

Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung

Band 75

**Untersuchungen der
gespannten Grundwasservorkommen
im Feistritz- und Safental,
Oststeiermark**

von

H. Bergmann

A. Lettowsky

E. Niesner

Ch. Schmid

J. Schön

F. Überwimmer

**Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Fachabteilungsgruppe Landesbaudirektion
Fachabteilung III a – Wasserwirtschaft**

Graz 1993

INHALTSVERZEICHNIS

- 1) H. Zetinigg:
Einbegleitung 1

- 2) H. Bergmann, A. Lettowsky & F. Überwimmer:
Hydraulische Untersuchung der gespannten Grundwasser-
vorkommen im Feistritz- und Safental/Oststeiermark 1

- 3) Niesner, E. u. Ch. Schmid:
Oberflächengeophysikalische Messungen zur lithologischen
Gliederung des artesischen Grundwasserkörpers im mittleren
Feistritztal (Oststeiermark). 81

- 4) Schön, J.:
Geophysikalische Bohrlochmessungen zur Untersuchung
von artesischen Horizonten in der Oststeiermark. 97

- 5) Verzeichnis der bisher erschienenen Bände 113

EINBEGLEITUNG

Die Verfolgung der flächenhaften Ausdehnung artesischer Horizonte, die Frage nach der Regeneration artesischer Wässer und damit auch Aussagen über die gegenseitige Beeinflussung artesischer Brunnen, bis hin zur Festlegung von Konsensmengen, bereiten für die Vorkommen des Steirischen Beckens immer noch große Schwierigkeiten. Für die Beantwortung dieser Fragen sind zwar eine Reihe mehr oder weniger gesicherter Ansatzpunkte, bezogen auf kleine Teilbereiche des Steirischen Beckens, vorhanden, doch ist auf Grund der komplizierten hydrogeologischen Verhältnisse im Einzelfall ihre Extrapolation in andere Teilbereiche und die Anwendung von Analogieschlüssen als wichtigste hydrogeologische Methode höchst problematisch. Insgesamt sind die Kenntnisse über die, unter dem Aspekt der Notwasserversorgung zunehmend an Bedeutung gewinnenden artesischen Wässer - die meist als Tiefengrundwässer gelten können - als unzureichend zu bezeichnen. Schließlich muß der Wasserwirtschafter Menge und Qualität des Wasservorkommens kennen mit dem es zu wirtschaften gilt. Diese Kenntnis ist heute auch auf die Erfordernisse des Qualitätsschutzes auszudehnen, so daß spezielle Eigenschaften des jeweiligen Wasservorkommens wie Fließgeschwindigkeit, Verweildauer des Wassers im Untergrund, Beschaffenheit schützender Deckschichten, Lage des Regenerationsgebietes etc. erkundet werden müssen. Es sind dies Aufgaben, die die Anwendung moderner Untersuchungsmethoden erfordern. Der hierfür notwendige hohe finanzielle Aufwand läßt aber die Arbeiten nur langsam voranschreiten. Es ist sozusagen Mosaikstein um Mosaikstein zu legen.

Die hier vorgestellten Arbeiten vertiefen einerseits die Kenntnisse über die artesischen Horizonte im Feistritz- und Safental und zeigen andererseits neue methodische Ansätze aus dem Bereich der Hydrologie und Geophysik.

Da von der wasserwirtschaftlichen Planung in den genannten Tälern schon mehrere Jahre kontinuierliche Messungen des gespannten Grundwasserspiegels ausgeführt werden, wird hier versucht, die Ganglinien zu erstellen und diese sodann bezüglich einer Grundwasserneubildung aus den Niederschlägen zu interpretieren, was erfreuliche Ergebnisse bringt und den Arbeitsaufwand für die Grundwasserbeobachtung rechtfertigt.

Da die Qualität der Bohrprofile von Rotationsspülbohrungen mit Rollenmeiseln bekanntermaßen für die Erstellung von geologischen Bohrprofilen unzureichend ist und vor allem bei der Identifikation der Aquifere ungenügende Sicherheiten bietet, sollte hierfür durch den Einsatz geophysikalischer Bohrlogs Hilfe geboten werden. In Erkenntnis dieses Mangels der Bohrprofile und der Möglichkeit, Hilfe durch die Geophysik zu erhalten, wird von der wasserwirtschaftlichen Planung seit mehr als 10 Jahren bei eigenen Versuchsbohrungen Bohrlochgeophysik mit zunehmender Intensität eingesetzt. Weiters wird von der wasserwirtschaftlichen Planung auch dafür gesorgt, daß beim Bau artesischer Brunnen durch Gemeinden diese Methode zur Anwendung gelangt. Nun wird versucht, die Ergebnisse dieser Bohrlochmessungen von verschiedenen Bohrungen zu korrelieren und Aussagen über die flächenhafte Verbreitung artesischer Horizonte zu machen. Weiters werden mit dem gleichen Ziel auch die Ergebnisse von Oberflächengeophysik - die bisher für artesisches Wasser nur in geringem Maße eingesetzt wurde - nach Eichung an gut dokumentierten Bohrungen neu interpretiert und so wesentlich besser abgesicherte Aussagen über die Verbreitung artesischer Horizonte erzielt.

Insgesamt wird damit wieder ein wichtiger Beitrag zur Kenntnis der artesischen Wässer in intensiv beanspruchten Teilbereichen des Steirischen Beckens, nämlich dem Feistritz- und Safental, geleistet, der zumindest aus wasserwirtschaftlicher Sicht wert erscheint, publiziert zu werden.

Graz, im April 1993



(OBR Univ.Doiz. Dr. H. Zetinigg)

HYDRAULISCHE UNTERSUCHUNGEN
DER GESPANNTEN GRUNDWASSERVORKOMMEN
IM FEISTRITZ- UND SAFENTAL/OSTSTEIERMARK

H. Bergmann

und

A. Lettowsky

und

F. Überwimmer

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1. Das Untersuchungsgebiet	6
1.1 Lage und wasserwirtschaftliche Bedeutung des Untersuchungsgebietes	6
1.2 Hydrogeologischer Überblick	10
1.3 Das Meßstellennetz	12
1.4 Ziele der Untersuchung	14
2. Hydrologische und hydraulische Grundlagen und Darstellung der aufgezeichneten Druckspiegelganglinien	16
2.1 Gespannte Grundwassersysteme	16
2.2 Gleichungen der Grundwasserströmung und hydraulische Randbedingungen	21
2.3 Gangliniendarstellung	31
2.4 Luftdruckwirksamkeit auf die Ganglinien der Druckspiegelhöhe	35
3. Druckspiegelganglinien als Indikatoren der Grundwasserneubildung	46
3.1 Druckwellenausbreitung	46
3.2 Statistische Ganglinienparameter und Korrelationsrechnungen	51
3.3 Niederschlagswirksamkeitsanalyse	57
4. Untersuchung hydraulischer Verbindungen des gespannten Grundwasservorkommens im mittleren Feistritztal mit oberflächennahen Grundwasserleitern	62
5. Numerische Modellierung des gespannten Grundwasserleiters im Feistritztal	65
6. Ergebnisse der Untersuchung	73
Literaturverzeichnis	77

Einleitung

Gespannte Grundwasservorkommen werden vor allem in Gebieten genutzt, wo für die Wasserversorgung weder eine ausreichende Menge an seichtliegendem Talgrundwasser, noch an Quellwasser zur Verfügung steht. In den letzten Jahrzehnten haben sich weiters die Nutzungsmöglichkeiten von seichtliegendem Grundwasser, Quellwasser und Oberflächenwasser wegen der an Umfang und Intensität zunehmenden Inanspruchnahme von Flächen durch Besiedelung, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft stark eingengt. Die Bedeutung der tiefen, gespannten Grundwässer liegt vor allem darin begründet, daß gespannte Grundwasservorkommen durch dichte, sie überlagernde Deckschichten langfristig gut geschützt sind.

Die Begriffe "gespanntes Grundwasser" bzw. "artesisch gespanntes Grundwasser" werden laut ÖNORM B 2400 definiert als

Grundwasser, dessen Grundwasserdruckfläche über der Grundwasseroberfläche liegt, bzw. gespanntes Grundwasser, dessen Grundwasserdruckfläche über der örtlichen Geländeoberfläche liegt.

Zetinigg (1983) definiert gespanntes Grundwasser im hydrogeologischen Sinn als solches, das

aufgrund der Überlagerung des Grundwasserleiters durch eine wasserundurchlässige Schicht keinen freien Grundwasserspiegel entwickeln kann und bei seiner Erschließung in die Deckschichte aufsteigt.

Nach ÖWWV (1986) sind gespannte Grundwässer fast immer Tiefengrundwässer. Der Begriff Tiefengrundwasser wird laut ÖNORM B 2400 definiert als

Grundwasser in den tieferen Schichten der Erdrinde, das eine weiträumige Überlagerung durch Deckschichten, eine lange Aufenthaltsdauer und meist besondere physikalisch-chemische Eigenschaften aufweist.

Als Beispiel für eine physikalisch-chemische Besonderheit kann hier das Fehlen von Tritium im Tiefengrundwasser genannt werden, das auftritt, wenn sich das Grundwasser seit mindestens 50 Jahren im Untergrund aufhält und keine Beimengung jüngeren Wassers erfolgt.

Eine zusätzliche Bedeutung tiefer, gespannter Grundwasservorkommen ist dadurch gegeben, daß auf erschlossene gespannte Grundwasservorkommen als Trinkwasserreserven in verstärktem Ausmaß zurückgegriffen werden kann, falls seichtliegende Grundwasservorkommen durch umweltbelastende Entwicklungen oder durch Katastrophenfälle in einem Gebiet für längere Zeit unbrauchbar werden.

In Österreich kommen gespannte Grundwässer im Steirischen Becken, im ober-

österreichischen Molassebecken und zum Teil im Wiener Becken vor (ÖWWV, 1986; Abb.1.1). Weiters treten gespannte Grundwässer vereinzelt in alpinen Talbereichen auf.

Für die Trinkwasserversorgung können nur jene Grundwasserleiter genutzt werden, die in den oberen Bereichen von Sedimentbecken liegen. Hier dominieren Lockersedimente, die bei entsprechender Überlagerung durch wasserundurchlässige Schichten gespannte Porengrundwasserleiter bilden.

In der Oststeiermark sind gespannte Grundwasservorkommen vor allem im ländlichen Raum für die häusliche und kommunale Trinkwasserversorgung von großer Bedeutung. Um eine sparsame, koordinierte und langfristig gesicherte Trinkwasserversorgung in dieser Region zu gewährleisten, ist eine zielbewußte wasserwirtschaftliche Planung zur Erschließung und Nutzung der gespannten Grundwasserressourcen, wie sie vom Referat für wasserwirtschaftliche Planung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung wahrgenommen wird, unumgänglich notwendig. Hierbei erhebt sich zunächst die Frage nach dem nutzbaren Grundwasserdargebot dieser gespannten Grundwasservorkommen.

Nach ÖNORM B 2400 ist das nutzbare Grundwasserdargebot

jener Teil der Grundwasserneubildungsrate, dessen Nutzung wasserwirtschaftlich und ökologisch vertretbar ist.

Die Grundwasserneubildungsrate wird hierbei definiert als

Wasservolumen, das einem Grundwasserkörper im Mittel in einem bestimmten Zeitabschnitt zufließt.

Bei den Begriffen "Grundwasserdargebot" und "Grundwasserneubildung" muß beachtet werden, daß das von Natur aus vorhandene Ausgleichsvermögen nicht den Grenzwert für diese Begriffe bildet. Vielmehr ist jenes Ausgleichsvermögen maßgebend, das sich bei einer künftigen Grundwassernutzung einstellen wird und in Abhängigkeit von der Einspeisung im Grundwassererneuerungsgebiet durchaus auch größer als das naturgegebene Ausgleichsvermögen werden kann.

Für eine Bewirtschaftung gespannter Grundwasserkörper muß zusätzlich der Begriff "Grundwasserlagerstätte (Grundwasserspeicherstätte)" unterschieden werden. Übersteigt die Entnahmemenge längerfristig die Grundwasserneubildung, so werden gespannte Grundwasserkörper als "Lagerstätte" genutzt, d.h. kontinuierlich abgebaut. Zum Beispiel können in Krisenfällen, in denen seichtliegende Grundwasserleiter so stark verschmutzt werden, daß sie für die Trinkwasserversorgung ungeeignet sind, die benötigten Fördermengen aus gespannten Grundwasserleitern im Vergleich zur Neubildungsrate so hoch sein, daß sich die Grund-

wasservorräte wie der Nutzinhalt einer Lagerstätte erschöpfen. Somit erhebt sich für die Wasserwirtschaft nicht nur die Frage nach der Neubildungsrate und damit nach dem nutzbaren Grundwasserdargebot, sondern auch nach der Ausdehnung des gespannten Grundwasserleiters und somit nach der Größe der vorhandenen Grundwasservorräte. In welchen Einzelfällen eine lagerstättenmäßige Überbeanspruchung gespannter Grundwasservorkommen zulässig ist, bleibt politischen Entscheidungen im Rahmen einer allgemeinen Bewirtschaftung des Wassergutes vorbehalten.

Für eine Bewirtschaftung der gespannten Grundwasservorkommen in der Oststeiermark wurde eine umfassende Untersuchung dieser Grundwasservorkommen durchgeführt. Die vom Referat für wasserwirtschaftliche Planung im Feistritz- und Safental errichteten und betreuten Grundwassermeßstellen bilden durch die dort während mehrerer Jahre aufgezeichneten Ganglinien der Druckspiegelhöhen eine wesentliche Grundlage für die vorliegende Untersuchung. Zusätzlich wurden die an den beiden Forschungsstationen Grafendorf und Seibersdorf gemessenen Druckspiegelhöhen ausgewertet und weiters für eine gezielte und detaillierte Untersuchung im Feistritztal ein Versuchsgebiet mit einem verdichteten Meßnetz eingerichtet.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden gespannte Grundwasserleiter als Teile von hydrologischen Grundwassersystemen betrachtet. Damit ist eine besser definierte Beschreibung des Wasserhaushaltes gespannter Grundwassersysteme möglich.

Die hydraulischen Unterschiede zwischen ungespannten und gespannten Grundwasserleitern können herausgearbeitet werden. Es können hydraulische Randbedingungen angegeben und Einspeisungsvorgänge beschrieben werden. Damit wird die Grundlage erarbeitet, auf der durch Auswertung von Grundwasserganglinien und deren Schwankungen auf die Grundwassererneuerung und den Zustand des Grundwassersystems mittels statistischer Methoden Rückschlüsse gezogen werden können.

Die oben genannten Untersuchungen werden im folgenden behandelt und deren Ergebnisse dargestellt. Die verwendeten Untersuchungsmethoden der Kapitel 2 und Kapitel 3 basieren in wesentlichen Teilen auf der am Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie der Technischen Universität Graz erstellten und an der Fakultät für Bauingenieurwesen eingereichten Dissertation (ÜBERWIMMER, 1992). Detaillierte Beschreibungen der Modellansätze, Ableitungen der verwendeten Methoden und zugehörige Literaturangaben können der oben angegebenen Arbeit entnommen werden.

1. Das Untersuchungsgebiet

1.1 Lage und wasserwirtschaftliche Bedeutung des Untersuchungsgebietes

In der Oststeiermark werden gespannte Grundwasservorkommen durch Hausbrunnen, kommunale bzw. zentrale Wasserversorgungsanlagen und Brunnen für Industrie- und Gewerbebetriebe genutzt.

Hausbrunnen werden vor allem an Stellen des gespannten Grundwasserleiters errichtet, wo das Druckniveau über der Geländeoberfläche liegt. Es handelt sich damit um artesischen Brunnen, die ständig frei ausfließen. Sie dienen ausschließlich der Versorgung eines einzelnen Hauses oder Gehöftes und besitzen üblicherweise nur teilweise verrohrte Bohrungen mit einem Rohrdurchmesser von maximal zwei Zoll.

Für die zentrale Wasserversorgung werden Filterrohrbrunnen mit einem Rohrdurchmesser von mehr als 100 mm errichtet. Diese Brunnen sind auch bei artesischen Verhältnissen für eine Pumpförderung eingerichtet. Brunnen für Industrie- und Gewerbebetriebe werden meist gleich wie die Brunnen der zentralen Wasserversorgungsanlagen ausgeführt. Abb.1.1 gibt einen Überblick über gespannte Grundwasservorkommen in Österreich.

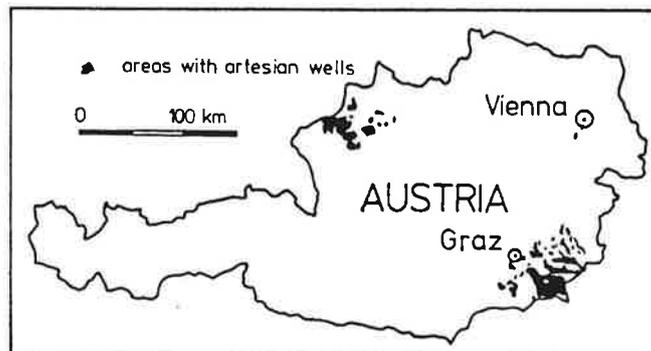


Abb.1.1: Gebiete mit gespannten Grundwasservorkommen für die Trinkwasserversorgung in Österreich (ÖWWV, 1986).

Bereits seit 1870 wird in der Oststeiermark gespanntes Grundwasser für die Trinkwasserversorgung erschlossen. Das begann damit, daß bei der Kohleprospektion in einigen Fällen artesisches Wasser erbohrt wurde. Bereits in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurden viele artesischen Brunnen in der Oststeiermark hergestellt. Im Jahr 1905 wurde die erste kommunale Wasserversorgungsanlage mit artesischen Bohrungen für die Stadt Fürstenfeld errichtet. Nach

ZETINIGG (1982) wird derzeit für 11 Gemeinden der Oststeiermark ausschließlich gespanntes Grundwasser verwendet. Die Wassermenge, die derzeit für kommunale Wasserversorgungsanlagen aus gespannten Horizonten entnommen wird, beträgt ungefähr 56 l/s. Diese Entnahmemenge wird aus 26 Entnahmefrünnen gefördert (Stand 1982). Gewerbe- und Industriebetriebe entnehmen mittels eigener Brunnen zusätzlich etwa 10 l/s gespanntes Grundwasser. Gemäß dem Stand von 1982 werden durch insgesamt 1527 artesische Hausbrunnen 117 l/s Grundwasser entnommen, jedoch nur etwa 10 bis 20 % dieser Entnahmemenge tatsächlich genutzt. Die restlichen 80 bis 90 % fließen ungenützt ins seichtliegende Grundwasser ab. Dafür ist ausschließlich die große Zahl von ungedrosselten Hausbrunnen verantwortlich, die ohne Rücksicht auf den tatsächlichen Bedarf eine ständig gleichbleibende Wassermenge fördern. Eine Drosselung der frei auslaufenden Entnahmemenge ist aufgrund einer unzureichenden Tiefenverrohrung mit der Gefahr verbunden, daß der Brunnen bei einer stufenweisen Drosselung entweder überhaupt ausfällt oder unterirdisch ausfließt, was ebenfalls zu einem großen unkontrollierten Wasserauslauf führt und zusätzlich Kellerräume etc. vernässen kann. Die Problematik der verschwenderischen Nutzung gespannter Grundwasservorkommen durch die große Anzahl von artesischen Hausbrunnen wird von RONNER und SCHMIED (1968) detailliert behandelt. In Abb. 1.2 ist die Nutzung gespannter Grundwasserleiter in der Oststeiermark dargestellt.

