infiltration gehemmt und der Niederschlag in fester Form an der Oberfläche gespeichert wird. Aufgrund der häufigen

Gewitterniederschläge in den Sommermonaten und der geringen Speicherfähigkeit der Böden ist auch die Neubildung in diesem Zeitraum nicht außer acht zu lassen. Deutlich erkennbar ist ein weiteres Maximum im Juni. Es ist dies jener Monat, in dem bei noch geringer Entwicklung der Hauptfrucht Mais sehr intensive Gewitterniederschläge auftreten. Aufgrund des noch eher geringen Bodenwasserdefizites nach der Frühjahrssättigung kann nahezu der gesamte infiltrationswirksame Niederschlag zur Grundwasserneubildung beitragen.

Im Hinblick auf den Grundwasserschutz ist naturgemäß die Frage nach der Verweilzeit des Wassers und damit auch von Wasserinhaltsstoffen von der Infiltration an der Bodenoberfläche bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels und – bei praktischen Fragestellungen – bis zum Erreichen der Brunnenanlage von höchstrangigem Interesse. Die hydrologische Markierungstechnik setzt Markierungsmittel ein, um fließendes Wasser verfolgen zu können. Die Verfolgung des Wasserpfades im Untergrund durch die Messung der Tracer erlaubt eine direkte Einsicht in die räumliche und zeitliche Verbreitung des eingesetzten Stoffes unter bekannten Rahmenbedingungen. An der Versuchsanlage Wagna wurden im Frühjahr 1993 mehrere kombinierte Markierungsversuche durchgeführt, die folgende Ziele verfolgten: Vergleich von Sickergeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Tiefenbereichen der ungesättigten Zone unter ungestörten und gestörten Bedingungen mehrere Jahre nach der Instrumentierung der Anlage, Vergleich des Transportes von Wasser und von gelösten Stoffen durch den Einsatz mehrerer Markierungsmittel, Vergleich der unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Tracer hinsichtlich ihrer Mobilität, Vergleich des Verhaltens der eingesetzten Tracer mit dem Transportverhalten von Schadstoffen aus der Landwirtschaft und Überprüfung bzw. Verifizierung von Modellkonzepten über Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone. Von besonderer Bedeutung war auch die Frage, inwieweit die eingesetzten Meßinstrumente Wasserbewegung und Stofftransportvorgänge im Bereich der Forschungsstation erfassen können. An den beiden Gefäßlysimetern wurden Tracerversuche durchgeführt, um unter den dort sehr genau definierten Fließbedingungen methodische Aspekte des Wasser- und Stoffflusses in der ungesättigten Zone beleuchten zu können. Die Ergebnisse dieser Vorversuche zeigten, daß Uranin im Bereich landwirtschaftlich genutzter Böden aufgrund im Detail nicht genau bekannter Abbau- und Umsetzungsvorgänge nicht geeignet ist, den Transport konservativer Stoffe in der ungesättigten Zone nachzubilden. In Abhängigkeit von der Nutzung und der Bewirtschaftung konnten schnelle Fließsysteme in Kombination

mit dem Matrixfluß erkannt werden, deutlich wurde aber auch die Bedeutung der Pflanzenaufnahme der Tracer im Zuge des Transportgeschehens. Unter gestörten Verhältnissen (befüllte Gefäßlysimeter) liegen die mittleren Sickergeschwindigkeiten im Zeitraum zwischen April 1993 und April 1994 in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung zwischen 1,2 und 2 m/a.

Ein Großmarkierungsversuch, der alle an der Forschungsstation Wagna eingebauten Sensoren einbezog, brachte zusammengefaßt folgende Ergebnisse:

- Die hydraulische Reaktion des Matrixpotentials und damit auch des Wassergehaltes auf ein Niederschlagsereignis ist im feinklastischen Boden praktisch unmittelbar, in den ungesättigten Sanden und Kiesen bis in eine Tiefe von 2,5 m innerhalb einer Woche detektierbar.
- Die eingesetzten unterschiedlichen Meßeinrichtungen und Probenahmesysteme in der ungesättigten Zone sind in der Lage, das Transportverhalten von Wasser mit den daran gekoppelten Stoffen in seinem zeitlichen Verlauf zu erfassen, für die Quantifizierung von Wasser- und Stoffflüssen treten bei manchen der eingesetzten Systeme Probleme auf, die einerseits konstruktionsbedingt sind, andererseits auch durch die Art des Einbaues hervorgerufen werden können.
- Die mittlere Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone liegt bei mehr als drei Jahren entsprechend einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 1,4 m/a.
- Die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit von Bromid ist im überlagernden feinklastischen Boden signifikant geringer als in den ungesättigten Sanden und Kiesen. In den mittleren Verweilzeiten sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den befüllten Gefäßlysimetern und den unter natürlichen Verhältnissen gewonnenen Daten zu erkennen. Der Fluß in präferentiellen Fließwegen hat dafür nur untergeordnete Bedeutung.
- Hinsichtlich der Maximalgeschwindigkeiten sind auch unter üblichen Bewirtschaftungsbedingungen gerade im feinklastischen Boden sehr schnelle Fließwege festzustellen. Transportvorgänge von Stoffen, bei denen das Erstauftreten von Bedeutung hinsichtlich einer etwaigen Gefährdung des Grundwassers ist (wassergefährdende Stoffe, Pestizide etc.), können nicht allein durch den dispersiven Fluß beschrieben werden. Hier muß auch die Verlagerung der Stoffe in Makroporen in die Betrachtung miteinbezogen werden.
- Eine Auswertung der Wiederfindungsraten des eingebrachten Tracers zeigen bei der Maismonokulturparzelle mit herbstlicher Ackerung und Schwarzbrache wesentlich stärkere Heterogenität als bei der Fruchtfolgeparzelle mit Grubberung und dauernder Begrünung. Generell liegen die Wiederfindungsraten an den Gefäßlysimetern deutlich über jenen unter natürlichen Verhältnissen, was auf die wesentlich schlechtere Pflanzenentwicklung zurückzuführen ist.

- Die Annahme von homogenen Verhältnissen in der ungesättigten Zone und hier vor allem im Bereich des Oberbodens ist unzulässig. Die Ergebnisse von Wasserfluß- und Transportberechnungen mit eindimensionalen Modellen unter Annahme flächenhaft vorhandener Homogenität bezüglich Bodenaufbau und -mächtigkeit sind immer aus dem Blickwinkel einer inhomogenen und anisotropen Verteilung zu bewerten und derartige Berechnungsergebnisse durch weitere Plausibilitätsüberlegungen zu verifizieren.
- Hinsichtlich des Grundwasserschutzes in Blickrichtung wassergefährdende Stoffe ist aus den Erfahrungen der hier vorgestellten Tracerversuche eine intakte ungesättigte Zone mit natürlich gelagerten Sanden und Kiesen von größerer Bedeutung als die darüber liegende Bodenbedeckung, da diese aufgrund von anthropogenen Einflüssen und auch wegen der Wurzelausbildung, der Bodenfauna etc. in einem wesentlich höheren Ausmaß der Ausbildung von präferentiellen Fließwegen ausgesetzt ist.

Die Tracerdurchgangskurven an den einzelnen Meßsonden in unterschiedlichen Tiefen werden dazu verwendet, hydraulische Parameter (Dispersivität, Abstandsgeschwindigkeit) als Grundlage für die Modellierung abzuleiten. Die Modellierung des Tracertransportes durch einzelne in Serie geschaltete Advektions- und Dispersionsprozesse erlaubt es schließlich für Kleinlysimeter, in denen aufgrund des Einbaues bzw. wegen späterer Setzungsvorgänge das tatsächliche Einzugsgebiet nicht mit der Oberfläche zusammenstimmen, Korrekturfaktoren zu ermitteln und so die an diesen Kleinlysimetern gemessenen Sickerwassermengen zu korrigieren.

Während die Markierungsversuche des Jahres 1993 in einem eher trockenen Jahr durchgeführt wurden, ermöglicht die Auswertung der  $^{18}\text{O}$ -Untersuchungen von Niederschlag und Sickerwasser des extremen Schneeschmelzereignisses vom Frühjahr 1996 einen Einblick in die Verlagerung des Sickerwassers in der ungesättigten Zone unter eher feuchten hydrometeorologischen Rahmenbedingungen, wobei die Verlagerung des Schneeschmelzwassers in den Verläufen der  $^{18}\text{O}$ -Konzentration in den unterschiedlichen Meßtiefen außerordentlich gut nachvollziehbar ist. Dieses Schneeschmelzereignis stellt somit einen natürlichen Tracerversuch dar. Die Ergebnisse der Auswertung der Meßdaten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die treibenden Kräfte für die Fließbewegung in der ungesättigten Zone sind einerseits Schneeschmelzereignisse, die sich in eher dispersiven Verlagerungen spiegeln und andererseits Neubildungsvorgänge aufgrund von Niederschlagsereignissen, die den dominanten Charakter der „schiebenden“ Wasserbewegung dokumentieren.

- Aufgrund der Heterogenität des Sedimentaufbaues sind hohe Variabilitäten in der horizontalen Verteilung der Neubildung und auch der Verlagerungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Es müssen Möglichkeiten gesucht werden, die dafür maßgeblichen Parameter (Schichtmächtigkeiten, bodenphysikalische Eigenschaften der Schichtglieder) flächenhaft zu erfassen, um Inputdaten ausreichender Qualität für eine numerische Modellierung zu erhalten.
- Die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit liegt unter „feuchten“ hydrometeorologischen Verhältnissen bei etwa 2 m/a.