Während für Streusiedlungen (z.B. im oberösterreichischen Molassebecken) gemäß ÖWWV (1986) keine Alternative zur Nutzung von Tiefengrundwasser durch Hausbrunnen besteht, können in geschlossenen Siedlungsräumen, wie sie zum Beispiel in weiten Bereichen der Oststeiermark vorliegen, artesische Hausbrunnen durchaus durch zentrale, kommunale Wasserversorgungsanlagen ersetzt werden. Neben dem schlechten Nutzungsgrad der Grundwasserressourcen sind die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Brunnen und die Unmöglichkeit einer Wasseraufbereitung für Einzelanlagen als weitere Nachteile von Hausbrunnen zu nennen. Aus diesen Gründen werden heute wasserrechtliche Bewilligungen für Hausbrunnen höchstens auf 10 bis 20 Jahre befristet erteilt. Der vor Jahrzehnten artikulierte Leitsatz "Jeder Liegenschaft ein eigener artesischer Brunnen" wird somit von der wasserwirtschaftlichen Planung begründet abgelehnt, und als wesentliches Ziel der nächsten Jahre ein möglichst lückenloser Ersatz der Hausbrunnenversorgung durch die kommunale, zentrale Wasserversorgung gesehen. Damit ergeben sich neben den beschriebenen Vorteilen allerdings viele rechtliche Probleme und eine besondere Verantwortung bezüglich einer langfristigen gesicherten Versorgung auch bei ständig steigendem Trinkwasserverbrauch.

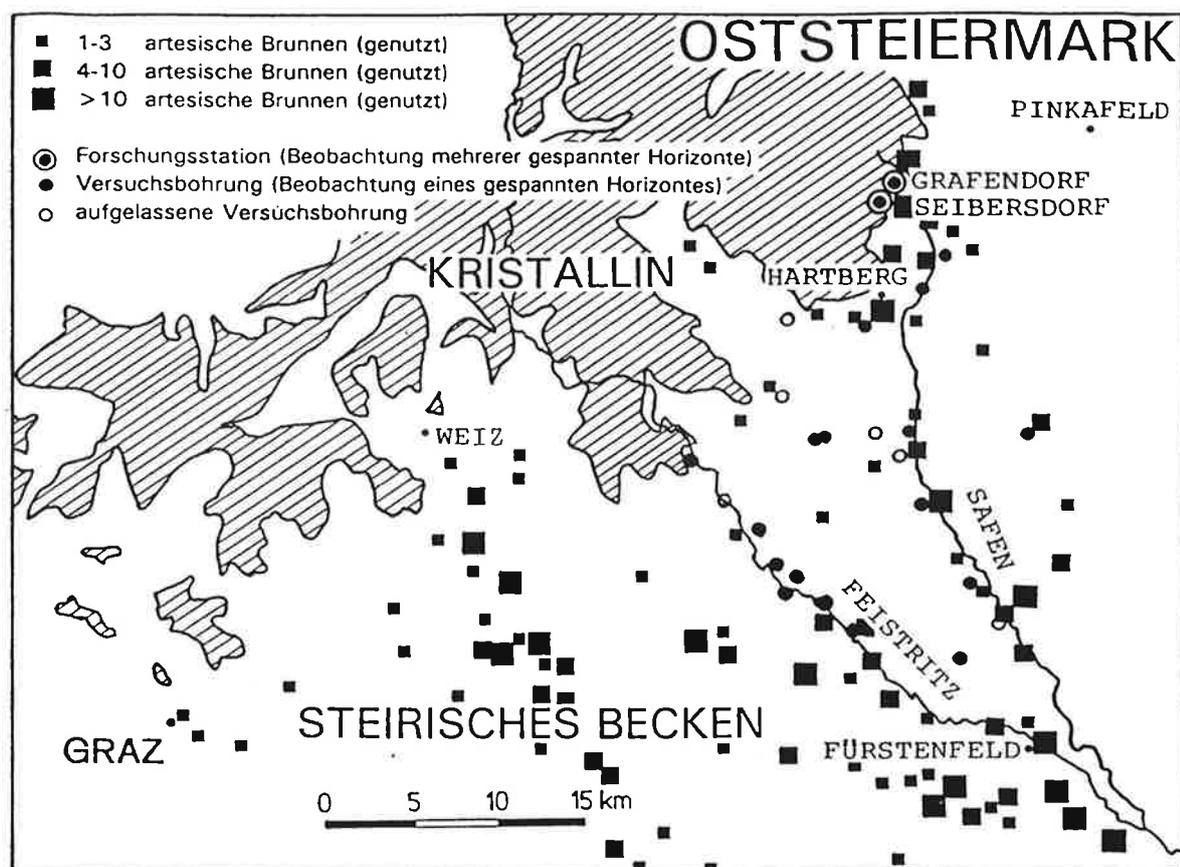


Abb.1.2: Brunnen in gespannten Grundwasserleitern der Oststeiermark (ATLAS DER STEIERMARK, 1970).

Sofern tiefe Grundwässer als Trink- und Brauchwässer erschlossen bzw. genutzt werden, gelten für sie nach DVWK (1987) prinzipiell die gleichen Anforderungen wie für oberflächennahe Grundwasservorkommen. Es muß daher überprüft werden, ob für eine bedarfsgerechte langfristige Entnahme ausreichend große Grundwasserressourcen vorhanden sind. Es muß auf geeignete Aquifereigenschaften geachtet werden, die einen wirtschaftlichen Bau und Betrieb von Wassergewinnungsanlagen ermöglichen. Durch eine langfristige Grundwasserentnahme dürfen andere Nutzer von Grundwasser nicht geschädigt werden. Weiters muß die Grundwasserqualität den Nutzungsanforderungen entsprechen. Dies muß unter Umständen durch eine entsprechende Wasseraufbereitung sichergestellt werden. Falls Schutzzonen notwendig sind, um die hygienischen Anforderungen an das Trinkwasser zu gewährleisten, müssen diese eingerichtet werden. Restriktionen für Grundwasserentnahmen ergeben sich somit aufgrund technisch-naturwissenschaftlicher (hydraulischer, hydrologischer, chemischer, etc.), medizinisch-hygienischer, ökologischer, ökonomischer, soziologischer und politischer Gründe.

Größere Wasserentnahmen aus gespannten Grundwasserleitern verursachen starke Veränderungen im Grundwassersystem, insbesondere starke Druckabsenkungen. Solange das Grundwassersystem jedoch auf lange Sicht nicht überbeansprucht wird, ist die Förderung gespannten Grundwassers weitgehend unabhängig von kürzerfristigen Schwankungen der Grundwasserneubildungsrate und erlaubt für gewisse, abgegrenzte Zeiträume eine stärkere Förderrate. Eine Überbeanspruchung des Grundwassersystems tritt auf, falls eine höhere Förderrate nicht durch eine entsprechend erhöhte Einspeisungsrate ausgeglichen werden kann. Damit geht ein vorerst stationärer Zustand in einen instationären Abbauprozess der Grundwasservorräte über. Die Durchlässigkeiten und Speicherkoeffizienten tiefer, gespannter Grundwasserleiter sind im allgemeinen vergleichsweise niedrig, sodaß die Wassergewinnung aus solchen Schichten verhältnismäßig aufwendig sein kann. Allerdings reicht auch bei weiträumig ausgedehnten gespannten Grundwasserleitern eine einzige tiefe Bohrung aus, um die gesamten Ressourcen dieses Grundwassersystems zu nutzen. Dies ergibt sich aus der großen Absenkung des Druckspiegelniveaus und durch die weite, räumliche Ausbreitung des Absenkungstrichters. Im allgemeinen werden tiefe, gespannte Grundwässer in für eine Bewirtschaftung maßgeblichen Zeiträumen durch das Vorhandensein von großflächigen, dichten Deckschichten durch antropogene Belastungen nicht beeinträchtigt. Weiters bietet das hohe Druckspiegelniveau meist einen Schutz vor unmittelbarer qualitativer Beeinträchtigung durch direkte Einsickerung seichtliegenden Grundwassers. ZETINIGG (1987) beschreibt die Notwendigkeit und Möglichkeiten der Einrichtung von Schutz- und Schongebieten für gespannte Grundwassersysteme.

Die wasserwirtschaftlichen Anforderungen für die Nutzung gespannter Grundwässer durch kommunale Wasserversorgungsanlagen können nur bei Kenntnis der Systeme gespannter Grundwasservorkommen einwandfrei erfüllt werden. Während früher für den Nachweis der gewinnbaren Grundwassermenge das Ergebnis eines Überlaufversuches als ausreichend erachtet wurde und bei Hausbrunnen keinerlei Untersuchungen erfolgten, müssen für eine langfristige Entnahmegarantie und damit für eine verantwortungsvolle und zugleich wirtschaftliche Planung die gespannten Grundwasservorkommen bezüglich ihres Wasserhaushaltes eingehend untersucht werden. Dafür reicht es nicht aus, so wie bisher ausschließlich den langfristigen Trend der Grundwasserspiegelhöhen an Grundwassermeßstellen zu beobachten. Die große wasserwirtschaftliche Bedeutung der gespannten Grundwässer für die Trinkwasserversorgung der Oststeiermark, insbesondere für die Wasserversorgung der in den beiden Tälern Feistritztal und Safental gelegenen Ortschaften ergibt sich daraus, daß in diesem Gebiet keine größeren Quellen zur

Verfügung stehen und das oberflächennahe Grundwasser der quartären Lockergesteine sowohl qualitativ, als auch quantitativ für eine Versorgung nicht ausreicht. Das folgende Kapitel soll einen hydrogeologischen Überblick über das Gebiet dieser beiden Täler geben, um im Anschluß daran das dort vorhandene Meßstellennetz und die Ziele dieser Untersuchung vorstellen zu können.

1.2 Hydrogeologischer Überblick

Wie aus Abb.1.2 erkennbar, liegt das Untersuchungsgebiet der beiden Täler Feitstritztal und Safental im Steirischen Becken am Rande des Kristallins. Das Steirische Becken als großes sedimentäres Tertiärbecken gehört als Teilbecken dem pannonischen Becken an. Im Westen und Norden wird das Steirische Becken durch kristallines Grundgebirge begrenzt. Die Abgrenzung im Osten gegen das Westpannonische Becken wird von der teilweise überdeckten südburgenländischen Schwelle gebildet. Die marine myozene Beckenfüllung besitzt zwar eine Mächtigkeit bis etwa 3000 m, für die Trinkwasserversorgung sind jedoch vorwiegend die oberflächennahen sarmatischen und pannonen Schichtfolgen von Bedeutung.

Das Steirische Becken wurde durch eine intensive Bruchtektonik geprägt, wobei allerdings generell die älteren Ablagerungen stärker betroffen waren als die sarmatischen und pannonen Ablagerungen. Gemäß der Darstellung in ÖWWV (1986) liegen die Hauptaquifere der Tiefengrundwässer in Schichten des Pann, Pannon, Sarmat und Baden. Sie sind überwiegend klastisch ausgebildet, wobei örtlich im Sarmat und Baden Riffkalke mit höherer Porosität auftreten. Durch die Sausalchwelle wird das steirische Tertiärbecken in zwei Abschnitte gegliedert, und zwar in einen oststeirischen und einen weststeirischen Abschnitt des Steirischen Beckens. Für die räumliche Ausdehnung einzelner grundwasserführender Schichten ist die Genese der Sedimente von Bedeutung. Während im marinen Bereich eine gleichförmige Ausbreitung der Grundwasserleiter zu erwarten ist, muß im limnischen und fluviatilen Sedimentationsbereich mit einem häufigen, plötzlichen Fazieswechsel gerechnet werden, was im gleichen Horizont zu einem Wechsel von leitenden und stauenden Gesteinen führt. Nach ZETINIGG (1983) stellen die fluviatilen Schotter und Sande im Pannon des Steirischen Beckens nur schwer verfolgbare Grundwasserleiter dar, deren Verbreitung keineswegs mit den heutigen Oberflächenformen übereinstimmt. Im oststeirischen Hügelland sind die innerhalb der pannonen, fluviatilen und limnischen Ablagerungen liegenden tertiären Hauptgerinne nach ZÖTL (1983) West-Ost bis Nordwest-Südost ausgerichtet. Aufgrund

einer zu Beginn des Quartärs noch fortdauernden tektonischen Hebung im Bereich des Randgebirges liegen die tertiären Hauptgerinne im spitzen Winkel zu den Mittel- und Oberläufen der Flüsse Lafnitz und Feistritz. Unter dem Pannon liegt das Sarmat, das größtenteils aus Brackwasserablagerungen von tonigen und sandigen Schichten bis zu karbonatischen Lagen besteht. Unmittelbar am nordwestlichen Beckenrand, am Fuß des kristallinen Randgebirges treten örtlich Blockschotter von größerer Mächtigkeit auf, die hauptsächlich aus Kristallingeröll mit geringmächtigen Ton- und Sandlagen bestehen und aufgrund des bindigen Zwischenmittels eine eher geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Die Basis des Tertiärbeckens bilden paläozoische Karbonatgesteine, und darunter liegt das kristalline Grundgebirge, das den nördlichen und westlichen Beckenrand bildet.

Im Pannon und Sarmat tritt eine häufige, teils weiträumige Wechsellagerung von porösen, sandig-kiesigen Schichten mit schluffig-tonigen Schichten auf. Diese Schichtenabfolge zusammen mit dem natürlichen Gefälle der Täler innerhalb des Steirischen Beckens bewirkt die Ausbildung von gespannten Grundwasserhorizonten. Sand-Kiesschichten innerhalb des Pannons und Sarmats bilden somit im oststeirischen Becken nutzbare gespannte Grundwasserleiter. Besonders schotter- und kiesführende tertiäre Hauptgerinne des Pannon sind ergiebige, für die Trinkwassergewinnung gut geeignete Aquifere. Die Bereiche außerhalb der Alpenflußläufe weisen nur kleinere Feinsandlinsen auf, die Ergiebigkeiten unter 1 l/s, teilweise weniger als 0,1 l/s besitzen. Auch im Sarmat sind die Voraussetzungen für eine Trinkwassergewinnung recht unterschiedlich. Mit Ausnahme von tonigen Lagen sind die sarmatischen Sande, Sandsteine und Kalkbänke sehr wasserdurchlässig. Dies garantiert bei einzelnen Bohrungen (z.B. Versuchsbohrung Grafendorf, artesische Brunnen verschiedener kommunaler Wasserversorgungsanlagen), die unterhalb der pannonen Schichten sarmatische Ablagerungen erschließen, Schüttungen zwischen 1 l/s und 5 l/s.

In einzelnen Gebieten der Oststeiermark liegen detaillierte hydrogeologische Untersuchungen vor. Im Feistritztal führte das ARSENAL (1982) Bohrlochmessungen durch. SCHMID (1982a) nimmt geoelektrische Tiefensondierungen im Feistritztal vor und schließt dem Untersuchungsbericht eine lithologische Interpretation (SCHMID, 1982b) an. ZOJER (1987) analysiert hydrogeologisch die Grundwässer der pannonen Schichtfolge im Feistritz- und Safental. Mittels Isotopen untersuchte PRZEWLOCKI (1975) den Raum Grafendorf und ANDREWS et al. (1983) den Raum Blumau. Die genannten Untersuchungen enthalten umfassende Details zu der oben in kurzer Form wiedergegebenen hydrogeologischen Beschreibung des Untersuchungsgebietes.

1.3 Das Meßstellennetz

Grundlagen für die hydraulische Untersuchung sind außer den beschriebenen Ergebnissen von hydrogeologischen Untersuchungen in der Oststeiermark die Meßdaten von den beiden etwa zehn Jahre lang beobachteten Forschungsstationen Grafendorf und Seibersdorf mit je drei getrennt erschlossenen Grundwasserhorizonten, ein dichtes Netz von Aufschlußbohrungen in einem Teil des Feistritztales und ein flächendeckendes Netz von sonstigen, über verschieden lange Zeiträume beobachteten Bohraufschlüssen im Feistritz- und Safental. Die Daten der Meßstellen stehen als Grundwasserganglinien auf Monatsschreibstreifen für Auswertungen zur Verfügung. Die Meßstellen des tertiären, gespannten Grundwassers sind zusammen mit ihrem Beobachtungszeitraum in Tab.1.1 eingetragen.

Von Bohrungen des Feistritz- und Safentales stehen für die nachfolgenden Auswertungen insgesamt 114 Stationsjahre zur Verfügung. Die Lage der ausgewerteten Grundwassermeßstellen ist in Abb.1.3 ersichtlich.

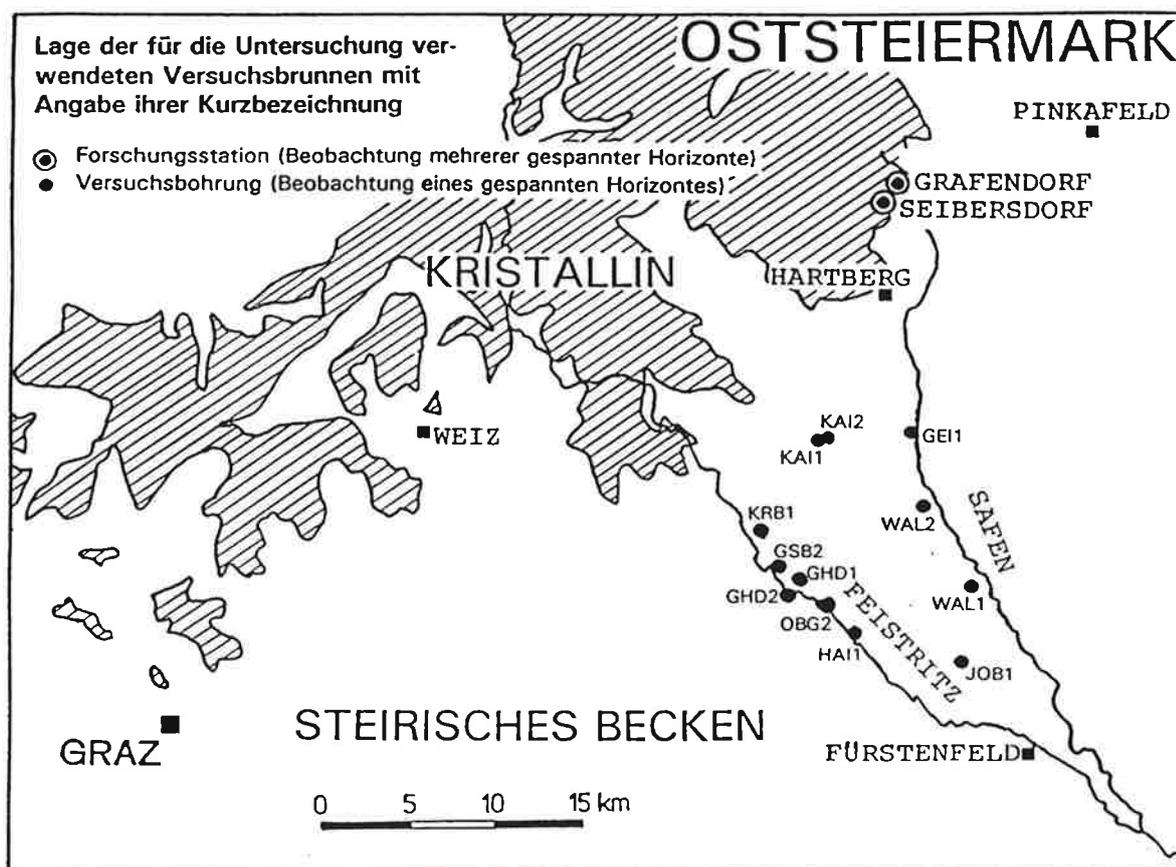


Abb.1.3: Lage der ausgewerteten Versuchsbohrungen im Untersuchungsgebiet.

Tab.1.1: Meßstellen von tertiären gespannten Grundwasserleitern, an denen Ganglinien der Druckspiegelhöhe aufgezeichnet worden sind.