Das Wasser der ungesättigten Zone ist infiltriertes Niederschlagswasser, das in enger Wechselbeziehung zum Adsorptions- und Kapillarwasser sowie zu dessen Inhalt an chemischen Stoffen steht. Das Niederschlagswasser ändert bereits seine chemische Beschaffenheit, wenn es beim Auftreffen auf Erdoberfläche und Vegetation mit löslichen oder suspendierbaren Stoffen in Kontakt kommt, die es beim Einsickern in den Untergrund einbringt. Die Nährstoffe für die Vegetation werden im humiden Klimabereich mit dem Sickerwasser im Boden nach unten verlagert und zum Teil aus dem Wurzelraum ausgewaschen. Die Höhe der Auswaschung ist abhängig von Menge und Konzentration des Sickerwassers. Die Auswaschung ist nicht nur im Hinblick auf eine Verminderung des Gehaltes der Böden an leicht verfügbaren Nährstoffen von Bedeutung, sondern sie gefährdet in zunehmendem Maße die Qualität von Oberflächen- und Grundwasser. Den Altersschichten der Porenlösungen der wasserungesättigten Zone entsprechen hydrochemische Schichten mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften. Die Sickerwasserbewegung nach einem Niederschlagsereignis stört das örtliche chemische Gleichgewicht zwischen Porenlösung und Festsubstanzen und löst geochemische Prozesse in Richtung auf eine neue Gleichgewichtseinstellung aus. Der wesentliche Unterschied der Grundluft gegenüber der Atmosphäre zeigt sich in einer Verminderung des Sauerstoffgehaltes und einer Erhöhung des Kohlendioxidanteiles. Die Unterschiede sind umso größer, je schwieriger der Austausch zwischen beiden Luftvorkommen ist. Von der Größe und Wirksamkeit der Sauerstoffzufuhr aus der Atmosphäre hängt es ab, ob anaerobe oder aerobe Verhältnisse im Grundwasser herrschen. Bei Oxidations- und Abbauvorgängen im wasserungesättigten Bereich wird Sauerstoff verbraucht, der aus der Atmosphäre nachgeliefert und im Wasser ständig neu gelöst wird.

Aus den Analyseergebnissen des Sickerwassers ist eine hohe Ähnlichkeit mit dem Grundwasser zu erkennen, wobei jedoch deutliche Unterschiede in den einzelnen Bodenhorizonten auftreten. Die gravierendsten Unterschiede liegen in der hohen zeitlichen Variabilität der Nitratkonzentration im Sickerwasser, die von den Bewirtschaftungs- und Düngemaßnahmen sowie den biologischen Umsetzungsprozessen



im Boden gesteuert wird. Natrium, Chlorid und auch Sulfat sind im Grundwasser in wesentlich höheren Anteilen enthalten als im Sickerwasser aus den ackerbaulich genutzten Flächen des Versuchsfeldes Wagna. Hier zeigt sich, daß eine direkte Ableitung der Grundwasserzusammensetzung eines bestimmten Standortes aus der Zusammensetzung des Sickerwassers nicht zulässig ist, da die Grundwasserqualität neben der Zusickerung über infiltrierendes Sickerwasser auch durch den horizontalen Zustrom von Grundwasser gesteuert wird. Die dominanten Ionen in allen Meßtiefen der ungesättigten Zone und auch im Grundwasser sind auf der Kationenseite Calcium und auf der Anionenseite Hydrogenkarbonat. Demgegenüber haben die Gehalte an Magnesium, Natrium und Kalium sowie an Chlorid nur untergeordnete Bedeutung. Aufgrund der landwirtschaftlich intensiven Nutzung ist der Gehalt an Nitrat im Sickerwasser mit Werten bis zu 2,5 meq/l bedeutungsvoll. Auffällig ist die Zunahme der Sulfatkonzentration mit zunehmender Meßtiefe. Die Tiefenprofile der hydrochemischen Zusammensetzung des Sickerwassers erklären sich aus der intensiven Landbewirtschaftung der beiden Versuchspartellen. Mit dem Dünger werden Mineralstoffe an der Bodenoberfläche zugeführt, die durch den einsickernden Niederschlag tieferverlagert und in den Bereich der Hauptdurchwurzelungszone verfrachtet werden. Im Zuge dieses Transportes entnehmen die Pflanzen dem Sickerwasser Mineralstoffe, was zu einer deutlichen Verminderung der Mineralisierung der Sickerwässer in der Bodenzone führt. Durch die Wurzelatmung entsteht  $\text{CO}_2$ , das in weiterer Folge bei Auftreffen des Sickerwassers auf die unterlagernden Kiese und Sande mit hohem karbonatischen Anteil zu verstärkter Lösungsaktivität führt. Die Mineralisierung nimmt ab dieser Grenze mit zunehmender Tiefe deutlich zu, wobei eine Zunahme von Calcium und Magnesium auf der Kationenseite und von Hydrogenkarbonat, Nitrat und Sulfat auf der Anionenseite erkennbar ist.

Da der Stickstoffgehalt der an der Bodenbildung beteiligten Ausgangsgesteine sehr gering ist, im Bereich der Bodenzone gerade dieser Nährstoff vielfachen Umwandlungsprozessen unterliegt, der Stickstoffbedarf der Pflanzen im Vergleich zu anderen Nährstoffen am höchsten ist – er bestimmt in erster Linie den Ertrag –, Stickstoff aber auch zur Eutrophierung von Oberflächengewässern führen kann und Qualitätsprobleme bei der Verwendung von Grundwasser zur Trinkwasserversorgung verursacht, nimmt dieser Stoff eine besondere Stellung unter den Pflanzennährstoffen ein. Stickstoff unterliegt im Boden einem kontinuierlichen Kreislauf zwischen anorganischen und organischen N-Verbindungen. Dabei haben die Prozesse der

Mineralisierung (Mobilisierung) und der Immobilisierung fundamentale Funktionen. Während der Großteil der Prozesse des Stickstoffumsatzes in der Bodenzone – und hier überwiegend im belebten Wurzelraum – abläuft, ist hinsichtlich des Grundwasserschutzes die Frage der Stickstoffauswaschung aus dem Wurzelraum in Richtung Grundwasser von zentraler Bedeutung. Sie erfolgt zu einem überwiegenden Anteil als Nitrat, in leicht durchlässigen Sandböden auch als Ammonium. Der zeitliche Ablauf und das Ausmaß der N-Auswaschung hängen nicht nur von wenig beeinflussbaren Ursachen wie Klima und Bodenverhältnissen, sondern in erheblichem Umfang auch von Art und Intensität der Bodennutzung ab. Der jährliche Ablauf der N-Auswaschung ist in Zeit und Masse eng an den Verlauf der Grundwasserneubildung gekoppelt.

Aus den gemessenen Sickerwassermengen und den zugehörigen Nitratkonzentrationen läßt sich der Nitrat-N-Austrag aus der Wurzelzone der Fruchtfolgeparzelle der Forschungsstation Wagna im Meßzeitraum 1992 bis 1996 berechnen. Durch die zeitlich variable Sickerwassermenge und die stark differenzierte Nitratkonzentration im Sickerwasser sind naturgemäß auch die berechneten Austragsmengen von starker Heterogenität gekennzeichnet: Austragsfreie Monate stehen in enger Nachbarschaft zu den auftretenden maximalen Monatssummen. Auch die Jahresaustragsfrachten variieren stark. Die mittleren monatlichen Nitrat-N-Austragsfrachten zeigen ein deutliches Maximum in der Herbstmonaten November, Dezember und gegenüber den Sommermonaten erhöhte Werte auch im März und April. Das Mittel der fünfjährigen Beobachtungsphase ergibt einen jährlichen Nitrat-N-Austrag in das Grundwasser unter der Fruchtfolgeparzelle der Forschungsstation Wagna von etwa 90 kg/ha. Auf der Maismonokulturparzelle ist die Variabilität innerhalb der Einzelmonate deutlich geringer, dementsprechend sind auch die Jahresaustragsfrachten wesentlich homogener. Im Mittel der Periode 1992 bis 1996 erfolgte auf der Maismonokulturparzelle eine Jahresstickstoffauswaschung von nicht ganz 70 kg/ha. Entsprechend der Neubildungsverteilung liegt im Jahresverlauf das Maximum des Nitrat-N-Austrages in den Spätherbstmonaten November und Dezember.

Die hydrometeorologischen Rahmenbedingungen an der Forschungsstation Wagna im Beobachtungszeitraum 1992 bis 1996 spiegeln die Unmöglichkeit einer exakten Steuerung der Bewirtschaftung zum Zwecke des Grundwasserschutzes wider: Die hydrometeorologische Situation ist nur in einem üblichen Rahmen vorherzusehen, extreme Ereignisse können sich aber entscheidend auf die Stoffbilanz einer Kultur

auswirken. Aus den Summenkurven des Nitrat-N-Austrages ist deutlich zu erkennen, daß unter den Rahmenbedingungen, wie sie von 1992 bis 1996 am Versuchsfeld Wagna herrschten, die Fruchtfolgevariante keine geringe Auswaschung von Stickstoff in Richtung Grundwasser bewirkte. Aufgrund der besseren Wasserspeicherung ist die Neubildung auf der Fruchtfolgeparzelle verringert, der höhere Humusgehalt und die Zufuhr organischen Materials über die winterharte Gründecke führt aber zu einer verstärkten Mineralisierung und damit zu höheren Austragskonzentrationen im Vergleich zur Maismonokulturparzelle. In Summe zeigt der Vergleich der beiden Varianten über einen Fruchtfolgezyklus (vier Jahre) praktisch identische Austragssummen.

Die Meßanordnung der Versuchsanlage in Wagna erlaubt es, die Entwicklung der Nitratkonzentration nach Tiefe und Zeit über die gesamte ungesättigte Zone zu erfassen. Folgt man der Literatur, so wird üblicherweise davon ausgegangen, daß die Mineralisation des Stickstoffes zu Nitrat im Oberboden vor sich geht und mit Erreichen der unterlagernden Schotter abgeschlossen ist. Dieser Vorstellung folgend müßten die Nitratkonzentrationen in den Bodenschichten am höchsten sein. Mit zunehmender Meßtiefe sollten sich Nitratkonzentrationen einstellen, die kleiner oder gleich den Konzentrationen an der Unterkante der Bodenaufgabe wären. Betrachtet man aber die Meßdaten an der Station Wagna, so spiegeln diese ein gänzlich anderes Bild wider: Zwar werden in den obersten Bodenschichten hohe Nitratkonzentrationen erreicht, diese nehmen auch mit zunehmender Bodentiefe bis zur Unterkante der feinklastischen Bodenschichten signifikant ab, steigen aber mit weiter zunehmender Tiefe in den ungesättigten Sanden und Kiesen auf Werte größer als jene in den obersten Bodenschichten an. Der Vergleich der gemessenen Bromidverteilung nach Tiefe und Zeit mit der Nitratkonzentrationsverteilung zeigt, daß dieses Phänomen keinesfalls auf meßtechnische Probleme zurückgeführt werden kann. Die vom klassischen Bild eines Transportprozesses abweichenden Ergebnisse der Nitratmessungen führten zur Hypothese, daß im ungesättigten Sand-Kies-Bereich Mineralisations- und Nitrifikationsprozesse stattfinden, die zu einer zusätzlichen Nitratanreicherung führen. Erste Untersuchungen im Frühjahr 1995 deuteten darauf hin, daß neben Nitrat teilweise auch Ammonium und leicht lösliche organische Stoffe aus dem Oberboden ausgewaschen werden. Nach Verlagerung in tiefere Bodenschichten stehen diese Verbindungen im Sand-Kies-Horizont zur Verfügung und können dann in Gegenwart geeigneter Bedingungen in Nitrat übergeführt werden. Es handelt sich bei den ungesättigten Sanden und Kiesen des Leibnitzer Feldes keineswegs um unbelebten