Meßstelle	Kurzbezeichnung	Beobachtungszeitraum	Anzahl der Beobachtungsjahre	nächstgelegene Niederschlagsstation
Grafendorf 1	GF1	1974 - 1980	7	Kirchberg a. W.
Grafendorf 3	GF3	1973 - 1980, 1982	9	Kirchberg a. W.
Grafendorf 4	GF4	1974 - 1980	7	Kirchberg a. W.
Seibersdorf 1	SB1	1971 - 1980	10	Kirchberg a. W.
Seibersdorf 2	SB2	1971 - 1980	10	Kirchberg a. W.
Seibersdorf 3	SB3	1971 - 1980	10	Kirchberg a. W.
Buch Geiseldorf 1	GEI1	1980 - 1990	11	Waltersdorf
GHD Sonde 1	GHS1	1989 - 1991	3	Herberstein
Hainersdorf 1	HA11	1989 - 1991	3	Großwilfersdorf
Jobst 1	JOB1	1978 - 1983 1990 - 1991	8	Großwilfersdorf
Kaindorf 1	KAI1	1983 - 1989	7	Waltersdorf
Kaindorf 2	KAI2	1983 - 1989	7	Waltersdorf
Kroisbach 1	KRB1	1981 - 1991	11	Herberstein
Obgrün V2 Rath	OBG2	1989 - 1991	3	Herberstein
Waltersdorf Süd	WAL1	1988 - 1990	3	Waltersdorf
Waltersdorf Nord	WAL2	1989 - 1990	2	Waltersdorf
Feistritz-Pegel	FEI1	1989 - 1991	3	Herberstein

Das Referat für wasserwirtschaftliche Planung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung ließ diese Bohrungen erstellen, um sie zuerst einige Jahre zu beobachten und um sie dann bei entsprechender Eignung für die kommunale Trinkwasserversorgung der jeweiligen Gemeinde zu übergeben. Die meisten Grundwassermeßstellen wurden vom Referat für wasserwirtschaftliche Planung eingerichtet und über Jahre hinweg regelmäßig betreut. Einige Grundwassermeßstellen wurden erst für die vorliegende Untersuchung eingerichtet. Der schraffierte Teil des Feistritztales in Abb.1.3 kennzeichnet jenes Gebiet, in dem im Zuge dieser

Untersuchung auch der seichtliegende quartäre Grundwasserleiter mitbeobachtet worden ist. Die hier errichtete seichte Grundwasserbohrung, die zur Durchflußmessung in Drainagegräben eingebauten Meßwehre und die Maßstäbe zur Bestimmung der Wasserstände in drei mit dem quartären Grundwasserleiter in Verbindung stehenden Teichen werden in Kap.4 dargestellt und näher beschrieben.

Die Forschungsstationen Grafendorf und Seibersdorf besitzen je drei stark artesische Horizonte. Um hier kontinuierliche Ganglinien der Druckspiegelhöhe zu erhalten, erfolgte die Meßwerterfassung mittels Quecksilberreduktion und pneumatischer Druckübertragung auf einen Schreiber, der die Schwankungen der artesischen Druckhöhen im Maßstab 1:2 aufzeichnete. Da diese Meßeinrichtungen zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits seit Jahren stillgelegt waren, wurde am Horizont 3 der Forschungsstation Grafendorf wieder eine dieser damals verwendeten Meßeinrichtungen installiert, um Vergleichswerte für das Jahr 1990 zu erhalten und um die Genauigkeit und die Eigenschaften der früher erfaßten Meßwerte erkennen zu können. Zwischen Mai 1989 und Dezember 1991 erfolgte durch das Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie der Technischen Universität Graz und durch das Referat für wasserwirtschaftliche Planung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung eine gemeinsam durchgeführte, aufeinander abgestimmte, regelmäßige Betreuung und Wartung der Meßeinrichtungen und eine regelmäßige Durchführung von Kontrollmessungen. Diese Arbeiten wurden grundsätzlich 14-tägig durchgeführt, bei Bedarf auch in wesentlich kürzeren Intervallen. Die in diesem Zeitraum erhobenen Meßwerte bieten zusammen mit den zuvor langjährig aufgezeichneten Ganglinien der Druckspiegelhöhe die Möglichkeit umfassender hydraulischer Auswertungen und eine Analyse der im Feistritz- und Safental vorliegenden Grundwassersysteme, ihrer Funktion und ihrer Erneuerung.

1.4 Ziele der Untersuchung

Aufbauend auf die Hydrogeologie gespannter Porengrundwasserleiter sollen die wesentlichen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zu den Ressourcen gespannter Grundwasserleiter des Feistritz- und Safentales mit hydraulischen und hydrologischen Methoden behandelt werden. Zuerst sollen die hydraulischen Unterschiede zwischen gespannten und ungespannten Grundwasserleitern erarbeitet werden. Hierbei werden besondere Eigenschaften gespannter Grundwasserleiter, wie zum Beispiel ihre Elastizität, die eine als "Luftdruckwirksamkeit" zu bezeichnende Beeinflussung des Druckspiegels durch den Luftdruck bedingt, beachtet. Weiters

können aus der Hydrologie gespannter Grundwassersysteme Aussagen getroffen werden, indem das hydrologische System mit Einspeisungsbereich, Grundwasserleiter und Aussickerungsbereich als Ganzes gesehen wird, und nicht nur der gespannte Grundwasserleiter als Teil einer geologischen Schichtabfolge. Zentral stellen sich die Fragen nach den gespannten Grundwassersystemen, nach ihrem Wasserhaushalt und ihrer Funktion und damit nach den für eine wasserwirtschaftliche Nutzung langfristig zur Verfügung stehenden Ressourcen gespannter Grundwasserleiter. Die bereits für ungespannte Grundwässer angewandten statistischen Methoden der Ganglinienanalyse sollen bei gespannten Grundwässern entsprechend modifiziert angewandt werden.

Durch Meßdatenauswertung und insbesondere durch Vergleich von Grundwasserganglinien mit Niederschlagsdaten soll das zugrunde liegende hydraulische System untersucht und näher beschrieben werden. Aufbauend auf den vorliegenden Meßdaten des verdichteten Meßnetzes im mittleren Feistritztal und auf hydrogeologische Untersuchungsergebnisse kann dieses Gebiet zweidimensional modelliert werden. Letztendlich werden die Ergebnisse der Untersuchung für eine Verwendung als Planungsgrundlage aufbereitet. Die Beurteilung der Ergiebigkeit von Grundwasservorkommen soll durch eine kombinierte Analyse der Ganglinien der Druckspiegelhöhen und durch Überlauf- bzw. Pumpversuchsauswertungen erfolgen. Dies ermöglicht, zusammen mit der Erkenntnis des zugrundeliegenden Grundwassersystems, eine optimale und sichere langfristige Bewirtschaftung dieser Grundwasservorkommen.

2. Hydrologische und hydraulische Grundlagen und Darstellung der aufgezeichneten Druckspiegelganlinien

2.1 Gespannte Grundwassersysteme

Für eine umfassende Untersuchung gespannter Grundwasserressourcen reicht es nicht aus, nur die Zuströmung, die notwendige technische Ausführung und die Leistungsfähigkeit eines Bohrbrunnens als Teil eines Grundwasserleiters näher zu untersuchen und zu beschreiben. Die Untersuchung des Vorkommens und der Nutzungsmöglichkeiten gespannter Grundwässer muß vielmehr in einer gesamtheitlichen Betrachtung erfolgen, die sich auf den Begriff "Grundwassersystem" stützt. Bei einem gespannten Grundwassersystem können drei Bereiche unterschieden werden: der Einspeisungsbereich (Infiltrationsbereich), die Grundwasserströmung im gespannten Grundwasserleiter und der Ausflußbereich (künstliche Entnahme oder natürliche Aussickerung). Im Gegensatz zum ungespannten Grundwasserleiter ist die Grundwassererneuerung lokal auf einen bestimmten Randbereich beschränkt.

Für ein gespanntes Grundwassersystem gilt folgende hydrologische Wasserhaushaltsgleichung:

$$R = U \pm S_G = E + A \pm S_G \quad (2.1)$$

R Grundwassererneuerung (Zufluß zum Grundwasserleiter)

U Durchfluß im Grundwasserleiter

S_G Inhaltsänderung des Grundwasserspeichers

E künstliche Entnahmemenge

A natürliche Aussickerung (Abfluß aus dem Grundwasserleiter)

Über einen genügend langen Zeitraum betrachtet und ohne Änderung einer Grundwasserentnahme ist der Abfluß aus einem Grundwassersystem gleich seinem Zufluß.

$$R = U = E + A \quad (2.2)$$

In Abb.2.1 ist ein gespanntes Grundwassersystem schematisch dargestellt.

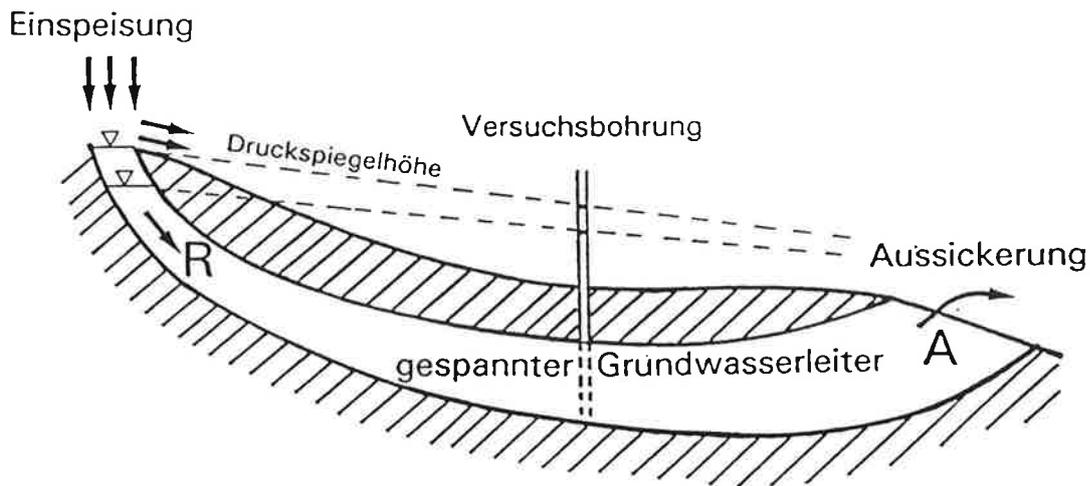


Abb.2.1: Elemente eines gespannten Grundwassersystems.

Gemäß den Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung eines gespannten Grundwassersystems können Grundwassersysteme danach unterschieden werden, ob sie Teil des hydrologischen Wasserkreislaufes sind oder als Grundwasserspeicherstätte verstanden werden müssen (BERGMANN, 1980). Falls bei einem Grundwassersystem keine Grundwassererneuerung erfolgt, ist bei einer künstlichen Entnahme oder einer natürlichen Aussickerung kein stationärer Zustand des Grundwassersystems möglich. In diesem Fall kann von einer Grundwasserspeicherstätte (Lagerstätte) gesprochen werden, die durch eine Entnahme bzw. eine natürliche Aussickerung kontinuierlich abgebaut wird.

ENGELEN et al. (1986) unterscheiden analog dazu Grundwassersysteme nach ihrer Dynamik und ihrer Form. Bei einer Grundwasserspeicherstätte ist das System "statisch". Falls eine Grundwasserströmung im gespannten Grundwasserleiter auftritt ($U \neq 0$), wird von einem "dynamischen" System gesprochen. Weiters kann nach ENGELEN et al. (1986) hinsichtlich der Form eines Grundwassersystems nach einem stationären Zustand und einem instationären Zustand unterschieden werden. Ein stationärer oder quasistationärer Zustand bedeutet, daß sich das Grundwassersystem im Gleichgewicht befindet. Ein instationärer Zustand bedeutet, daß sich die Form ständig ändert, was beispielsweise beim Abbau der Grundwasservorräte der Fall ist. Ein Grundwassersystem befindet sich in einem quasistationären Zustand, falls eine Pulsation erfolgt, d.h. falls sich die Einspeisungswas-

sermenge zwar zeitlich ändert, jedoch auf längere Zeit gemittelt die Einspeisungswassermenge der Summe der Ausflußmengen entspricht.

Wenn die künstliche Entnahme aus einem gespannten Grundwasserleiter erhöht wird, sickert das Wasser aus der nächsten Umgebung des Speichers mit zunehmender Ausbildung eines Absenkungstrichters nach. Der Absenkungstrichter dehnt sich von der Entnahmestelle ausgehend immer weiter aus. Theoretisch gibt es zwei Möglichkeiten dafür, daß die Ausbreitung zum Stillstand kommt. Falls der Absenkungstrichter ein Gebiet erreicht, aus dem Wasser aus dem Grundwasserleiter abfließt (Aussickerungsbereich), dann nimmt die natürliche Abflußmenge ab. Wenn die Verringerung des natürlichen Abflusses gleich der Entnahmesteigerung ist, kommt die Ausbreitung des Absenkungstrichters zum Stillstand und es herrscht ein neues Gleichgewicht. Ebenso entsteht ein neues Gleichgewicht des Grundwassersystems, falls sich der Absenkungstrichter bis zum Einspeisungsbereich hin ausdehnt und dort durch Absenkung der Druckspiegelhöhe am Rand des gespannten Grundwasserleiters unter natürlichen Bedingungen mehr Infiltrationswasser verfügbar ist, als der Grundwasserleiter bisher aufnehmen konnte (überschüssiger Zu- strom). Falls bei einer erhöhten Grundwasserentnahme durch die beschriebenen Vorgänge kein stationärer Zustand erreicht werden kann, kommt es zu einem Abbau der Grundwasserspeicherstätte bis zum völligen Aufbrauchen der vorhandenen Grundwasserressourcen.

Aus der Beschreibung der Arten von Grundwassersystemen und ihrer Eigenschaften kann gefolgert werden, daß zuerst die Dynamik der Grundwassersysteme zu untersuchen ist. Dies bedeutet, daß überprüft werden muß, ob ein Grundwassersystem ständig eingespeist wird. Hierauf muß überprüft werden, inwieweit der Aussickerungsbereich die Aussickerung bzw. der Einspeisungsbereich die Einspeisung kontrolliert und damit einen quasi-stationären Gleichgewichtszustand auch bei verschieden hoher Entnahme bewahrt. Zur Untersuchung der Möglichkeiten der Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes bei gespannten Grundwassersystemen muß der hydrogeologische Aufbau des Gebietes berücksichtigt werden.

Das untersuchte Gebiet muß gemäß der hydrogeologischen und geologischen Beschreibung (Kap. 1) und insbesondere aufgrund der Beckenlage vor dem Abfall des kristallinen Grundgebirges und durch Vergleich mit ähnlichen gespannten Grundwassersystemen, die ebenfalls indirekt eingespeist werden (FETH, 1964), dem hydrogeologischen Typ eines einem Gebirge vorgelagerten Beckens (mountain front basin) zugeordnet werden. Dieser Typ wird von WILSON et al. (1980) dargestellt und näher beschrieben.

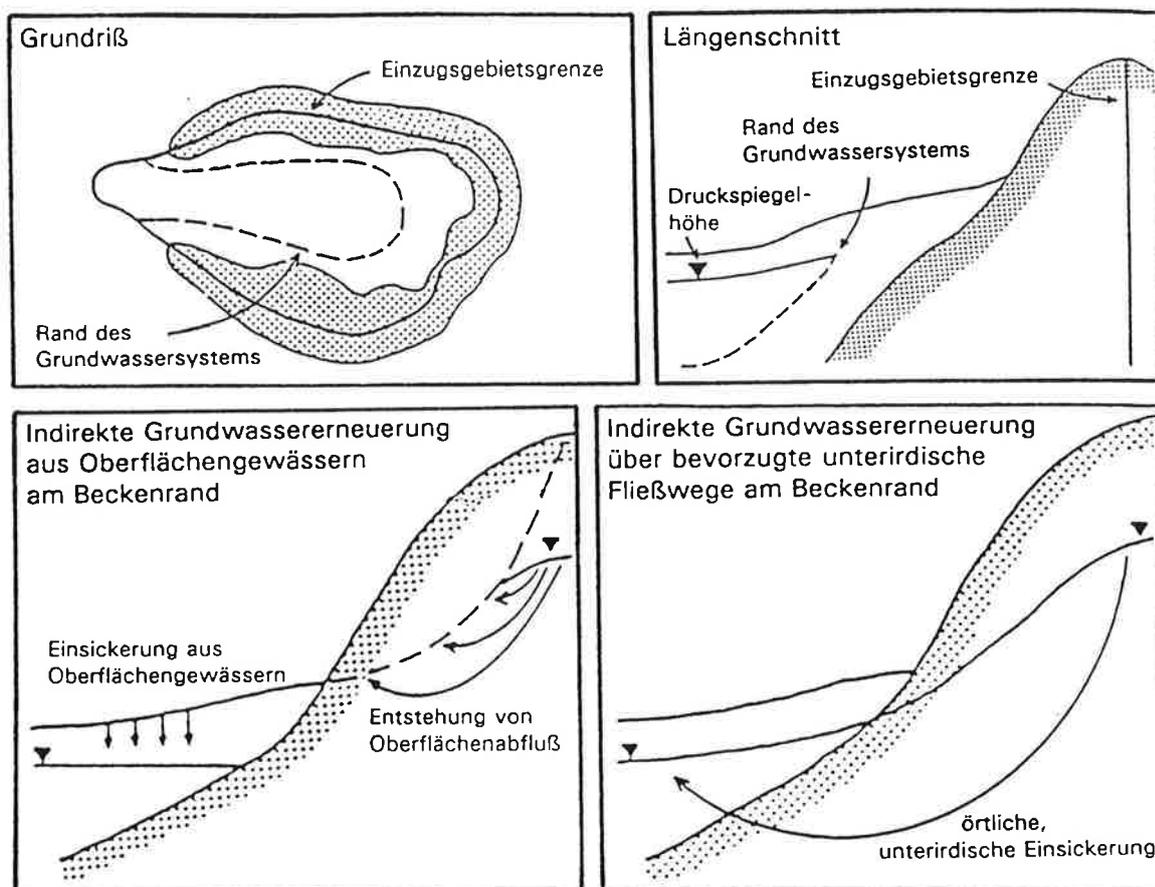


Abb.2.2: Grundwassererneuerung bei einem Becken, das einem Gebirge vorgelagert ist und von dort indirekt eingespeist wird (nach WILSON et al., 1980).

WILSON et al. (1980) beschreiben die Grundwassererneuerung in den Vorgebirgsbecken im Südwesten der USA. Obwohl man sich hierbei nur mit aluvialen, seichtliegenden Becken befaßt, können die Grundprinzipien der Grundwassererneuerung auf das hier untersuchte Gebiet übertragen werden. Die Erneuerung gespannter Grundwassersysteme wird durch die Durchlässigkeit und Geländeneigung am Beckenrand bestimmt. Eine flächige direkte Infiltration in gespannte Grundwassersysteme (direkte Grundwassererneuerung) ist aufgrund des herrschenden Druckniveaus nicht möglich. Bei durchlässigen Zonen, insbesondere bei zusammenhängenden, bevorzugten unterirdischen Fließwegen am Beckenrand tritt eine unmittelbare, indirekte Einspeisung von Niederschlagswasser in den Grundwasserleiter auf. Bei steileren Hanglagen und undurchlässigerer Bodenoberfläche am Beckenrand kommt es verstärkt zur raschen Abflußbildung in Oberflächenwässern und damit zu einer indirekten Einspeisung erst im Bereich einer Bach- oder Fluß-

strecke im Randbereich des Beckens. Bei dem hydrogeologischen Typ eines einem Gebirge vorgelagerten Beckens besteht ein entsprechend großer Höhenunterschied zwischen Einspeisungsbereich und Aussickerungsbereich, der auch die Druckhöhe im gespannten Grundwasserleiter bewirkt. Im Aussickerungsbereich wird die Druckspiegelhöhe durch eine vertikale Durchsickerung mehrerer darüberliegender Schichten abgebaut. Eine Absenkung der Druckspiegelhöhe im gespannten Grundwasserleiter aufgrund einer verstärkten Entnahme wirkt sich damit nur unwesentlich auf die Aussickerungsmenge aus. Die Absenkung der Druckspiegelhöhe hat jedoch einen größeren Einfluß auf den Einspeisungsbereich und die dort vorliegende Druckspiegelhöhe. Daraus kann geschlossen werden, daß ein quasistationärer Gleichgewichtszustand bei gespannten Grundwassersystemen durch den Einspeisungsbereich gesteuert wird. Aufgrund der zeitlich variablen Einspeisung (Pulsation) kann nur ein quasistationärer und kein stationärer Gleichgewichtszustand bei Grundwassersystemen mit einer Aussickerungsmenge bzw. mit einer künstlichen Entnahme vorliegen. Die äußeren Vorgänge im Einspeisungsbereich können durch hydraulische Randbedingungen (Kap.2.2) näher untersucht und beschrieben werden.