Mineralboden, sondern vielmehr um ein eigenes Ökosystem. Die Ergebnisse vergleichender mikrobiologischer und chemischer Untersuchungen in der ungesättigten Zone von verschiedenen Bodenstandorten des Leibnitzer Feldes ergaben, daß in jeder beprobten Tiefe Nitrifikationsprozesse nicht nur ablaufen können, sondern auch tatsächlich stattfinden.

Am Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt des Bundesamtes für Wasserwirtschaft wurde das Simulationsmodell STOTRASIM zur numerischen Beschreibung des Stickstoffkreislaufs einer landwirtschaftlich genutzten Fläche entwickelt und an dort verfügbarem Datenmaterial validiert. Das Modell STOTRASIM wurde anhand der Daten der Forschungsstation Wagna für die Verhältnisse des Leibnitzer Feldes kalibriert. In STOTRASIM wird die Stickstoffdynamik eines Bodenprofils in eindimensionaler vertikaler Richtung beschrieben und es werden Tagesbilanzen des Stickstoffhaushaltes unter den vereinfachenden Annahmen berechnet, daß der Stickstofftransport im Boden zur Gänze an die Wasserbewegung gekoppelt ist, daß alle Stickstoffkomponenten im Boden in Nitrat umgewandelt werden, um Mobilität zu erlangen, daß eingeschränktes Pflanzenwachstum ausschließlich aus Wasser- oder Stickstoffmangel rührt und daß andere Fließkomponenten wie Makroporenfluß oder Interflow von vernachlässigbarer Bedeutung sind. Die Ergebnisse der Modellkalibration zeigen für beide Versuchsfelder eine ausgezeichnete Übereinstimmung sowohl in den absoluten Höhen als auch im zeitlichen Verlauf des Stickstoffaustrages. Simulationsrechnungen für Maismonokultur mit winterharter Gründেকে für den Zeitraum 1976 bis 1995 bei einem Bilanzierungszeitraum von 1982 bis 1995 ergeben bei einem mittleren Jahresniederschlag von 896 mm auf der Fruchtfolgeparzelle eine mittlere Grundwasserneubildungsrate von 242 mm/a. Für die Maismonokulturparzelle ergibt sich eine Sickerwassermenge von 331 mm/a. Das bessere Wasserspeichervermögen der linken Lysimeterseite ergibt signifikant höhere Erträge. Bei gleichem Düngeraufwand und gleichem sonstigen Stickstoffimport wirkt sich die höhere Grundwasserneubildung - verbunden mit dem geringeren Ertrag und damit geringerer Ausschöpfung der Stickstoffreserven - in einem deutlich höheren Stickstoffverlust durch Auswaschung auf der rechten Lysimeterseite aus. Dementsprechend ist natürlich auch die mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser der weniger mächtigen Bodenform bei sonst gleichen Bewirtschaftungsbedingungen deutlich höher. Hinsichtlich der Grundwasserneubildung liegen im jahreszeitlichen Verlauf die Unterschiede vor allem in den Herbstmonaten, wo aufgrund des geringeren Wasserspeichervermögens des

seichteren Bodens die Neubildung wesentlich früher einsetzt. Die jahreszeitliche Verteilung des Stickstoffaustrages in Richtung Grundwasser zeigt auf der Bodenform mit geringmächtigem Feinboden das ganze Jahr deutlich höhere Werte als auf der tiefgründigeren Bodenform. Unter den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen des Leibnitzer Feldes erscheint auf den Böden, die in etwa der Bodenform der Fruchtfolgeparzelle der Forschungsstation Wagna entsprechen, ein wirtschaftlicher Intensivackerbau unter Einhaltung von Trinkwassergrenzwerten denkbar, auf seichten Standorten kann die Einhaltung von Trinkwassergrenzwerten im Sickerwasser auch im langfristigen Mittel nur durch andere Nutzungsformen mit geringen Stickstoffausträgen gewährleistet werden. Da aber im Grundwasser eine Vermischung der einzelnen Neubildungskomponenten durch den horizontalen Transport erfolgt, tragen nichtlandwirtschaftliche Nutzungen, die ähnliche Neubildungsmengen garantieren, aber wesentlich geringere Stickstoffausträge erwarten lassen, zu einer Grundwasserqualität im westlichen Leibnitzer Feld bei, die die Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser ohne größere Probleme ermöglicht.

Da für die Grundwassersituation in quantitativer und qualitativer Hinsicht nicht nur die Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen, sondern auch die Neubildungsmengen und Stoffbefruchtungen aus anderen Nutzungsformen sowie der horizontale Transport des Grundwassers eine entscheidende Rolle spielen, ist es notwendig, die Ergebnisse der Forschungsstation Wagna in die Fläche zu übertragen. Als Testgebiet wurde der Würmterrassenkörper im südlichen Teil des westlichen Leibnitzer Feldes ausgewählt, da hier einerseits davon ausgegangen werden kann, daß die Forschungsstation Wagna dafür repräsentativen Charakter hat, andererseits für diesen Bereich umfangreiche grundwasserhydrologische Daten durch den Hydrographischen Dienst zur Verfügung stehen und Qualitätsdaten des Grundwassers im Rahmen der Wassergütererhebungsverordnung (WGEV) sowie durch die Trinkwasseruntersuchungen der Leibnitzerfeld Wasserversorgungs Ges.m.b.H und weiterer kommunaler Wasserversorgungsbrunnen erhoben werden. Für diesen Bereich ist es möglich sowohl die Menge als auch den zeitlichen Verlauf der Grundwasserneubildung aus infiltrierenden Niederschlägen aus den Grundwasserstandsganglinien abzuleiten. Zur Übertragung dieser prinzipiell punktförmigen Informationen auf größere Flächeneinheiten steht das Methodenspektrum der Geostatistik zur Verfügung, wodurch die Beschreibung der flächendeckenden regionalen Verteilung der Grundwasserneubildung allein aus einfach zu messenden Grundwasserstandsdaten möglich ist. Für den Bereich der

landwirtschaftlich genutzten Flächen sind bei Kenntnis der Bodenverhältnisse und der Landnutzung unter Verwendung eines kalibrierten Bodenwasserhaushalts- und Nitrattransportmodelles Neubildung und Nitrataustrag für homogene Teilflächen berechenbar, wobei die Flächengewichtung für das Untersuchungsgebiet über ein GIS erfolgt. Geostatistische Verfahren erlauben auch die Bestimmung von Repräsentativgebieten für einzelne Grundwassermeßstellen, wodurch über eine GIS-basierte Flächengewichtung die Grundwasserneubildung aus nicht landwirtschaftlich genutzten Gebieten errechnet wird. Durch geostatistische Interpolation von Nitratmeßwerten aus dem Grundwasser kann die flächenhafte Nitratbelastung des Grundwassers und damit auch die mittlere Nitratkonzentration im Untersuchungsgebiet bestimmt werden. Zustromkonzentrationen von außen sind auch aus den vorliegenden Messungen ableitbar. Die Frage des Grundwasserzustromes von außen kann durch die Kalibration eines numerischen, stationären Grundwasserströmungsmodells geklärt werden. Sind die Wasser- und Stickstoffströme im Untersuchungsgebiet und deren Zustrom von außen bekannt, kann über eine einfache Mischungsgleichung für mittlere Zustände die Nitratkonzentration aus den nicht landwirtschaftlich genutzten Gebieten abgeleitet werden. Wie aus diesem Ansatz ersichtlich, spielen geostatistische Methoden eine entscheidende Rolle für die Interpretation der Meßdaten. Auf die mathematischen Grundlagen wird in Kap. 5.2. näher eingegangen.

Der Einfluß der unterschiedlichen Einzeljahressummen auf die räumliche Struktur wurde bei der Erstellung der Variogramme und der daraus abzuleitenden Variogrammodelle diskutiert. In der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung als Ergebnis der Interpolation der mittleren Jahressumme der Grundwasserneubildung des Zeitraumes 1992 bis 1995 (abgeleitet aus den Grundwasserstandsganglinien) sind drei deutlich unterschiedliche Bereiche erkennbar:

- der dicht verbaute Kernbereich von Leibnitz, Kaindorf a. d. Sulm und Wagna (dicht verbaute Siedlungskerne mit Regenwasserausleitung) sowie das Schutzgebiet der Brunnen Kaindorf (ganzjährige Begrünung) mit jährlichen Grundwasserneubildungsmengen von  $< 400$  mm/a;
- der jüngere Siedlungsbereich im E von Kaindorf a. d. Sulm (Meteorwasserrückführung) übergehend in Richtung E zur Austufe der Mur mit jährlichen Neubildungsmengen von  $> 400$  mm;
- der südlichste Bereich des Untersuchungsgebietes der Sulm-Austufe (geringere Mächtigkeit der ungesättigten Zone) mit Grundwasserneubildungssummen von  $> 400$  mm/a.

In Summe zeigen die Auswertungen der räumlichen Verteilung der Jahressummen der Grundwasserneubildung aus infiltrierenden Niederschlägen eine grundlegende Struktur, die auf die Art der Landnutzung und deren Geschichte zurückgeführt werden kann. Diese generelle Struktur wird aber durch die Unstetigkeiten des jährlich sich wandelnden hydrometeorologischen Geschehens nicht nur in der Jahressumme, sondern auch in den räumlichen Verteilungsmustern gestört. Als Folgerung muß daher abgeleitet werden, daß für die weitere Untersuchung des Raum-Zeit-Verhaltens der Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet nicht von einer regional einfachen und gleichbleibenden räumlichen Struktur ausgegangen werden darf, sondern daß neben der hochaufgelösten zeitlichen Entwicklung auch deren engräumige räumliche Variabilität näher betrachtet werden muß. Eine Möglichkeit dazu bietet die Untergliederung des Raumes in Teilbereiche, wobei das Zuordnungskriterium durch die existierenden Grundwasserstandsmeßstellen angenommen werden kann.