Bei instationären dynamischen Systemen ändert sich die Form des Systems aufgrund von Heterogenitäten des Grundwasserleiters, einer oftmals unsymmetrischen Ausbildung bzw. Ausbreitung der Quellen- und Senkengeometrien und aufgrund von Durchflußänderungen. Bei stationären dynamischen Grundwassersystemen ist die Neubildung die wichtigste Größe bei der Betrachtung eines Grundwassersystems. Für eine langfristig geplante wasserwirtschaftliche Nutzung der Grundwasserressourcen spielt die Analyse der Grundwassererneuerung gegenüber der Untersuchung der natürlichen Aussickerung eine wesentlich bedeutendere Rolle. Die Neubildung ist nicht nur wesentlich für das Bestehen eines Gleichgewichtszustandes, sondern auch bestimmend für die Erhaltung der Grundwasserqualität, da sich die Form eines Grundwassersystems bei stark gesteigerter Entnahme und damit bei deutlicher Überschreitung der Neubildungsrate so stark verändern kann, daß es zur Zuströmung qualitativ minderwertiger Wässer aus neugebildeten Einzugsgebieten kommen kann. Die Einspeisungswassermenge weist aufgrund des Niederschlages eine größere zeitliche Variabilität auf. Der Frage der Grundwassererneuerung kann damit über eine Analyse der Niederschlagsabhängigkeit gemessener Grundwasserdruckspiegelganglinien gespannter Grundwasserleiter nachgegangen werden (Kap.3). Davor müssen die hydraulischen Gleichungen der Grundwasserströmung zusammengestellt und die hydraulischen Randbedingungen gespannter Grundwassersysteme beschrieben werden.

2.2 Gleichungen der Grundwasserströmung und hydraulische Randbedingungen

Beim Ansatz hydraulischer Gleichungen für die Grundwasserströmung wird immer von einem aus verschiedenen Komponenten (Porengerüst, Poren und Wasser) aufgebauten Kontinuum ausgegangen. Der Kontinuitätsansatz ergibt sich aus einer makroskopischen Betrachtungsweise des Grundwasserleiters. Die Flüssigkeitsbewegung wird in der Hydraulik mit Hilfe von zwei Grundgleichungen beschrieben: Der Bewegungsgleichung und der Kontinuitätsgleichung. Daraus kann eine lineare partielle Differentialgleichung aufgestellt werden. Aus dem darin enthaltenen Speicherglied können besondere Eigenschaften gespannter Grundwasserleiter, wie Luftdruckwirksamkeit und Gezeitenwirksamkeit, abgeleitet werden.

Als Bewegungsgleichung wird das Gesetz von DARCY verwendet. DARCY (1856) stellte empirisch fest, daß bei laminarer Grundwasserströmung die Filtergeschwindigkeit v_f proportional dem Druckhöhengefälle (Standrohrspiegelgefälle) $\Delta h/\Delta l$ ist.

$$v_f = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [m/s] \quad (\text{Gesetz von Darcy}) \quad (2.3)$$

Der Grundwasserdurchfluß Q durch ein poröses Medium ist damit proportional dem Druckhöhenverlust und indirekt proportional der Länge der Fließstrecke l .

$$Q = k_f \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{l} \cdot A \quad [m^3/s] \quad (2.4)$$

k_f Durchlässigkeit [m/s]

A durchströmte Fläche [m²]

Die Druckhöhe h ist die an einer Stelle des gespannten Grundwasserleiters gemessene Standrohrspiegelhöhe.

Gemäß der Annahme nach DUPUIT (1863) kann bei allgemeinen Strömungsverhältnissen aufgrund des kleinen Grundwasserspiegelgefälles eine hydrostatische Druckverteilung im Grundwasserleiter angenommen werden. Damit ist die Druckhöhe $h(x,y)$ nur eine zweidimensionale Variable.

Die zweite Grundgleichung, die Gleichung von der Erhaltung der Masse, wird an einem Volumselement angesetzt. Die Differenz zwischen Zufluß zum und Abfluß vom Volumselement muß gleich der Wasserspeicherung im Volumselement sein:

$$\left(\frac{\partial(\rho \cdot v_{f,x})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_{f,y})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_{f,z})}{\partial z} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \quad (2.5)$$

$$\text{div}(\rho \cdot v_f) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = \frac{\partial(n\rho \cdot \Delta z)}{\partial t} \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

Abfluß minus Zufluß = Speicherung

Während die Speicherung von Wasser im Porenraum des Volumenelementes bei ungespannten Grundwasserleitern einfach durch Ansteigen des Grundwasserspiegels und dadurch für die Speicherung zusätzlich verfügbarem Porenraum erklärt werden kann, ist bei gespannten Grundwasserleitern der gesamte Porenraum von Wasser erfüllt. Eine Speicherung von zusätzlichem Wasser kann damit nur durch Kompression einerseits des Grundwasserleiters und andererseits des Porengerüsts erfolgen. Hierfür müssen die Kräfteverhältnisse im Grundwasserleiter betrachtet werden.

TERZAGHI (1925) prägte den Begriff der Bodenmechanik "effektiver oder wirksamer Bodendruck". Um den effektiven Druck auf das Korngerüst zu erhalten, muß der Porenwasserdruck vom gesamten als Auflast wirkenden Druck, der sich aus einem statischen Gleichgewichtsansatz ergibt, abgezogen werden.

$$\sigma_K = \sigma + p_L - p \quad [N/m^2] \quad (2.6)$$

- σ_K effektiver Druck auf das Korngerüst [N/m^2]
- σ gesamter Druck aufgrund der Auflast [N/m^2]
- p_L Luftdruck als Auflast [N/m^2]
- p hydrostatischer Porenwasserdruck [N/m^2]

Die Kräfte im gespannten Grundwasserleiter stammen damit einerseits vom Gewicht der den Grundwasserleiter überlagernden Schichten und andererseits vom herrschenden Luftdruck. Diese Kräfte werden zum einen Teil vom Porenwasser und zum anderen Teil vom Korngerüst aufgenommen und nach unten abgetragen. Wird eine konstante Auflast, d.h. ein konstanter Luftdruck und ein konstantes Gewicht der überlagernden Schichten angenommen, so kann aus Gl.2.6 abgeleitet werden, daß eine Abnahme des Porenwasserdrucks, zum Beispiel durch eine Entnahme von Grundwasser, zu einem Anstieg des effektiven Drucks auf das Korngerüst des Grundwasserleiters führt. Dies wiederum führt zu einer Kompression des Grund-

wasserleiters in Abhängigkeit von der sogenannten "Elastizität" des Aquifers. Die Menge des bei einer bestimmten Druckabnahme freiwerdenden Wassers wird also einerseits von der Reduktion des Porenraumes und andererseits durch die Ausdehnung des Porenwassers bestimmt. Das in Gl.2.5 auf der rechten Seite stehende Speicherglied ist somit vom Kompressionskoeffizienten α des Porengerüstes des gespannten Grundwasserleiters und vom Kompressionskoeffizienten β des Wassers abhängig.

Der Kompressionskoeffizient α des Korngerüstes wird als relative Volumsänderung des Volumselementes in Abhängigkeit von einer Änderung des effektiven Drucks auf das Korngerüst α_K definiert. Der Kompressionskoeffizient α des Korngerüstes entspricht damit dem Reziprokwert von dessen Elastizitätsmodul und beträgt zum Beispiel bei einem aus Schotter aufgebauten Grundwasserleiter etwa 10^{-8} bis $10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

Der Kompressionskoeffizient β des Wassers wird definiert als relatives Verhältnis der Volumsänderung des Porenwasservolumens zu einer Änderung des Porenwasserdrucks im Grundwasserleiter. Der Kompressionskoeffizient β des Wassers ist damit gleich dem Reziprokwert von dessen Elastizitätsmodul und beträgt etwa $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

Gegenüber dem Kompressionskoeffizienten α des Korngerüstes und dem Kompressionskoeffizienten β des Wassers ist die Kompressibilität der einzelnen Körner des Grundwasserleiters mit einem Kompressionskoeffizient von etwa $2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ vernachlässigbar gering. Es kann somit von einer Inkompessibilität der einzelnen Körner ausgegangen werden.

Das Speicherglied in Gl.2.5 kann nunmehr in folgender Weise durch die Kompressionskoeffizienten des Wassers und des Porengerüstes dargestellt werden:

$$\frac{\partial(n\rho \cdot \Delta z)}{\partial t} = \rho \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \cdot (\alpha + n \cdot \beta) \quad (2.7)$$

Gl.2.7 kann durch Definition eines spezifischen Speicherkoeffizienten S_o vereinfacht werden:

$$S_o = \rho \cdot g \cdot (\alpha + n\beta) \quad [1/m] \quad (2.8)$$

Der spezifische Speicherkoeffizient S_o gibt an, wie viele Kubikmeter Wasser pro Kubikmeter porösem Medium (Grundwasserleiter) bei einer Erhöhung der Druckspiegelhöhe um einen Meter gespeichert werden können. Der spezifische Speicherkoeffizient S_o beschreibt die hydraulischen Vorgänge im Grundwasserleiter bei instationärer Beanspruchung. Der Aufbau des Speicherkoeffizienten aus den Kompressionskoeffizienten α und β ist eine wesentliche Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

Unter Verwendung der Gleichungen 2.3, 2.7 und 2.8 und durch Ansatz der Beziehung zwischen Porenwasserdruck und Druckspiegelhöhe $p = \rho \cdot g \cdot h$ erhält man die der Grundwasserströmung zugrundeliegende partielle Differentialgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{f,x} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{f,y} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{f,z} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_o \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.9)$$

Für einen Grundwasserleiter mit horizontaler, zweidimensionaler Strömung kann Gleichung 2.9 über z integriert und damit vereinfacht werden. Die vertikal gemittelte Durchlässigkeit k_f multipliziert mit der Mächtigkeit m des gespannten Grundwasserleiters wird als Transmissivität T bezeichnet.

$$T = k_f \cdot m \quad [m^2/s] \quad (2.10)$$

Bei Integration über z ergibt sich aus dem spezifischen Speicherkoeffizient S_o der Speicherkoeffizient S .

$$S = \int_0^m S_o \cdot dz \quad [-] \quad (2.11)$$

Der Speicherkoeffizient S gibt an, wie viele Kubikmeter Wasser pro Quadratmeter Bodenfläche bei einer Erhöhung der Druckspiegelhöhe um einen Meter gespeichert werden können.

Damit ergibt sich die partielle Differentialgleichung der horizontalen, zweidimensionalen Grundwasserströmung:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.12)$$

Diese Gleichung ermöglicht hydraulische Berechnungen der Grundwasserströmung und ist insbesondere die Grundgleichung für die numerische Modellierung des gespannten Grundwasserleiters (Kap.5).

Im folgenden müssen die hydraulischen Randbedingungen gespannter Grundwassersysteme beschrieben werden, um damit Überlegungen zur hydraulischen Funktion von Grundwassersystemen bei zeitlich variabler Einspeisung und sich ändernder Entnahme anstellen zu können.

Hydraulische Randbedingungen können gleichgesetzt werden mit dem Mechanismus, der die Grundwasserströmung hydraulisch kontrolliert. Randbedingungen müssen in allen Fällen festgelegt werden, in denen es nicht zulässig ist, näherungsweise von den Grundwasserleitern mit unendlicher Ausdehnung auszugehen. Grundwassersysteme besitzen aufgrund der Existenz von Einspeisungs- und Auslaufzonen (Abb.2.1) in jedem Fall eine endliche Ausdehnung.

Nach CASTANI und MARGAT (1977) kann man alle möglichen, im Einspeisungs- oder Auslaufbereich auftretenden Randvorgaben ausschließlich auf die beiden Randbedingungstypen nach DIRICHLET und NEUMANN zurückführen. Sie verweisen darauf, daß im Einspeisungsbereich gespannter Grundwasserleiter linienförmig bzw. flächig ausgebildete Ränder entweder mit vorgegebener Spiegelhöhe oder mit vorgegebenem Randzufluß vorliegen können. Diese beiden, die hydraulische Funktion eines gespannten Grundwassersystems vorgebenden Randannahmen werden auch von DE MARSILY (1986) unterschieden.

Bei der DIRICHLET-Randbedingung wird eine entlang des Randes variable Druckspiegelhöhe vorgegeben, die von der Strömung im Grundwasserleiter unabhängig ist.

Bei der NEUMANN-Randbedingung ist ein entlang des Randes variabler Zufluß ebenfalls durch äußere Bedingungen vorgegeben. Dies entspricht bei bekannter Transmissivität T am Rand der Vorgabe des normal zum Rand auftretenden Druckspiegelgefälles im Randbereich.

In Abbildung 2.3 sind die Randbedingungen nach DIRICHLET und NEUMANN dargestellt.

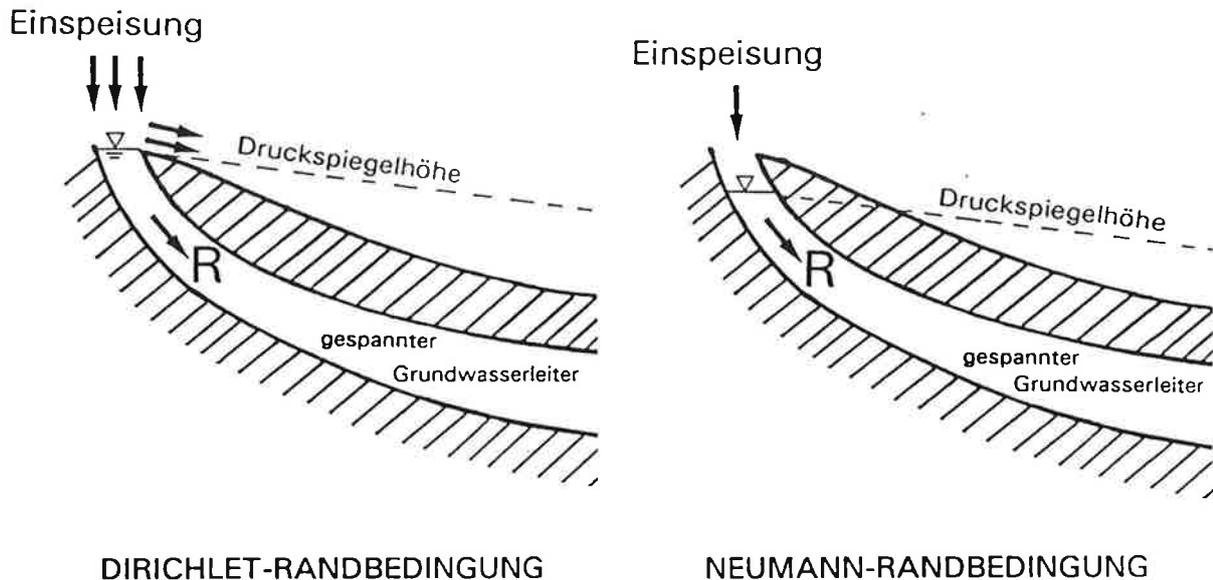


Abb.2.3: DIRICHLET- und NEUMANN-Randbedingung im Einspeisungsbereich eines gespannten Grundwassersystems.

Für die Beschreibung und Bestimmung der natürlichen Grundwassererneuerung gespannter Grundwassersysteme ist besonders die Betrachtung der Randbedingungen im Einspeisungsbereich von Bedeutung.

Für eine systematische Betrachtung eines gespannten Grundwassersystems kann nach DE MARSILY (1986) eine Analogie zwischen einem gespannten Grundwasserleiter und einem U-förmigen Durchlässigkeitsmesser (Permeameter) angenommen werden. Diese Analogie wird den weiteren Betrachtungen der Wirkung möglicher Randbedingungen auf die Funktion eines gespannten Grundwassersystems bei einer Einspeisung zugrundegelegt.

Der hydraulisch wirksame Rand von gespannten Grundwassersystemen wird in einer solchen Höhe definiert, daß überschüssiges, über diesen Rand hinaus rückgestautes Wasser seitlich abfließen kann.

Bei einer DIRICHLET-Randbedingung ist die Niederschlagsrate höher als die Ein-

speisungsrate, und somit entsteht eine gesättigte Zone im Einspeisungsbereich, die bis in eine Höhe zurückreicht, wo ein seitlicher Abfluß mit freiem Wasserspiegel möglich ist. Damit ergibt sich hier ein konstant gehaltener Wasserspiegel, und Druckspiegelschwankungen im gespannten Grundwasserleiter können nur dann auftreten, wenn sich die Höhe dieses Wasserspiegels ändert, jedoch nicht durch die Einspeisung selbst.

Bei einer NEUMANN-Randbedingung ist die Niederschlagsrate geringer als die maximal mögliche Einspeisungsrate. Der Zufluß ist somit gleich der Einspeisungsrate aus dem Niederschlag, die die Druckspiegelschwankungen im gespannten Grundwasserleiter hervorruft. Eine reine DIRICHLET-Randbedingung kann praktisch nicht vorkommen, da ein konstanter Wasserspiegel in Trockenzeiten kaum vorstellbar ist. In Trockenzeiten sinkt der gesättigte Grundwasserspiegel in jedem Fall etwas ab, was dazu führt, daß bei einer neuerlichen Feuchtperiode der Wasserspiegel zunächst ansteigt, bis es dann zu einem seitlichen Abfluß und damit zu einem am Rand vorgegebenen Wasserspiegel kommt. Dieser Randbedingungstyp soll im folgenden "Mischtyp der DIRICHLET-Randbedingung" genannt werden. Das System reagiert bei längeren Niederschlagsperioden und höheren Niederschlagsintensitäten überwiegend gemäß der Funktion einer DIRICHLET-Randbedingung, in der Anfangsphase einer Niederschlagsperiode und bei Niederschlagsintensitäten, die kleiner sind, als die Erneuerungskapazität, jedoch gemäß der Funktion einer NEUMANN-Randbedingung. Bei Starkregen liegt damit eine DIRICHLET-Randbedingung vor, weshalb in diesem Fall keine den hohen Niederschlagsintensitäten entsprechenden Druckspiegelschwankungen im gespannten Grundwasserleiter hervorgerufen werden können.

Außer den äußeren Randbedingungstypen muß im Randbereich des gespannten Grundwasserleiters, also zwischen unmittelbarem Einspeisungsbereich und dem Grundwasserleiter selbst, unterschieden werden, ob eine ungesättigte Zone bzw. eine Zone mit mehreren undurchlässigen Abschnitten vorliegt, oder nicht. Falls die Einspeisungswassermenge geringer ist als die Wassermenge, die bei durchgehend gesättigtem Einspeisungsbereich abströmen könnte, wird ein ungesättigter Zwischenbereich ausgebildet, der zu einer hydraulischen Abkopplung des gespannten Grundwasserleiters vom Einspeisungsbereich führt. Dies kann im unmittelbaren Einspeisungsbereich sowohl für den Fall einer Mischtyp-DIRICHLET-Randbedingung, als auch für den Fall einer NEUMANN-Randbedingung auftreten. Klassifiziert nach dem Einspeisungsbereich ergeben sich daher vier unterschiedliche hydraulische Grundwassersystemtypen, die in Abb.2.4 dargestellt sind.

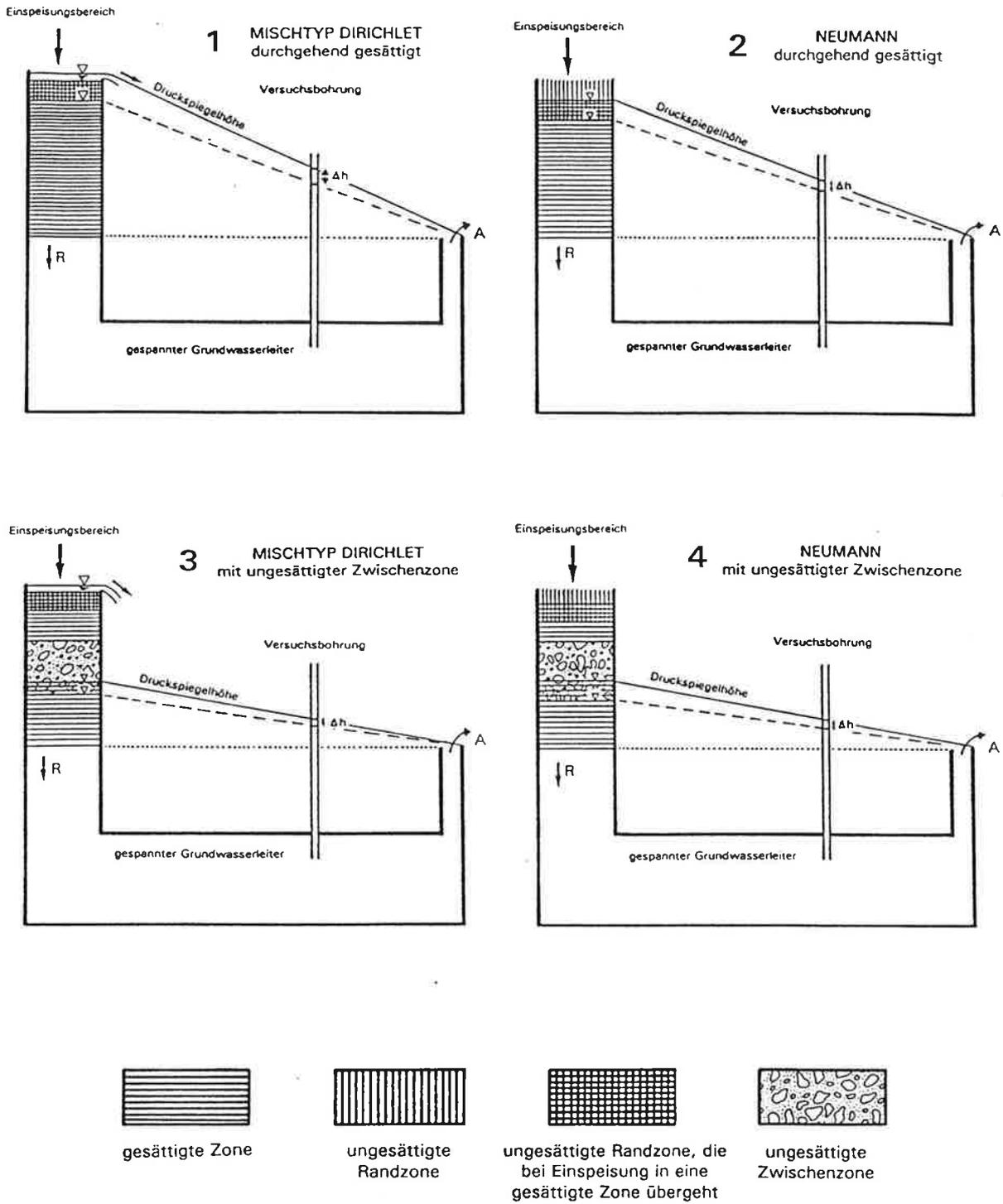


Abb.2.4: Grundtypen gespannter Grundwassersysteme, klassifiziert nach dem Einspeisungsbereich.

Ausschließlich beim ersten Typ, also bei Vorliegen einer Mischtyp-DIRICHLET-Randbedingung und bei durchgehend gesättigtem Einspeisungsbereich hat eine zunehmende Entnahme und eine damit verbundene stärkere Druckspiegelabsenkung im gespannten Grundwasserleiter eine Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate zur Folge. In diesem Fall folgt die Einspeisung den Gesetzen der Potentialströmung und ist damit ausschließlich vom Druckniveau im gespannten Grundwasserleiter abhängig. Bei steigender Entnahme steigt damit die Einspeisung so stark an, bzw. bei sinkender Entnahme nimmt sie so stark ab, daß in beiden Fällen ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht wird und damit die Wasserhaushaltsbilanz des Grundwassersystems ausgeglichen bleibt. Falls nach einer Änderung der Einspeisung bzw. der Entnahme das Grundwassersystem wieder in einen stationären Zustand übergeht, kann damit von einer hydraulischen "Steuerung" des Grundwassersystems im Einspeisungsbereich gesprochen werden. Aufgrund dieser Steuerung herrschen beim Typ 1 stabile, stationäre Verhältnisse des Grundwassersystems vor.

Nur in Ausnahmefällen könnte es vorübergehend vorkommen, daß bei Typ 2, 3 oder 4 die natürliche Einspeisung gleich groß ist wie die Summe aus natürlicher Aussickerung und Entnahme. Ist die natürliche Aussickerung größer oder kleiner, herrschen in beiden Fällen instationäre Verhältnisse. Bei zu starker Grundwasserentnahme kommt es zur Ausbildung einer ungesättigten Zone entweder unmittelbar am Rand (Typ 2) oder zwischen Rand und gespanntem Grundwasserleiter (Typ 3). Damit beginnt ein instationärer Abbauprozess der Grundwasservorräte, der zu einem weiteren Druckabfall und damit zur Ausbildung weiterer ungesättigter Zonen (z.B. Typ 4 als Folgezustand von Typ 2) führt. Da die Druckausbreitung in einem gesättigten Bereich wesentlich rascher abläuft als die Durchsickerung einer ungesättigten Zone, kommt es beim Übergang vom Typ 1 zu einem der anderen Typen zu einer deutlichen Erhöhung der Einspeisungszeit t_E . Typ 1 als einzig möglicher stationärer Anfangszustand eines gespannten Grundwassersystems unterscheidet sich von den anderen Typen durch eher geringe Druckspiegelschwankungen im gespannten Grundwasserleiter. In Feuchtwetterperioden wird die Druckspiegelhöhe durch die relativ konstante Druckhöhe im Einspeisungsbereich kontrolliert. Bei steigender Entnahme aus einem im Gleichgewicht befindlichen Grundwassersystem erhöht sich vorerst bei Typ 1 auch die Einspeisung, und zwar bis zur maximal möglichen Einspeisungswassermenge, die der Summe aus natürlicher Aussickerung und maximaler Dauerentnahme entspricht. Bei einer darüber hinausgehenden Entnahme kommt es zur Ausbildung instationärer Zustände gemäß den Typen 2, 3 oder 4. Es muß nochmals (vgl. Kap.2.1) darauf hingewiesen werden, daß die

maximal zulässige Entnahmemenge nicht in jedem Fall dem Wert der möglichen Dauerentnahme entsprechen muß. Die Bestimmung der möglichen Dauerentnahme und der Funktion des Grundwassersystems ist jedoch deshalb von Bedeutung, weil eine darüberhinausgehende, über einen bestimmten Zeitraum hinweg erfolgende Entnahme den gespannten Grundwasserleiter als "Lagerstätte" nutzt und zu einem allmählichen Ressourcenabbau führt.

Da der Typ einer reinen DIRICHLET-Randbedingung ausgeschlossen werden kann, kann ein Fehlen von Schwankungen der Druckspiegelhöhe nur damit erklärt werden, daß kein Einspeisungsbereich vorliegt und damit keine oder nur eine vernachlässigbar geringe Grundwassererneuerung stattfindet. Dies tritt auf, falls zwischen Einspeisungsbereich und zentralem Grundwasserleiter eine oder mehrere undurchlässige oder nur sehr gering durchlässige Zonen vorhanden sind.

Die vier unterschiedlichen Randbedingungstypen sind zusammen mit ihren Merkmalen in Tab.2.1 zusammengestellt.

Tab.2.1: Klassifikation gespannter Grundwassersysteme aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen im Einspeisungsbereich.

Typ	1	2	3	4
Randbedingung	Mischtyp DIRICHLET	NEUMANN	Mischtyp DIRICHLET	NEUMANN
Einspeisungsbereich	durchgehend gesättigt	durchgehend gesättigt	ungesättigt	ungesättigt
Wirkung einer stärkeren Entnahme auf die Grundwasserneubildung	Einspeisungserhöhung	keine Einspeisungserhöhung	keine Einspeisungserhöhung	keine Einspeisungserhöhung
hydraulische "Steuerung" des Grundwassersystems	im Einspeisungsbereich	keine hydraulische "Steuerung"	keine hydraulische "Steuerung"	keine hydraulische "Steuerung"
Zustand bei deutlich tiefer liegendem Ausickerungsbereich	stationär	instationär	instationär	instationär
Schwankungen der Druckspiegelhöhe	eher gering	stärker	stärker	stärker
Einspeisungszeitdauer t_e verglichen mit Typ 1	-----	größer	größer	größer
Folgezustände bei stärkerer Entnahme	Anfangszustand	möglicher Folgezustand von Typ 1	möglicher Folgezustand von Typ 1	möglicher Folgezustand von Typ 2

Bei Überlegungen zu den Randbedingungen muß auch auf die natürliche Aussickerung Bedacht genommen werden. Fehlt diese, so kann das Grundwassersystem nach BERNHART (1972) als "Tasche" bezeichnet werden. Falls auch keine künstliche Entnahme erfolgt, kann in diesem Fall bei Vorliegen einer Einspeisungszone nur der Typ 1 gegeben sein. Bei einem gespannten Grundwassersystem, das in einem Becken liegt, welches einem Gebirge vorgelagert ist (Kap.2.1), liegt der Aussickerungsbereich wesentlich tiefer als der Einspeisungsbereich und bei der Aussickerung werden an durchlässigen Schwachstellen der Deckschichte des gespannten Grundwasserleiters die großen Druckspiegelhöhen abgebaut. Bei einer verstärkten Entnahme sinkt zwar das Druckniveau im gesamten gespannten Grundwasserleiter, im Aussickerungsbereich kommt es aber dadurch nur zu einer geringfügigen Verminderung der Aussickerung, da die Änderung der Druckspiegelhöhe verglichen mit dem großen Potentialunterschied im Aussickerungsbereich gering ist. Der Aussickerungsbereich reagiert damit auf eine Druckspiegelhöhenänderung des gespannten Grundwasserleiters aufgrund einer verstärkten Entnahme wesentlich weniger stark als der Einspeisungsbereich. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, daß keine hydraulische "Steuerung" des gespannten Grundwassersystems durch den Aussickerungsbereich erfolgt.

Nachdem nunmehr die Funktion gespannter Grundwassersysteme untersucht, mehrere Typen von Grundwassersystemen unterschieden und die Möglichkeit eines bestehenden Gleichgewichtszustandes eines Grundwassersystems überprüft worden ist, sollen im folgenden Meßdaten gespannter Grundwasserleiter systematisch ausgewertet und analysiert werden.

2.3 Gangliniendarstellung

Grundwasserdruckspiegelganglinien der Meßstellen des Feistritz- und Safentaler liegen auf Monatsschreibstreifen aufgezeichnet vor (vgl. Kap.1.3). Erstes Ziel war es, diese Ganglinien übersichtlich in Form von Jahresganglinien zusammen mit den meteorologischen Größen Luftdruck und Niederschlag darzustellen und für weitere Auswertungen EDV-mäßig aufzubereiten. Auf den Schreibstreifen sind die Werte der zum Zeitpunkt des Streifenwechsels monatlich vorgenommenen Kontrollmessung eingetragen. Beim Wechsel der Schreibstreifen wird das Abstichmaß gemessen, aus dem die Druckspiegelhöhe bestimmt werden kann. Weiters wird zugleich der Zeitpunkt dieser Kontrollmessung auf dem Schreibstreifen eingetragen. Die Druckspiegelhöhenganglinie muß nun hinsichtlich ihres zeitlichen und höhenmäßi-

gen Verlaufes an diese Kontrollmessungen angepaßt werden. Hiefür wurde eine systematische Digitalisierung der Monatsschreibstreifen mit einem speziell dafür erstellten EDV-Programm vorgenommen. Die Monatsschreibstreifen werden im Zuge der Digitalisierung auf das Digitalisieretablett gelegt. Die Anfangs- und Endpunkte der Ganglinien werden koordinatenmäßig aufgenommen und die zugehörigen Werte der Kontrollmessungen eingegeben. Hierauf wird die Ganglinie mit der Lupe des Digitalisieretabletts systematisch abgetastet, wobei täglich etwa 3 bis 10 Punkte der Ganglinie koordinatenmäßig aufgenommen werden. Um Ungenauigkeiten des Uhrwerks des Grundwasserpegels auszugleichen, müssen die Ganglinien durch eine automatisch durchgeführte zeitliche Streckung an die Kontrollmessungen angepaßt werden. Differenzen zwischen den bei den Kontrollmessungen bestimmten Abstichmaßen und den Anfangs- und Endpunkten der Ganglinien werden so ausgeglichen, daß die Druckspiegelhöhenganglinien entsprechend diesen Abweichungen gedreht werden. Damit ergibt sich beim Zusammensetzen der einzelnen Monatsganglinien zu einer Jahresganglinie ein stufenloser Verlauf der Druckspiegelhöhenganglinie. Zeiträume mit Datenausfällen werden durch Einfügen von Nullwerten festgehalten.

Zur Bestimmung der analysierten Jahresganglinien war eine Auswertung von mehreren hundert Monatsschreibstreifen erforderlich. Dies wurde daher systematisch und vom Programmablauf her weitestgehend automatisiert durchgeführt. Um grobe Fehler im Zuge der Digitalisierung und Datenaufbereitung zu vermeiden, sind in das Digitalisierprogramm mehrere Kontrollrechnungen eingebaut. So werden zum Beispiel die Werte der Kontrollmessung am Anfang und am Ende einer Ganglinie jeweils beidseitig eingegeben. Die Kontrollmessung am Ende einer Monatsganglinie muß mit der am Beginn des darauffolgenden Monats eingetragenen Kontrollmessung übereinstimmen, da beim Wechsel der Schreibstreifen ja nur eine Kontrollmessung erfolgt ist. Da die Schreibstreifen beim Meßvorgang auf einer Rolle montiert sind, liegen auf den meisten Monatsschreibstreifen zwei Kurven vor. Falls der Schreibstreifen längere Zeit auf der Rolle belassen wurde, können auch mehrere Linien aufgezeichnet sein. Alle diese Fälle werden automatisch vom Digitalisierprogramm berücksichtigt. Das Ausmaß der vom Programm automatisch vorgenommenen zeitlichen Dehnung und höhenmäßigen Anpassung der digitalisierten Ganglinie an die Werte der Kontrollmessungen wird am Bildschirm angegeben, damit der Bearbeiter die automatisch vorgenommenen Korrekturen kontrollieren und auf Plausibilität überprüfen kann.

Das Ergebnis dieser Digitalisierung sind Jahresfiles der Druckspiegelhöhe mit mehreren Punkten pro Tag. Bei Vorliegen größerer Schwankungen der Druck-

spiegelhöhe werden mehr Punkte pro Tag aufgezeichnet, bei einem eher geradlinigen Verlauf weniger Punkte. Eine Jahresganglinie besteht somit aus 1000 bis 2000 Werten der Druckspiegelhöhe. Um Tagesmittelwerte zu erhalten, werden diese Daten durch ein weiteres Programm nach der Trapezregel tagesweise gemittelt. Damit liegen nun Jahresfiles mit Tagesmittelwerten der Druckspiegelhöhe vor. Die Tagesmittelwerte der Grundwasserdaten werden auf Listen ausgedruckt. Um einen Vergleich der Druckspiegelhöhe mit dem Niederschlag und dem Luftdruck zu erreichen, werden die Ganglinien zusammen mit diesen meteorologischen Größen ausgeplottet. Dies wurde für alle Meßstellen nach Tab.1.1 durchgeführt. Als Niederschlagswerte werden die Tagesniederschläge der nächstgelegenen Niederschlagsstation verwendet. Als Luftdruckwerte werden die an der etwa 50 km entfernten Station Graz-Flughafen gemessenen Werte herangezogen. Wie von ÜBERWIMMER & BERGMANN (1992) festgestellt, können als Luftdruckmeßwerte auch Meßwerte entfernter gelegener Stationen verwendet werden, da im Zuge dieser Betrachtungen nur die Schwankungen des Luftdrucks von Interesse sind, jedoch nicht die absoluten Luftdruckmeßwerte. Die Tagesmittelwerte der Schwankungen des Luftdrucks sind jedoch auch über einige dutzend Kilometer hinweg gleich. Lufttemperaturwerte sind von geringerer Bedeutung für die Auswertung der Ganglinien der Druckspiegelhöhe. Mittels des zeitlichen Verlaufes der mittleren Tagstemperatur kann nur auf den Zeitpunkt der Schneeschmelze und damit zusammenhängende Anstiege der Druckspiegelhöhe rückgeschlossen werden. Diese meteorologische Größe wurde damit für die weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt. Um Fehler bei der für alle Meßstationen durchgeführten Datenaufbereitung bestmöglichst ausschließen zu können, wurden die Werte der Druckspiegelhöhe für alle Meßjahre an mehreren Tagen stichprobenartig kontrolliert. Bei dieser Kontrolle muß die zeitliche und höhenmäßige Angleichung der aufgezeichneten Ganglinien an die Werte der Kontrollmessungen berücksichtigt werden.

Die somit systematisch aufbereiteten und kontrollierten Meßwerte der Druckspiegelhöhe gespannter Grundwasserleiter des Feistritz- und Safentalles wurden in einem Datenband zusammengefaßt und auf Datendisketten abgespeichert. In dieser Weise wurden die verwendeten Meßdaten entsprechend dokumentiert und für eventuell weiterführende, zukünftige Untersuchungen entsprechend aufbereitet der wasserwirtschaftlichen Planung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt. In der beschriebenen Form können sie insbesondere auch für die im folgenden beschriebenen Untersuchungen verwendet werden. In Abb.2.5 ist als Beispiel eine Liste der Tagesmittelwerte der Druckspiegelhöhe der Station Buch Geiseldorf 1 dargestellt.

JAHRESUEBERSICHT

Tagesmittelwerte : Buch Geiseldorf 1
 Jahr: 1981
 Grundwasserdruckspiegelhoehen in m

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ
1	303.84	303.76	303.83	303.77	303.71	303.68	303.74	303.67	303.58	303.64	303.75	303.74
2	303.84	303.76	303.83	303.77	303.71	303.68	303.74	303.67	303.59	303.66	303.75	303.73
3	303.85	303.77	303.84	303.76	303.71	303.67	303.74	303.65	303.59	303.66	303.75	303.73
4	303.85	303.79	303.85	303.75	303.72	303.67	303.73	303.64	303.59	303.66	303.75	303.74
5	303.84	303.78	303.84	303.76	303.72	303.66	303.72	303.65	303.58	303.65	303.75	303.74
6	303.82	303.76	303.83	303.75	303.71	303.66	303.71	303.65	303.58	303.65	303.75	303.74
7	303.81	303.76	303.82	303.75	303.70	303.66	303.71	303.65	303.58	303.65	303.75	303.74
8	303.79	303.76	303.82	303.74	303.70	303.65	303.70	303.64	303.58	303.64	303.75	303.74
9	303.78	303.76	303.82	303.74	303.70	303.65	303.70	303.64	303.58	303.66	303.75	303.74
10	303.79	303.77	303.82	303.73	303.70	303.65	303.70	303.64	303.59	303.67	303.74	303.73
11	303.79	303.76	303.82	303.74	303.70	303.64	303.69	303.63	303.59	303.69	303.74	303.72
12	303.79	303.77	303.80	303.73	303.72	303.64	303.68	303.64	303.59	303.69	303.74	303.73
13	303.80	303.77	303.80	303.73	303.71	303.64	303.69	303.63	303.59	303.69	303.74	303.72
14	303.80	303.77	303.80	303.72	303.70	303.63	303.69	303.62	303.59	303.68	303.74	303.72
15	303.81	303.77	303.79	303.72	303.70	303.63	303.69	303.62	303.60	303.69	303.73	303.73
16	303.80	303.78	303.79	303.73	303.70	303.64	303.69	303.62	303.60	303.68	303.73	303.72
17	303.79	303.78	303.78	303.72	303.70	303.66	303.69	303.61	303.59	303.67	303.73	303.70
18	303.79	303.78	303.80	303.72	303.69	303.69	303.70	303.60	303.59	303.68	303.73	303.70
19	303.78	303.78	303.80	303.72	303.69	303.69	303.71	303.61	303.60	303.68	303.73	303.70
20	303.79	303.79	303.80	303.71	303.69	303.69	303.71	303.61	303.60	303.68	303.72	303.69
21	303.77	303.79	303.80	303.71	303.69	303.69	303.70	303.60	303.60	303.69	303.72	303.69
22	303.76	303.80	303.80	303.71	303.69	303.70	303.70	303.61	303.60	303.70	303.72	303.69
23	303.75	303.80	303.79	303.71	303.70	303.70	303.70	303.61	303.60	303.71	303.72	303.70
24	303.75	303.80	303.79	303.71	303.70	303.71	303.69	303.60	303.60	303.71	303.73	303.70
25	303.76	303.80	303.79	303.71	303.70	303.72	303.69	303.59	303.62	303.71	303.73	303.70
26	303.76	303.81	303.79	303.71	303.70	303.74	303.68	303.59	303.63	303.72	303.72	303.70
27	303.75	303.82	303.78	303.72	303.70	303.74	303.68	303.58	303.63	303.74	303.72	303.69
28	303.75	303.82	303.78	303.72	303.70	303.74	303.68	303.59	303.63	303.74	303.74	303.69
29	303.75		303.77	303.71	303.69	303.74	303.68	303.59	303.64	303.74	303.74	303.70
30	303.75		303.77	303.71	303.69	303.74	303.68	303.59	303.64	303.75	303.74	.00
31	303.75		303.77		303.68		303.67	303.59		303.75		.00

(c)1991 Institut f. Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie, TU Graz

Abb.2.5: Liste der Tagesmittelwerte der Druckspiegelhöhe der Station Buch Geiseldorf 1 des Jahres 1981.