Zur Ermittlung von Grundwasserneubildung und Stickstofftransport unter ackerbaulich genutzten Flächen wurden die einzelnen Bodenformen der Österreichischen Bodenkarte - diese Karte liegt für das Untersuchungsgebiet für ackerbaulich genutzte Flächen als Aufnahmekarte im Maßstab 1 : 5000 vor - unter Zuhilfenahme der Informationen der Kartierung horizontweise in bodenphysikalische Kennwerte (z. B. Porenvolumen, Feldkapazität) umgesetzt. Anhand der Bewirtschaftungsdaten und der Klimadaten der Forschungsstation Wagner wurde das Bodenwasserhaushalts- und Nitrattransportmodell STOTRASIM für Maismonokultur, eine vierschlägige Fruchtfolgevariante mit 50 % Mais sowie Raps und Winterweizen mit Winterbegrünung und für Grünlandnutzung (intensiv und extensiv) kalibriert. Neben der Bodenformenverteilung ist die flächenhafte Verbreitung der unterschiedlichen Fruchtfolgen in der ackerbaulichen Nutzung für das Bodenwasserhaushaltsmodell eine entscheidende Größe. Anstelle einer wiederholten Detailkartierung wurden im Untersuchungsgebiet die Ableitung der Landnutzung aus den Ergebnissen einer Satellitenbilddauswertung für die Situation im September des Jahres 1995 durchgeführt. Die Auswertung zeigt eine ackerbaulich landwirtschaftliche Nutzung auf etwa 50 %, woran die Maisanbauflächen mit fast der Hälfte beteiligt sind. Im nicht landwirtschaftlichen Bereich nehmen dicht verbaute Siedlungsbereiche eine ähnlich dominante Stellung ein. Die aus der Satellitenbilddauswertung ermittelten landwirtschaftlichen Landnutzungsklassen wurden typischen Nutzungszyklen zugeordnet, für die auf der Basis der Bewirtschaftungsdaten im Bereich der Forschungsstation Wagner auch die entsprechenden Kalibrationsdaten für das Bodenwasserhaushaltsmodell zur

Verfügung standen. Die flächengewichtete Umsetzung der Modellberechnungsergebnisse auf etwa 509 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (etwa 40 % der Gesamtfläche) im Untersuchungsgebiet ergibt für den Zeitraum 1. 8. 1992 bis 31. 12. 1995 eine mittlere Grundwasserneubildung von 1191 mm oder 340 mm/a. Die Nitratkonzentration im Sickerwasser wurde zu ca. 107 mg/l berechnet. Für die Bereiche nicht ackerbaulicher Nutzung wurde unter Zuhilfenahme der Hauptkomponentenanalyse und der geostatistischen Strukturanalyse den einzelnen Grundwasserstandsmeßstellen Repräsentativbereiche zugeordnet und die aus der jeweiligen Grundwasserstandsganglinie abgeleitete Grundwasserneubildungsganglinie zur flächengewichteten Erfassung der Grundwasseranreicherung aus nicht ackerbaulich genutzten Flächen verwendet. Für den Zeitraum 1. 8. 1992 bis 31.12. 1995 ergibt sich für die nicht ackerbaulich genutzte Fläche von etwa 750 ha (etwa 60 % der Gesamtfläche) eine Neubildungshöhe von 1386 mm, entsprechend einer über die Fläche gemittelten jährlichen Grundwasserneubildung von fast 400 mm. Eine Möglichkeit, die mittlere Austragskonzentration aus den nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen im mehrjährigen Mittel abzuschätzen, bietet ein einfaches Mischungsmodell. Dabei kann die Nitratkonzentration der Grundwasserneubildung aus den nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen nach (Gl. 53) berechnet werden. Die Parameter der Gleichung werden einerseits aus den Ergebnissen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung, andererseits aus den Meßdaten im Grundwasserbereich sowie den Ergebnissen eines stationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells entnommen. Die Nitratkonzentration aus den nichtackerbaulichen Nutzungsformen muß demnach im Mittel der Jahre 1992 bis 1995 bei etwa 25 mg/l gelegen haben, um die mittlere Nitratkonzentration des Grundwassers von 53 mg/l zu erreichen. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen wurden anhand von Flächenverteilungen in den 70er Jahren verifiziert und aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen unter Heranziehung von Meßergebnissen an nicht ackerbaulich genutzten Flächen hinterfragt. Die berechnete Austragskonzentration von Nitrat aus nicht landwirtschaftlich genutzten Bereichen von 25 mg/l stellt eher eine Über- als eine Unterschätzung dar, zumal die Annahmen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen von den relativ geringen Düngeraufwandsmengen, wie sie an der Versuchsstation Wagna gefahren werden, ausgehen. Vermutlich ist die Austragskonzentrationen aus der ackerbaulichen Bewirtschaftung (107 mg/l) unter den Boden- und Nutzungsverhältnissen im Untersuchungsgebiet eher unter- denn überschätzt.