In Abb.2.6 ist der zugehörige Plot der Tagesmittelwerte der Druckspiegelhöhe zusammen mit den meteorologischen Größen Niederschlag und Luftdruck dargestellt.

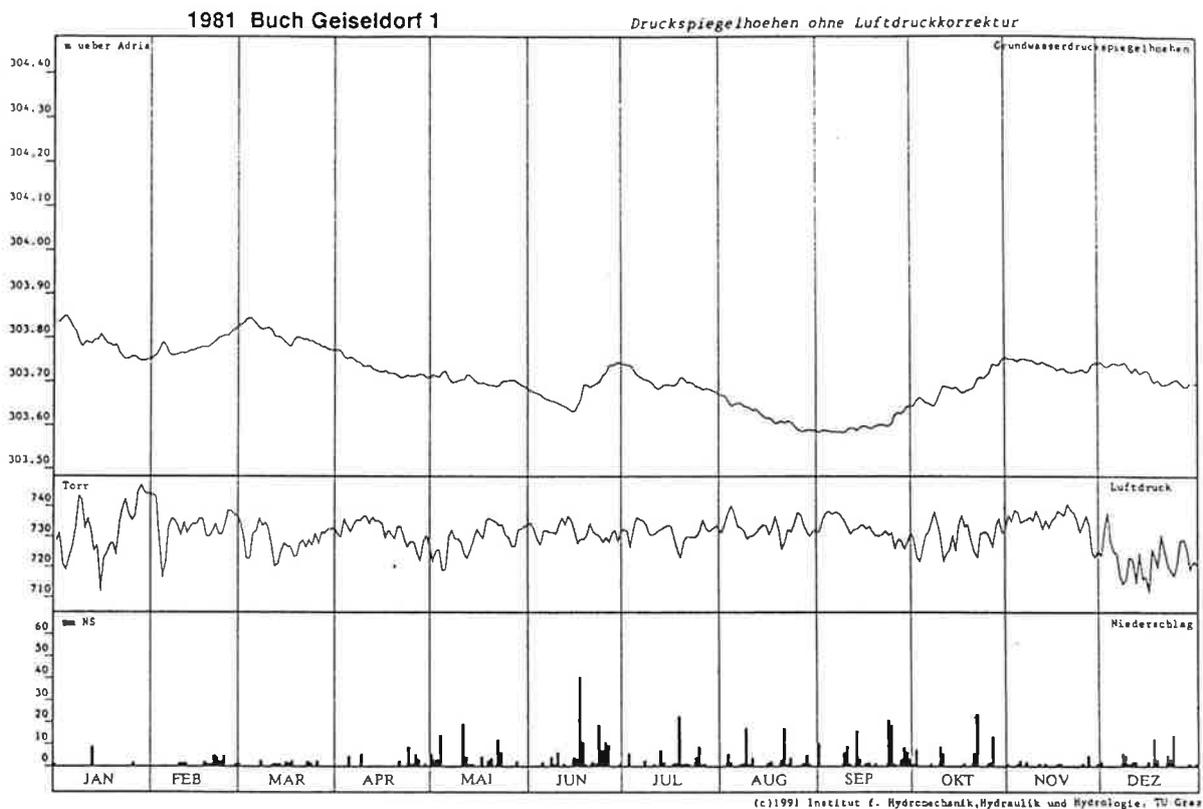


Abb.2.6: Plot der Station Buch Geiseldorf 1 des Jahres 1981.

2.4 Luftdruckwirksamkeit auf die Ganglinien der Druckspiegelhöhe

Gespannte Grundwasserleiter reagieren auf Schwankungen des Luftdrucks mit Schwankungen der Druckspiegelhöhe in Abhängigkeit ihrer Elastizität, wie JAKOB (1940) und FERRIS et al. (1962) feststellen. Dies kann aus Überlegungen zum Gleichgewicht in gespannten Grundwasserleitern erkannt werden. Ausgegangen wird von einem Kräftegleichgewicht (vgl. Abb.2.7), wobei die Last aus dem Luftdruck und dem Gewicht der Schichten über dem Grundwasserleiter zum einen Teil vom Korngerüst und zum anderen Teil vom gespannten Porengrundwasser nach unten abgetragen wird (vgl. Kap.2.2). Desgleichen wird die Erhöhung d des Luftdrucks zum einen Teil vom Korngerüst (e) und zum anderen Teil vom Porenwasser (f) aufgenommen. Auf den Wasserspiegel in einem Brunnenrohr wirkt jedoch die

gesamte Erhöhung d des Luftdrucks. Daraus ergibt sich der Luftdruckeinfluß auf die im Brunnenrohr gemessene Höhe der Druckspiegelganglinie, der somit von der Elastizität (Kompressionskoeffizient α) des Korngerüsts abhängt. Je konsolidierter Porengrundwasserleiter sind, desto mehr Last wird anteilmäßig vom Korngerüst aufgenommen, und desto größer sind die vom Luftdruck verursachten Wasserspiegelschwankungen im Brunnen. Derartige Schwankungen werden auch von Manometern an artesischen Bohrungen angezeigt, da diese nur die Differenz zwischen Innen- und Außendruck angeben.

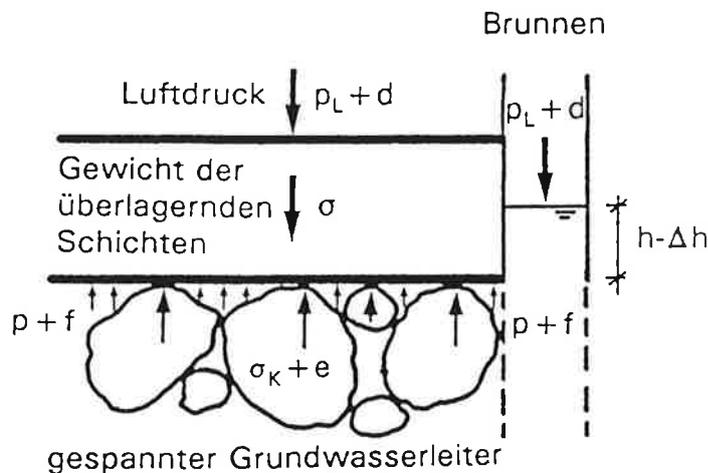


Abb.2.7: Gleichgewicht im gespannten Grundwasserleiter.

Als Maßzahl für die aufgrund von Luftdruckschwankungen auftretenden Schwankungen der Druckspiegelhöhe wird nach JAKOB (1940) die Luftdruckwirksamkeit BE (barometric efficiency) definiert.

$$BE = \frac{\text{Schwankungen der Druckspiegelhöhe [cm]}}{\text{Schwankungen des Luftdrucks [cm]}} = \frac{dh \cdot \rho \cdot g}{dp_L} \quad [-] \quad (2.13)$$

$$1,00 \text{ cm} \triangleq 0,735 \text{ Torr} \triangleq 0,981 \text{ mbar}$$

Da bei steigendem Luftdruck der Wasserspiegel im Brunnen absinkt (bzw. umgekehrt), würde der Wert der Luftdruckwirksamkeit genau genommen ein negatives Vorzeichen aufweisen. Der inverse Verlauf von Luftdruck und Wasserspiegel bzw. von Luftdruckganglinie und Grundwasserdruckspiegelganglinie wird im folgenden allerdings vorausgesetzt, und so wird - wie in der Literatur üblich - die Luftdruck-

wirksamkeit nur mit ihrem Absolutbetrag, also positiv, angegeben.

Zur Ermittlung der Luftdruckwirksamkeit aus aufgezeichneten Grundwasserdruckspiegelganglinien werden in der Literatur verschiedene Lösungsansätze vorgestellt. Aus Abb.2.6 erkennt man die starke Ähnlichkeit zwischen Grundwasserganglinie und der Ganglinie des Luftdrucks. Luftdruckschwankungen rufen gegensinnige Druckspiegelschwankungen hervor. Zur Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit eines Horizontes können zwei zum Teil subjektive Methoden angewendet werden. Einerseits kann aus einer Meßreihe eine größere Luftdruckänderung ausgewählt und mit der dazugehörigen Druckspiegeländerung verglichen werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, verschiedene Werte der Luftdruckwirksamkeit auszuwählen und die Druckspiegelganglinie mit jedem dieser Werte zu korrigieren. Der gesuchte Wert der Luftdruckwirksamkeit ist dann gefunden, wenn die Druckspiegelganglinie und die Luftdruckganglinie weder eine gleichsinnige, noch eine gegengleiche Ähnlichkeit aufweisen und damit die korrigierte Druckspiegelganglinie optimal geglättet erscheint (BERGMANN & ÜBERWIMMER, 1992).

Nach Überprüfung mehrerer in der Literatur vorgestellter Methoden zur Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit wurde als beste, objektive, computerunterstützte und genaueste Methode die von CLARK (1967) vorgestellte modifizierte Doppelsummenanalyse ausgewählt. Es handelt sich hierbei um ein statistisches Verfahren, bei dem mit hoher Genauigkeit die Luftdruckwirksamkeit eines gespannten Grundwasserhorizontes bestimmt werden kann. Hierzu wird in einem kartesischen Koordinatensystem auf der Abszisse die Summe der Luftdruckänderungen Δh_L (umgerechnet in eine äquivalente Wasserspiegelhöhe) und auf der Ordinate die Summe der Druckspiegeländerungen Δh aufgetragen. Falls die Druckspiegelschwankungen ausschließlich von den Luftdruckschwankungen abhängig wären und jeweils die Beträge der Änderungen aufgetragen würden, so ergäbe sich eine durch den Ursprung gehende Gerade, deren Steigung der Luftdruckwirksamkeit BE entspräche:

$$BE = \frac{\sum \Delta h}{\sum \Delta h_L} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.14)$$

Da jedoch die Druckspiegelganglinien verschiedene Einflüsse anderer Größen

beinhalten, wie einen Trend aufgrund einer vorübergehenden verstärkten oder verminderten Entnahme, oder Einflüsse einer vorübergehenden Einspeisung aus Niederschlägen bzw. Oberflächengewässern in Feuchtwetterperioden, müssen beim Auftragen der Druckspiegeländerungen auf der Ordinate besondere Vorzeichenregeln beachtet werden. Die Beachtung dieser Vorzeichenregeln sichert einen von Trends und sonstigen nichtsystematischen Störgrößen (z.B. Niederschlagseinfluß, Gezeiteneinfluß) unbeeinflussten Wert der Luftdruckwirksamkeit, wie CLARK (1967) zeigt. Die dadurch fallweise Notwendigkeit einer Subtraktion von Druckspiegeländerungen ergibt jedoch einen leicht gezackten Linienzug, an den die Gerade der Luftdruckwirksamkeit als Ausgleichsgerade angepaßt werden muß. Selbstverständlich muß auch bei dieser Methode darauf geachtet werden, daß keine unmittelbare, starke Beeinflussung durch Grundwasserentnahmen am Brunnen selbst bzw. bei Nachbarbrunnen vorliegt.

Zur Anwendung der Methode von CLARK (1967) muß für die Werte der Druckspiegelhöhe und des Luftdrucks ein Zeitintervall festgelegt werden. CLARK verwendet ein Zeitintervall von zwei Stunden, was folgende Probleme und Nachteile mit sich bringt: Auf Monatsschreibstreifen können zwar 2-Stunden-Werte abgelesen werden, es kann jedoch nicht von einer derart hohen zeitlichen Genauigkeit der Ganglinie der Druckspiegelhöhe ausgegangen werden. Wenn die zeitliche Auflösung der Druckspiegelmessungen mehr als ein Zeitintervall beträgt, versagt die oben angeführte Methode zur Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit. Aber selbst wenn es ein verbessertes Meßsystem mit garantierten 2-Stunden-Werten für einen langjährigen Routineeinsatz gäbe, könnte ein weiterer Nachteil eines so kurzen Zeitintervalls nicht ausgeschlossen werden. Luftdruckschwankungen besitzen nämlich eine Periode von 12 Stunden. Höchstwerte treten etwa um 10.00 Uhr und 22.00 Uhr auf, Tiefstwerte um 4.00 Uhr und 16.00 Uhr. Anziehungskräfte von Mond und Sonne, die Druckspiegelganglinien ebenfalls beeinflussen, wie im folgenden kurz behandelt wird, treten täglich um etwa 50 Minuten später, ebenfalls mit einer halbtägigen Periode auf, und diese Schwankungen sind damit 14 Tage in Phase mit den Luftdruckschwankungen und während der darauffolgenden 14 Tage gegen die Phase. Weiters besitzt ein eventuell auftretender Temperatureinfluß auf die Meßeinrichtungen eine Periode von einem Tag. Da außerdem Luftdruckmessungen in der Regel nicht unmittelbar am Ort der einzelnen Grundwassermeßstellen erfolgen, sondern die relativen Luftdruckschwankungen von einer mehrere Kilometer entfernt liegenden Luftdruckmeßstation übertragen werden müssen, liegen im allgemeinen auch keine gültigen Luftdruckmeßwerte im 2-Stunden-Intervall vor.

Bei der vorliegenden Untersuchung wird aus diesen Gründen generell ein Zeitintervall von einem Tag gewählt. Somit werden für die Berechnung der Luftdruckwirksamkeit die Tagesmittelwerte der Druckspiegelhöhe verwendet. Für den Luftdruck werden ebenfalls Tagesmittelwerte der Berechnung zugrundegelegt. Diese Tagesmittelwerte wurden bereits in Abb.2.5 aufgelistet und in Abb.2.6 dargestellt. Diese Vorgangsweise stellt bei optimaler Nutzung der in den Grundwasserganglinien enthaltenen Information die Ausschaltung aller regelmäßigen Störeinflüsse mit Periodenlängen von einem halben oder einem Tag sicher. In Abb.2.8 ist eine modifizierte Doppelsummenanalyse dargestellt.

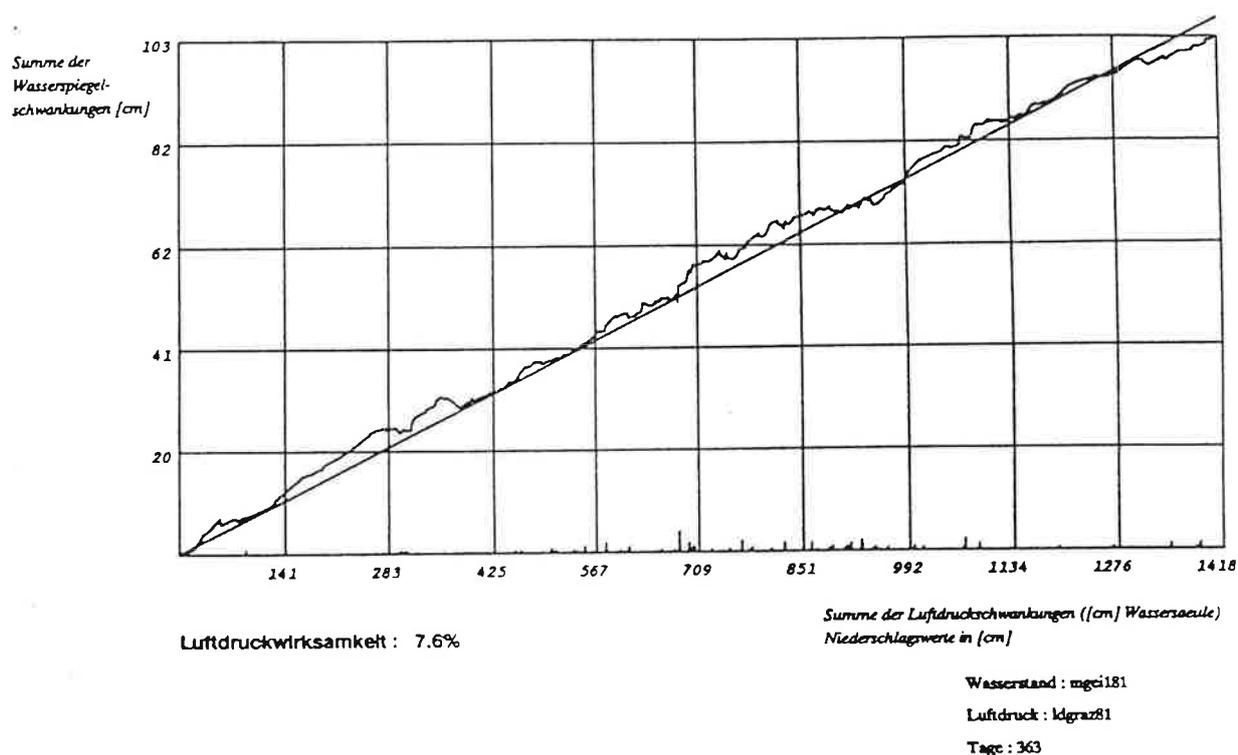


Abb.2.8: Modifizierte Doppelsummenanalyse für die in Abb.2.6 dargestellte Druckspiegelganglinie zur computerunterstützten Berechnung der Luftdruckwirksamkeit (Station Buch Geiseldorf 1, 1981).

Die berechneten Werte der Luftdruckwirksamkeit ermöglichen eine prozentuell richtige Korrektur des Luftdruckeinflusses auf die gemessenen Ganglinien. Die luftdruckkorrigierte Ganglinie des Jahres 1981 der Station Buch Geiseldorf 1 ist zusammen mit der Ganglinie des Luftdrucks und den Tagesniederschlägen in Abb.2.9 dargestellt.

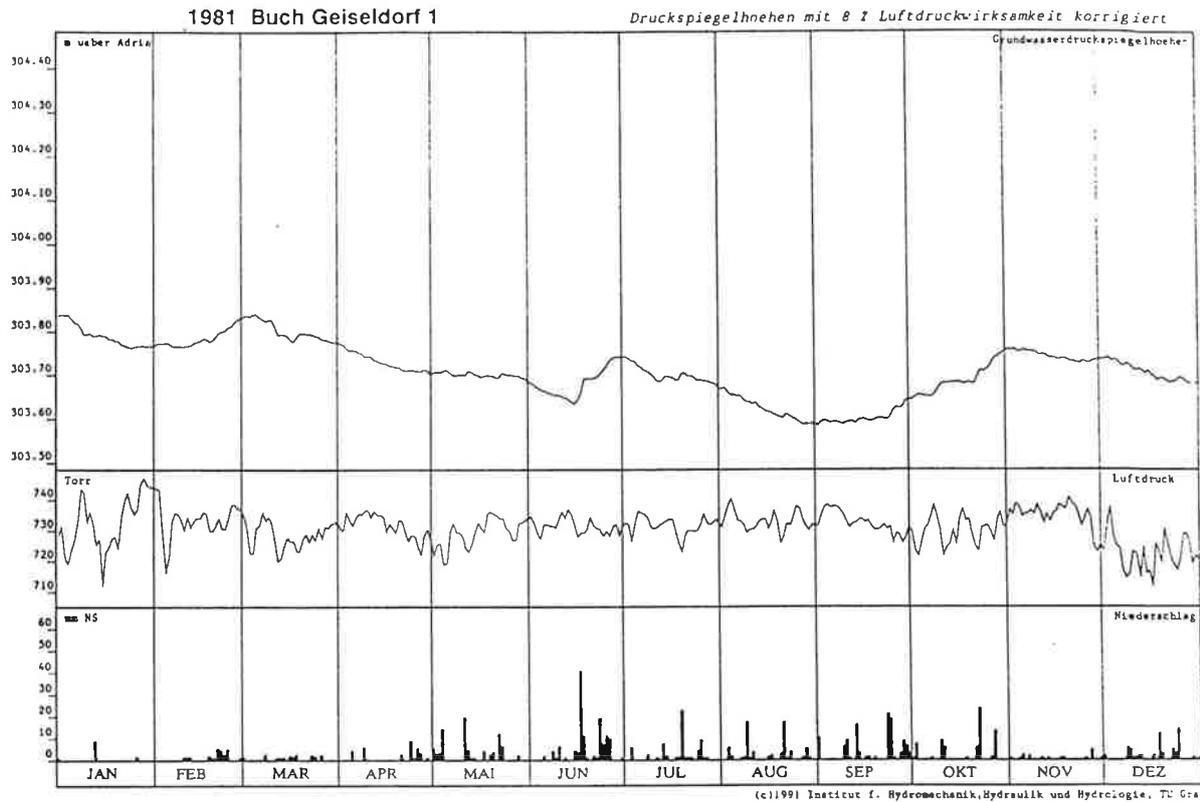


Abb.2.9: Druckspiegelganglinien aus Abb.2.6, korrigiert mit der mittleren Luftdruckwirksamkeit (Station Buch Geiseldorf 1, 1981).

Hiebei ist zu beachten, daß sich für denselben Horizont für verschiedene Jahre geringfügig unterschiedliche Luftdruckwirksamkeiten ergeben können. Für die Luftdruckkorrektur wird für alle Jahre ein Mittelwert der Luftdruckwirksamkeit herangezogen, der unter Beachtung aller vorliegenden Meßjahre und unter allfälliger Bewertung der Güte der gemessenen Ganglinien verschiedener Jahre (Zeiträume von Ausfällen, Genauigkeit des Uhrwerks, etc.) bestimmt wird. Die korrigierten Druckspiegelganglinien müssen auf einen Normalwert des Luftdrucks bezogen werden. Für die vorliegenden Ganglinien wird unter Beachtung der Höhenlage der Meßstationen ein Normalwert des Luftdrucks von 730 Torr zugrundegelegt. Eine Luftdruckkorrektur von Ganglinien gespannter Grundwasserleiter ist - wie von BERGMANN & ÜBERWIMMER (1992) beschrieben - vor allem aus folgendem Grund erforderlich: Die Tagesmittelwerte der Druckspiegelhöhen gespannter Grundwasserleiter werden vom Tagesmittelwert des Luftdrucks deutlich beeinflusst. Das

Außerachtlassen des Luftdruckeinflusses führt nicht nur zu einer größeren Ungenauigkeit bei einer Analyse der Grundwassererneuerung, sondern auch zu einem systematischen Fehler, da es eine meteorologisch bedingte Abhängigkeit zwischen Luftdruck und Niederschlag gibt. Schon vor Auftreten eines Niederschlages und damit vor einer möglichen indirekten Einspeisung in den gespannten Grundwasserleiter sinkt der Luftdruck ab und führt damit zu einem Anstieg der Druckspiegelhöhe im Brunnen. Dies täuscht eine nichterfolgte Einspeisung vor. Wenn hingegen am Ende einer Niederschlagsperiode bzw. unmittelbar danach eine Einspeisung und damit verbunden ein Anstieg des Druckspiegels im Brunnen erfolgt, steigt gleichzeitig der Luftdruck wieder an, was auf den Druckspiegel absenkend wirkt, wobei der Überlagerungseffekt dieser beiden Vorgänge das richtige Erkennen einer erfolgten Einspeisung verhindert. Auch bei Betrachtung der Druckspiegelhöhe in größeren Zeiträumen (z.B. Druckspiegeländerungen innerhalb von Monaten) können bei fehlender Luftdruckkorrektur Fehler im Zentimeter- bis Dezimeterbereich auftreten und völlig falsche instationäre Verhältnisse des Druckspiegels am Brunnen vortäuschen.

Darüber hinaus zeigt sich die besondere Bedeutung der Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit für die Untersuchung gespannter Grundwasserleiter darin, daß die Bestimmung eines bodenmechanischen und eines hydraulischen Kennwertes, und zwar des Kompressionskoeffizienten des Korngerüstes α und des spezifischen Speicherkoeffizienten S_0 , bei genauer Kenntnis der Luftdruckwirksamkeit durch Analyse der Druckspiegelmessungen möglich ist. Die Luftdruckwirksamkeit BE kann aus dem Gleichgewicht in einem gespannten Grundwasserleiter (Abb.2.7) und aus dessen Elastizität abgeleitet werden:

$$BE = \frac{-1}{1 + \frac{\alpha}{n \cdot \beta}} \quad [-] \quad (2.15)$$

Die Luftdruckwirksamkeit BE hängt damit vom Verhältnis der Kompressibilität α des Porengerüstes zur Kompressibilität β des Wassers und von der Porosität n des Grundwasserleiters ab. Die Kompressibilität von Wasser ohne Luftblaseneinschluß ist konstant ($\beta = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$). Die Werte für die Porosität n liegen für Porengrundwasserleiter in einem relativ engen Bereich, und zwar generell etwa zwischen

$n = 0,05$ und $n = 0,30$. Bei den untersuchten gespannten Grundwasserleitern in einer Tiefe zwischen 50 m und 250 m liegt die Porosität n zwischen 0,15 und 0,20. Damit steht die Luftdruckwirksamkeit BE in direkter Beziehung zum Kompressionskoeffizienten des Korngerüstes α (vgl. Tab.2.2).

Tab.2.2: Luftdruckwirksamkeit BE [%] in Abhängigkeit vom Kompressionskoeffizienten des Korngerüstes α [m^2/N] und von der Porosität n .

BE [%]	$n = 0,05$	0,10	0,15	0,20	0,30
$\alpha = 10^{-8} m^2/N$	0,2	0,5	0,7	1,0	1,5
$5 \cdot 10^{-9}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,9
$2 \cdot 10^{-9}$	1,2	2,4	3,6	4,8	7,0
10^{-9}	2,4	4,8	7,0	9,1	13
$5 \cdot 10^{-10}$	4,8	9,1	13	17	23
$2 \cdot 10^{-10}$	11	20	27	33	43
10^{-10}	20	33	43	50	60

Porengrundwasserleiter in größerer Tiefe weisen bei geologisch ähnlicher Entstehung generell eine höhere Konsolidierung und damit einen wesentlich kleineren Kompressionskoeffizienten des Korngerüstes auf. Die Porosität nimmt mit der Tiefe nur geringfügig ab. Somit kann im allgemeinen davon ausgegangen werden, daß die Luftdruckwirksamkeit mit der Tiefenlage des gespannten Grundwasserleiters deutlich zunimmt (Tiefenabhängigkeit der Luftdruckwirksamkeit). Dies wurde auch bei der Auswertung der Meßstellen im Feistritz- und Safental festgestellt (Tab.2.4).

Aufgrund der Tiefenabhängigkeit kann die Luftdruckwirksamkeit auch zur Zuordnung einzelner Meßstellen zu hydrogeologischen Horizonten verwendet werden. Bei einem Aufschluß verschiedener Horizonte mit einer einzigen Bohrung - was grundsätzlich vermieden werden sollte - ist es auch möglich, über die Luftdruckwirksamkeit den hydraulischen Einfluß verschiedener aufgeschlossener und durch die Bohrung verbundener Horizonte festzustellen. Bei der Bohrung Buch Geiseldorf 1 (Abb.1.3) kann damit erkannt werden, daß das Wasser des tieferliegenden, stärker gespannten Horizontes innerhalb der ersten zwei Jahre nach

Erstellung der Bohrung (in den Jahren 1980 und 1981) so stark in den seichteren, ebenfalls gespannten Horizont ausgeflossen ist, daß ab diesem Zeitpunkt der seichtliegende Horizont dominiert und die Luftdruckwirksamkeit von 8 % auf näherungsweise 0 % zurückgegangen ist. Eine Wasserentnahme aus diesem Brunnen würde eine fast ausschließliche Wasserentnahme aus dem seichteren gespannten Horizont bedeuten.

Da der Wert der Luftdruckwirksamkeit gespannter Grundwasserleiter vom Kompressionskoeffizienten des Korngerüstes α abhängt, steht die Luftdruckwirksamkeit auch in direkter Abhängigkeit zum spezifischen Speicherkoeffizienten S_o (Gl.2.8). Mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\beta = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ergibt sich:

$$S_o = 4,91 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot \frac{1}{BE} \quad [1/m] \quad (2.16)$$

Die Erdbeschleunigung g , die Dichte ρ und der Kompressionskoeffizient β des Wassers sind für gespanntes Wasser mit natürlicher Grundwassertemperatur konstant. Da die Porosität gespannter Grundwasserleiter nur geringfügig schwankt, ist der spezifische Speicherkoeffizient S_o indirekt proportional zur Luftdruckwirksamkeit BE . Die Luftdruckwirksamkeit ist somit ein wichtiger Kennwert für das Speichervermögen eines gespannten Grundwasserleiters.

Tab.2.3: Spezifischer Speicherkoeffizient S_o nach Gl.3.35 für Porositäten $n = 0,15$ und $n = 0,20$ in Abhängigkeit der Luftdruckwirksamkeit BE und der Porosität n .

S_o [10^{-6} m^{-1}]	$BE = 5 \%$	10%	15%	20%	25%
$n = 0,15$	15	7,4	4,9	3,7	2,9
$n = 0,20$	20	9,8	6,5	4,9	3,9

Mittels der oben durchgeführten Ableitungen für den Kompressionskoeffizienten α und den spezifischen Speicherkoeffizienten S_o können durch Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit BE diese Kennwerte für die untersuchten Meßstellen des Feistritz- und Safentalen in Tab.2.4 eingetragen werden.

Tab.2.4: Luftdruckwirksamkeit der Meßstellen des Feistritz- und Safentaales und daraus abgeleitet der Kompressionskoeffizient α als bodenmechanischer Kennwert und der spezifische Speicherkoeffizient S_0 als hydraulischer Kennwert.

Meßstelle	Kurzbezeichnung	mittlere Luftdruckwirksamkeit BE [%]	Kompressionskoeffizient α [m ² /N]	spezifischer Speicherkoeffizient S_0 [1/m]
Grafendorf 1	GF1	10	$9,0 \cdot 10^{-10}$	$9,8 \cdot 10^{-6}$
Grafendorf 3	GF3	18	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Grafendorf 4	GF4	17	$4,9 \cdot 10^{-10}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$
Seibersdorf 1	SB1	---	---	---
Seibersdorf 2	SB2	7	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Seibersdorf 3	SB3	13	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Buch Geiseldorf 1	GEI1	1980-81 : 8 1982 : 4 1983-90 : ---	$1,2 \cdot 10^{-9}$ --- ---	$1,2 \cdot 10^{-5}$ --- ---
GHD Sonde 1	GHS1	---	---	---
Hainersdorf 1	HAI1	6	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
Jobst 1	JOB1	8	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Kaindorf 1	KAI1	7	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Kaindorf 2	KAI2	18	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Kroisbach 1	KRB1	11	$8,1 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Obgrün V2 Rath	OBG2	---	---	---
Waltersdorf Süd	WAL1	7	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Waltersdorf Nord	WAL2	11	$8,1 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$
Feistritz-Pegel	FEI1	---	---	---

ROJSTACZER (1988) untersucht den zeitlichen Verlauf des Einflusses einer Änderung des Luftdrucks und unterteilt die Druckspiegelschwankungen in hoch-, mittel- und niederfrequente Schwankungen. Die hier erfolgte Auswertung der Druckspiegelschwankungen auf der Basis von Tagesmittelwerten berücksichtigt nur den

mittelfrequenten Bereich, bei dem sich ein vorübergehendes Gleichgewicht zwischen Porenwasserdruck und hydrostatischem Druck im Brunnen einstellt. Dieser vorübergehend stationäre Zustand wird nach ROJSTACZER (1988) ausschließlich von der Elastizität des gespannten Grundwasserleiters bestimmt. Der von ROJSTACZER (1988) und FURBISH (1991) festgestellte instationäre Druckausgleichsvorgang im hochfrequenten Bereich ist damit für die hier erfolgte Untersuchung mit Tagesmittelwerten ohne Bedeutung.

Für plötzlich wechselnde Auflasten auf den Grundwasserkörper, wie Gezeiteneinflüsse, Verkehrslasten (z.B. Eisenbahnzüge) und Erdbeben, kann in Analogie zur Luftdruckwirksamkeit nach JACOB (1940) eine sogenannte Gezeitenwirksamkeit TE (tidal efficiency) auf gespannte Grundwasserleiter festgestellt werden. Die Summe aus dem Betrag der Luftdruckwirksamkeit und der Gezeitenwirksamkeit besitzt den Wert 1:

$$BE + TE = 1 \quad [-] \quad (2.17)$$

Für Luftdruckwirksamkeiten zwischen 5% und 20%, wie sie für die untersuchten gespannten Grundwasserleiter mit einer Tiefenlage von 50 m bis 250 m auftreten, ergeben sich damit 4-fach bis 20-fach höhere Gezeitenwirksamkeiten. Die Gezeitenwirksamkeit TE beträgt bei diesen Grundwasserleitern zwischen 80% und 95%. Gegenüber der Luftdruckwirksamkeit ist die Gezeitenwirksamkeit allerdings trotz dieser hohen Prozentwerte im allgemeinen nur von geringer Bedeutung für die Ausbildung von Druckspiegelschwankungen in gespannten Grundwasserleitern, da die Gezeitenwirksamkeit TE zwar hoch, die damit multiplizierte Belastung des Grundwasserleiters jedoch für in größerer Entfernung von einem Meer gelegene Grundwasserleiter im Vergleich zur Belastung durch Luftdruckschwankungen gering ist. Kurzzeitig auftretende Belastungsänderungen, wie sie zum Beispiel aufgrund von Erdbeben entstehen, können mittels üblicher Grundwasserpegel nicht aufgezeichnet werden, da diese keine zeitliche Auflösung der Druckspiegelhöhe in Minuten- oder Sekundenintervalle zulassen.

3. Druckspiegelganglinien als Indikatoren der Grundwasserneubildung

3.1 Druckwellenausbreitung

Natürlich auftretende Schwankungen von Druckspiegelganglinien gespannter Grundwasserleiter werden nicht nur durch Luftdruck, Gezeiten und seismische Einflüsse hervorgerufen, sondern sind insbesondere auch Zeichen einer am Rand des gespannten Grundwasserleiters erfolgten Einspeisung. Nach vorhergegangener Luftdruckkorrektur der Druckspiegelganglinien können die Schwankungen der Tagesmittelwerte als Folgeerscheinung einer indirekten Einspeisung erkannt und analysiert werden. Auswertemethoden für Spiegelschwankungen ungespannter Grundwasserleiter sind bei gespannten Grundwasserleitern nicht in gleicher Weise anwendbar. Aufgrund der großen Speicherfähigkeit ungespannter Grundwasserleiter wird die Einspeisungswelle stark gedämpft. Die Untersuchung von Spiegelschwankungen ungespannter Grundwasserleiter erfolgt damit häufig in Monatsintervallen. Bei gespannten Grundwasserleitern erfolgen Druckspiegelanstiege in einigen Kilometern Entfernung jedoch innerhalb eines oder mehrerer Tage, weshalb deutlich kleinere Zeitintervalle gewählt werden müssen. Die raschere Ausbreitung und geringere Dämpfung der Einspeisungswelle bedingt allerdings eine bessere Kenntnis der Auswirkung des Verlaufes einer Einspeisung auf den Verlauf der Druckspiegelganglinie und eine gute Unterscheidbarkeit des Einflusses verschiedener Niederschlagsperioden voneinander. Für die Berechnung der eindimensionalen Ausbreitung von Druckspiegelschwankungen kann Gl.2.9 vereinfacht werden. Mit $S = S_0 \cdot m$ (Gl.2.11) und $T = k_f \cdot m$ (Gl.2.10) ergibt sich Gl.3.1:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1/m] \quad (3.1)$$

Diese homogene, parabolische Differentialgleichung zweiter Ordnung wurde für verschiedene Anfangs- und Randbedingungen von CARSLAW & JÄGER (1959) analytisch gelöst. Diese Gleichung ist identisch mit der Differentialgleichung der eindimensionalen Wärmeleitung. Für die Berechnung der Ausbreitung einer Druckwelle in einem gespannten Grundwasserleiter können folgende Anfangs- und Randbedingungen angenommen werden:

Da die Grundwasserströmung durch lineare Differentialgleichungen beschrieben wird, können verschiedene Strömungszustände linear überlagert werden. Daher darf ohne Einschränkung ihrer Allgemeingültigkeit für die Berechnung der räumlichen Ausbreitung einer Druckspiegeländerung der Druckspiegel zum Anfangszeitpunkt im gesamten Grundwasserleiter mit Null angenommen werden. Unabhängig von der Klassifikation eines Grundwassersystems (Abb.2.4, Tab.2.1) tritt im Einspeisungsbereich ein Anstieg der Druckspiegelhöhe auf. Der Anstieg der Druckspiegelhöhe Δh pflanzt sich im Grundwasserleiter fort und ist auf der Druckspiegelganglinie $h(x,t)$ einer nicht zu fernen Grundwassermeßstelle nach einer Zeit t_0 (nach einigen Tagen) mehr oder weniger gedämpft als Schwankung der Druckspiegelhöhe erkennbar. Falls die Meßstelle nicht unmittelbar am Rand des Grundwasserleiters liegt, kann näherungsweise ein einseitig unbegrenzter Grundwasserleiter angenommen werden (vgl. Abb.3.1):

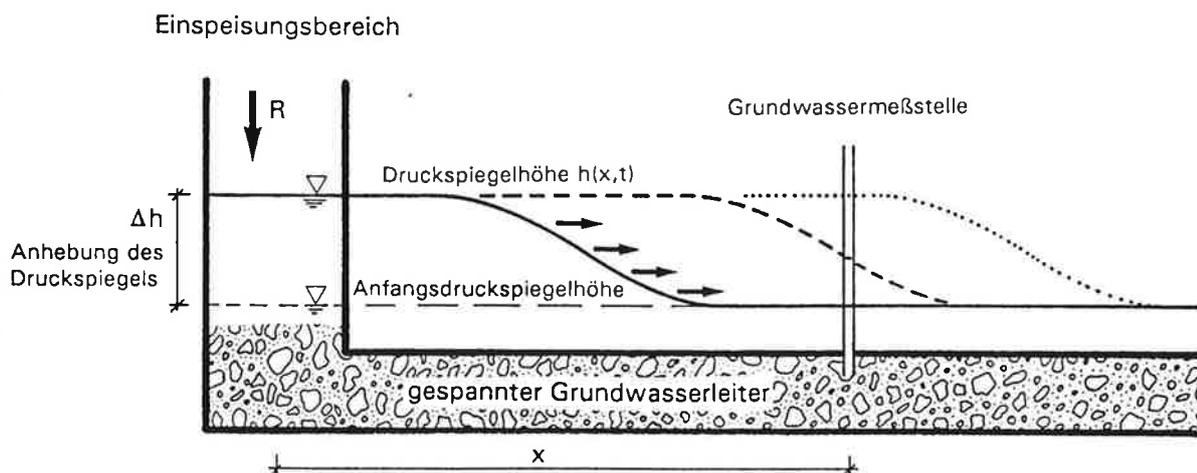


Abb.3.1: Prinzipskizze einer eindimensionalen Druckwellenausbreitung in einem gespannten Grundwasserleiter.