Variantensimulationen mittels des Mischungsmodells ergaben, daß unter der Annahme einer weiteren Reduktion der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf ein Drittel der Gesamtfläche mit einer mittleren Nitratkonzentration von 50 mg/l im Grundwasser zu rechnen ist. Sollte es bei der bestehenden Flächenrelation gelingen, die Austragskonzentration aus der landwirtschaftlichen Nutzung auf 90 mg/l zu senken, womit auch eine Reduktion der Konzentration von Nitrat im zuströmenden Grundwasser auf 40 mg/l verbunden wäre, so kann langfristig mit einer Nitratkonzentration im Grundwasser von 45 mg/l gerechnet werden. Wie jüngste Modellrechnungen gerade auf den hoch austragsgefährdeten seichten Böden über Schotter zeigen, ist dieses Ziel durch Verminderung der Düngung unter „ökonomisch sinnvollen“ Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft praktisch nicht mehr erreichbar. Ein Szenario, das von der Annahme ausgeht, daß die Reduktion der landwirtschaftlichen Nutzfläche auf 33 % mit einer Reduktion der Austragskonzentration aus der Landwirtschaft und damit der Grundwasserzustromkonzentration gekoppelt werden kann, läßt eine mittlere Nitratkonzentration im Grundwasser von 42 mg/l erwarten. Kann bei dieser Flächenverteilung aufgrund von Maßnahmen im nichtlandwirtschaftlichen Bereich die Grundwasserzustromkonzentration aus oberstrom auf 30 mg abgesenkt werden, läßt dieses Maßnahmenbündel langfristig eine mittlere Nitratkonzentration im Grundwasser des Untersuchungsgebietes von < 40 mg/l erwarten. Es zeigt sich, daß die Verringerung der Nitratkonzentration bis auf einen Wert von 53 mg/l im wesentlichen durch Maßnahmen seitens der Landwirtschaft und die Einrichtung von Schutz- und Schongebieten sowie der natürlichen Entwicklung der Untersuchungsregion zu bewerkstelligen war, wogegen für eine weitere Abnahme bis in einen Bereich der gesichert und langfristig unterhalb des Grundwasserschwellenwertes von 45 mg/l zu liegen kommt, in immer stärkerem Ausmaß synoptische Wirkungsweisen in Kombination eingesetzt werden müssen, um die Trinkwasserqualität im Grundwasser des Leibnitzer Feldes auch in Zukunft sicherstellen zu können.

Basierend auf intensiven Untersuchungsergebnissen an wenigen ausgewählten Standorten und der Regionalisierung der Ergebnisse durch die Verknüpfung von Methoden aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen war es möglich, die Bedeutung der ungesättigten Zone für den Schutz des Grundwassers in einem regionalen Maßstab zu dokumentieren. Es zeigte sich deutlich, daß der Weg der numerischen Modellierung von Wasserbewegungs- und Stofftransportprozessen in der ungesättigten und gesättigten Zone eines Aquifers die Möglichkeit bietet, quantitative Prognosen über

die Auswirkung unterschiedlicher Maßnahmen auf das Gesamtsystem zu erstellen. Gerade in der Modellbildung zeigte sich aber sowohl im Bereich der Modellerstellung als auch der Parametergewinnung noch ein deutlicher Forschungsbedarf. Dieser liegt für quartäre Tallandschaften ähnlich dem Leibnitzer Feld in der Erfassung der Grundwasserneubildung aus nicht ackerbaulich genutzten Bereichen, dem zugehörigen Stoffaustausch, einer flächenhaften Parametrisierung von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen der ungesättigten Zone unter Berücksichtigung von präferentiellen Fließwegen und in einer notwendigen dreidimensionalen Koppelung der Modelle in der ungesättigten und gesättigten Zone.

Gerade die hier angestellten Auswertungen zeigen aber auch, daß die Entwicklung von Problemlösungsansätzen im Grundwasserschutz intensiver geographisch-interdisziplinärer Forschung bedarf. Eine enge Verflechtung von physisch- mit humangeographischen Faktoren führt im Konnex mit mathematisch-technischen Ansätzen zu Ergebnissen, die der Verwaltung die Möglichkeit bieten, die rechtlichen Rahmenbedingungen der unterschiedlichen Raumnutzung exakter zu definieren. Die Forschungsergebnisse erlauben es uns, die natürliche Ressource Grundwasser nachhaltig zu erhalten und auch unseren Nachkommen eine hervorragende Qualität der Wasserversorgung zu sichern.

Die wasserungesättigten Deckschichten über seichtliegenden geringmächtigen Aquiferen haben für den Schutz des Grundwassers entscheidende Bedeutung, wobei durch die homogene Ausprägung der natürlich gelagerten Kiese und Sande diesen eine wesentlich höhere Bedeutung zukommt, als bis dato angenommen.

Hinsichtlich der Nutzung von Flächen in Brunneneinzugsgebieten muß die Vorstellung, daß eine landwirtschaftliche Intensivnutzung die Qualität des Grundwassers sichert, für die seichtgründigen und gut durchlässigen Standorte der Tallandschaften im S der Steiermark revidiert werden. Ausschließlich eine Extensivierung der Landwirtschaft, die Schaffung von Grundwasservorsorgeflächen und eine entsprechende Bewertung nichtlandwirtschaftlicher Nutzungsformen werden es zulassen, geringmächtige und seichtliegende Aquifere, deren Grundwasser durch infiltrierende Niederschläge vorzugsweise erneuert wird, für die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser höchster Qualität zu sichern. Besondere Bedeutung kommt dabei der Bewertung

unterschiedlicher Standorteigenschaften auf der einen Seite, der Bewertung der Grundwasserqualität im gesamten hydrologischen System auf der anderen Seite zu.