Mit diesen Anfangs- und Randbedingungen ergibt sich nach CARSLAW & JÄGER (1959) folgende Lösung der oben angegebenen Differentialgleichung:

$$\Delta h(x,t) = \Delta h \cdot \operatorname{erfc} \left(x \cdot \sqrt{\frac{S}{4T \cdot t}} \right) \quad [m] \quad (3.2)$$

Δh konstante Anhebung [m] des Druckspiegels an der Einspeisungsstelle
 $x = 0$ zur Zeit $t = 0$

x Entfernung der Meßstelle vom Einspeisungsbereich [m]

Die Werte der Funktion $\text{erfc}(u)$ mit $u = x \cdot \sqrt{\frac{S}{4T \cdot t}}$ können aus Tab.3.1 entnommen werden:

Tab.3.1: Werte der Funktion $\text{erfc}(u)$ zur Berechnung der Ausbreitung von Druckspiegelschwankungen (nach CARSLAW & JÄGER, 1959).

u	erfc (u)	u	erfc (u)
0	1.000000	1.10	0.119795
0.05	0.943628	1.20	0.089686
0.10	0.887537	1.30	0.065992
0.15	0.832004	1.40	0.047715
0.20	0.777297	1.50	0.033895
0.25	0.723674	1.60	0.023652
0.30	0.671373	1.70	0.016210
0.35	0.620618	1.80	0.010909
0.40	0.571608	1.90	0.007210
0.45	0.524518	2.00	0.004678
0.50	0.479500	2.10	0.002979
0.55	0.436677	2.20	0.001863
0.60	0.396144	2.30	0.001143
0.65	0.357971	2.40	0.000689
0.70	0.322199	2.50	0.000407
0.75	0.288844	2.60	0.000236
0.80	0.257899	2.70	0.000134
0.85	0.229332	2.80	0.000075
0.90	0.203092	2.90	0.000041
0.95	0.179109	3.00	0.000022
1.00	0.157299	∞	0.000000

In den Gleichungen 3.1 und 3.2 kommen die hydraulischen Parameter S (Speicherkoefizient) und T (Transmissivität) nur in ihrem Verhältnis S/T zueinander vor. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters geht in diese Gleichungen nicht ein.

Aus diesem Grund soll der Verhältniswert T/S im folgenden als spezifische Transmissivität T_s definiert werden:

$$T_s = \frac{T}{S} \quad [m^2/s] \quad (3.3)$$

Das Verhältnis S/T als einziger hydraulischer Parameter der Gleichungen 3.1 und 3.2 entspricht somit dem Kehrwert der spezifischen Transmissivität T_s und hängt nur von der Zusammensetzung (Körnung/Sieblinie), der Entstehung (Sedimentation) und der danach erfolgten Verdichtung (Diagenese) ab. Während der Speicherkoeffizient S und die Transmissivität T in einem gespannten Grundwasserleiter an verschiedenen Stellen unterschiedliche Werte aufweisen, ist das Verhältnis S/T kein stark variierender, nur an einer ganz bestimmten Stelle des Grundwasserleiters gültiger Wert, sondern bei Betrachtung gespannter Grundwasserleiter ähnlicher geologischer Entstehungsgeschichte, ähnlichen Aufbaus und ähnlicher Zusammensetzung annähernd konstant. Für die vorgestellten gespannten Grundwasserleiter der Oststeiermark beträgt die spezifische Transmissivität T_s ungefähr $10 \text{ m}^2/\text{s}$. Mit Gl.3.2 und Tab.3.1 kann für verschiedene spezifische Transmissivitäten T_s die Ausbreitung einer Druckspiegelschwankung berechnet werden. Die Ergebnisse der Druckspiegelhöhenänderung $\Delta h(x,t)$ sind in Tab.3.2 angegeben.

Für eine spezifische Transmissivität T_s von $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ergibt sich nach Tab.3.2 ein - betrachtet in Tagesmittelwerten - sofortiger Druckspiegelanstieg in einer Entfernung von 1 km (nach einem Tag: 45%) und noch ein deutlicher Druckspiegelanstieg nach 5 Tagen in einer Entfernung von 3 km (31%).

Es muß beachtet werden, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Druckspiegelschwankung wesentlich höher ist als die Filtergeschwindigkeit v_f bzw. die Abstandsgeschwindigkeit v_a . Eine Einspeisung am Rand des gespannten Grundwasserleiters ruft aufgrund der geringen Transmissivität einen längerfristigen Druckspiegelanstieg im Einspeisungsbereich hervor. Auch die Zeitdauer der Einspeisung beträgt während Niederschlagsperioden mehrere Tage. Die in Gl.3.2 enthaltene Annahme einer anhaltenden Anhebung Δh des Druckspiegels im Einspeisungsbereich ist damit bei Verwendung von Tagesmittelwerten näherungsweise gültig. Ein langsames Absinken des Druckspiegels im Einspeisungsbereich in den Tagen nach der Einspeisung führt nur zu einer geringfügigen Abminderung der für $\Delta h(x,t)$ berechneten Werte.

Tab.3.2: Druckspiegelschwankungen in Prozent des an der Einspeisungsstelle auftretenden Druckspiegelanstieges Δh für verschiedene Entfernungen x und Zeitdauern t .

Druckspiegelhöhenänderung $\Delta h(x,t)$ [%]		Anzahl der Tage nach Einspeisungsbeginn					
spez. Transm. T_s [m^2/s]	Entfernung x [km]	0,5	1	2	5	10	30
$T_s = 50 \text{ m}^2/\text{s}$ z.B.: $T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $S = 10^{-5}$	0,1 km	97	98	98	99	99	100
	0,5 km	81	87	90	94	95	98
	1 km	63	73	81	88	91	95
	3 km	15	31	47	65	75	85
	10 km	0	0	2	13	28	53
$T_s = 20 \text{ m}^2/\text{s}$ z.B.: $T = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $S = 10^{-5}$	0,1 km	94	95	97	98	99	99
	0,5 km	70	79	85	90	93	97
	1 km	45	59	70	81	87	92
	3 km	2	11	25	47	61	77
	10 km	0	0	0	2	9	33
$T_s = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ z.B.: $T = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $S = 10^{-5}$	0,1 km	91	94	95	98	98	99
	0,5 km	59	70	79	87	90	94
	1 km	28	45	59	73	81	89
	3 km	0	2	11	31	47	68
	10 km	0	0	0	0	2	17
$T_s = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ z.B.: $T = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ $S = 10^{-5}$	0,1 km	88	91	94	97	98	99
	0,5 km	45	59	70	81	87	92
	1 km	13	28	45	63	73	84
	3 km	0	0	2	15	31	55
	10 km	0	0	0	0	0	5

3.2 Statistische Ganglinienparameter und Korrelationsrechnungen

Grundwasserschreibstreifen werden üblicherweise zur Meßwertdokumentation und zur Überprüfung der Ganglinien nach Augenschein herangezogen. Weiters können aus Grundwasserganglinien statistische Parameter wie Mittelwerte (Monatsmittel, Jahresmittel) und Streuungsmaße (Höchstwert bzw. Tiefstwert, Variationsbreite, Standardabweichung, Varianz, Variationskoeffizient) ermittelt werden. Ganglinien der Druckspiegelhöhe können auch auf einen bestehenden Trend hin untersucht werden. Bezüglich der Luftdruckkorrektur ist zu bemerken, daß sich bei Jahresganglinien keine größeren Änderungen der statistischen Parameter ergeben, da stärkere Luftdruckschwankungen meist nur kurzfristig auftreten.

Mittels statistischer Parameter können zwar gespannte Grundwasserleiter, bei denen längerfristig (über mehrere Jahre) keine stärkere Entnahme erfolgt ist, mehr oder weniger genau (meßtechnische Probleme bei Artesern) auf einen bestehenden Gleichgewichtszustand überprüft werden, es können allerdings durch Bestimmung von Mittelwerten und Streuungsmaßen bei gespannten Grundwasserleitern keine Aussagen über die Ressourcen gemacht werden. Eine mittlere Druckspiegelhöhe läßt keine Aussagen über vorhandene Grundwasservorräte zu und von Druckspiegelschwankungen, die nicht nachweislich in einem funktionellen Zusammenhang mit dem Niederschlag stehen, können keine Schlüsse auf das Vorliegen einer regelmäßigen Einspeisung während Niederschlagsperioden gezogen werden. Damit ist es notwendig, weiterführende statistische Untersuchungsmethoden, wie diejenige der Korrelationsrechnung zur Analyse von Druckspiegelganglinien heranzuziehen.

Bei der Korrelation werden n Wertepaare zweier verschiedener Zeitreihen (Ganglinien) zeitgleich zueinander in Beziehung gesetzt. Der Korrelationskoeffizient r ist ein Maß für die lineare Abhängigkeit der beiden Zeitreihen:

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad -1 \leq r \leq +1 \quad (3.4)$$

mit s_x Standardabweichung der Zeitreihe x
 s_y Standardabweichung der Zeitreihe y
 s_{xy} Kovarianz

Die Wertepaare (x,y) der beiden Zeitreihen können in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt werden. In dieser Darstellung kann eine Regressionsgerade bestimmt werden, die die mittlere Abhängigkeit der beiden Zeitreihen angibt:

$$y = b \cdot x + y_0 \quad [m] \quad (3.5)$$

Die Steigung der Regressionsgeraden $y(x)$ ist der Regressionskoeffizient b :

$$b = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad [-] \quad (3.6)$$

Mit den Mittelwerten $\bar{x} = \frac{\Sigma x}{n} \quad [m]$ und $\bar{y} = \frac{\Sigma y}{n} \quad [m]$ ergibt sich für den Basis-

wert y_0 die Beziehung:

$$y_0 = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad [m] \quad (3.7)$$

Für einen statistischen Vergleich der Druckspiegelhöhe mit dem Niederschlag ist zu beachten, daß beide korrelierte Größen eine möglichst große, qualitative, physikalische Ähnlichkeit aufweisen müssen. Bei Fehlen einer solchen Ähnlichkeit kann auch bei einer eventuell vorliegenden, eindeutigen hydrologischen Abhängigkeit keine statistische Abhängigkeit mittels Korrelation festgestellt werden. Es wäre somit unzweckmäßig und falsch, Tagesniederschläge mit den Werten der Druckspiegelhöhe zu korrelieren. Für eine zielführende Vorgangsweise beim statistischen Vergleich wird daher aus den Tagesniederschlägen eine sogenannte reduzierte Niederschlagssummenlinie gebildet. Abb.3.2 zeigt Tagesniederschläge und die daraus gebildete Niederschlagssummenlinie. Da die Niederschlagssummenlinie naturgemäß ständig ansteigt, ist es nicht zweckmäßig, sie in dieser Form mit den Ganglinien der Druckspiegelhöhe zu vergleichen. Der steigende Trend der Niederschlagssummenlinie kann großteils eliminiert werden, indem $1/365$ der Jahresniederschlagssumme (in Schaltjahren $1/366$) pro Tag von den Jahreswerten der Niederschlagssummenlinie fortlaufend subtrahiert wird. Für die Bildung der reduzierten Niederschlagssummenlinie werden somit die Ordinaten der mittleren Niederschlagssummenlinie des Beobachtungsjahres von den Ordinaten der tatsächlichen

Niederschlagssummenlinie subtrahiert. Damit erhält die reduzierte Niederschlagssummenlinie den Charakter einer Jahressganglinie, deren Anfangs- und Endwert gleich Null ist.

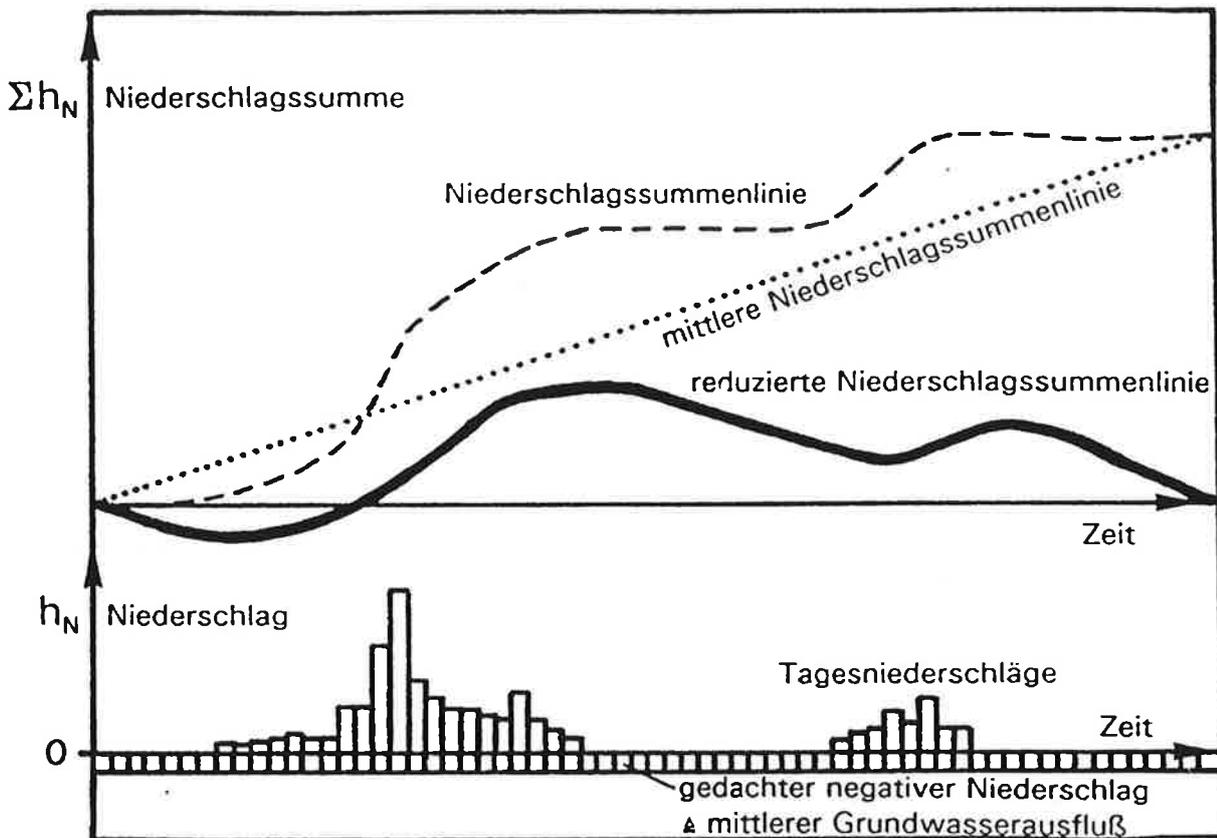


Abb.3.2: Ermittlung der reduzierten Niederschlagssummenlinie.

Der von der Niederschlagssummenlinie subtrahierte Wert, der in die Rechnung als täglicher "negativer" Niederschlagswert eingeht, kann auch als näherungsweise gleichbleibender, mittlerer Ausfluß aus dem gespannten Grundwassersystem interpretiert werden.

Bei einer indirekten Einspeisung steht die Grundwassererneuerung in direkter statistischer Beziehung zum Niederschlag. Hierfür ist es unerheblich, ob nach stärkeren Niederschlägen eine direkte Zusickerung von Hangwasser erfolgt, oder ob ein vom Niederschlag hervorgerufener höherer Wasserstand in einem Oberflächengewässer eine indirekte Einspeisung bewirkt.

Die reduzierte Niederschlagssummenlinie weist in Niederschlagsperioden einen etwas geringeren Anstieg als die Niederschlagssummenlinie, in Trockenperioden einen leichten Abfall, auf. Damit ergibt sich eine vergleichbar der Grundwasser-

ganglinie teils steigende, teils auch abfallende Niederschlagslinie mit ausgeprägten, nur leicht gedämpften Schwankungen.

Von der Jahresganglinie der Druckspiegelhöhe werden wiederum die Tagesmittelwerte herangezogen. Im Gegensatz zur reduzierten Niederschlagssummenlinie weist die Druckspiegelganglinie jedoch in Jahren mit überdurchschnittlichem bzw. unterdurchschnittlichem Niederschlag mitunter einen starken Trend auf. Da bei einer Korrelationsrechnung die absoluten Werte von zwei Ganglinien und nicht nur das Ausmaß ihrer Änderungen miteinander in Beziehung gesetzt werden, muß die Druckspiegeljahresganglinie für die Korrelationsrechnung so in die Horizontale gedreht werden, daß ihr Endpunkt gleich hoch wie ihr Anfangspunkt liegt. Hiefür wird die Trendlinie als Verbindungsgerade zwischen Anfangs- und Endwert der Jahresganglinie bestimmt. Die Ordinaten der Druckspiegelganglinie werden um die Ordinate der Trendlinie vorzeichenmäßig richtig reduziert. Damit kann die luftdruckkorrigierte Ganglinie zusammen mit der reduzierten Niederschlagssummenlinie dargestellt werden. Die Beziehung zwischen Niederschlag und Druckspiegelhöhe erkennt man einerseits in einer Korrelationsdarstellung mit eingetragener Regressionsgeraden und andererseits in einer maßstabsmäßig einander angepaßten vergleichenden Darstellung. Hiefür muß allerdings die Reaktionszeit ΔT berücksichtigt werden, die zwischen dem Zeitpunkt des Niederschlages und dem Auftreten des dadurch hervorgerufenen Druckspiegelanstieges vergeht. Die Reaktionszeit ΔT einer Grundwassermeßstelle auf eine erfolgte Einspeisung setzt sich aus der Einspeisungszeit t_e und der Zeitdauer t_D der Druckwellenausbreitung zusammen. Für eine zeitrichtige Gegenüberstellung der luftdruckkorrigierten Druckspiegelganglinie und der reduzierten Niederschlagssummenlinie müssen die beiden Ganglinien um die Reaktionszeit ΔT gegeneinander verschoben werden. Durch die im folgenden erläuterte Vorgangsweise können die beiden Ganglinien maßstabsgerecht und zeitrichtig einander gegenübergestellt werden.

Vorerst wird eine Reaktionszeit abgeschätzt und hiefür eine Korrelationsdarstellung durchgeführt. Daraus erhält man Näherungswerte für den Regressionskoeffizienten b und den Basiswert y_0 . Zum optischen Vergleich von Druckspiegelganglinie und reduzierter Niederschlagssummenlinie können die Druckspiegelganglinie DS und die reduzierte Niederschlagssummenlinie SN gemeinsam im gleichen Maßstab dargestellt werden, indem die reduzierte Niederschlagssummenlinie mit dem Regressionskoeffizienten b multipliziert und anschließend der Wert y_0 addiert wird:

$$DS = b \cdot SN + y_0 \quad [m] \quad (3.8)$$

Eine Darstellung im gleichen Maßstab ist möglich, da die Werte beider Ganglinien die Einheit einer Länge aufweisen. Genauso wie für die Korrelationsrechnung die Jahresganglinie der Druckspiegelhöhe in die Horizontale gedreht worden ist, muß nun für die Vergleichsdarstellung die reduzierte Niederschlagssummenlinie, die horizontal verläuft, in die andere Richtung gedreht werden. Bei dieser Vorgangsweise wird die Ganglinie der Druckspiegelhöhe unverändert dargestellt, die reduzierte Niederschlagssummenlinie weist jedoch den gleichen Anstieg bzw. Abfall auf und ist auch maßstabsmäßig angepaßt. Damit kann in der Vergleichsdarstellung die zeitliche Verschiebung der beiden Ganglinien festgestellt werden. Hiefür werden die Zeitpunkte des Auftretens von Spitzen und Anstiegen der reduzierten Niederschlagssummenlinie und der Druckspiegelganglinie optisch miteinander verglichen. Daraus erhält man die Reaktionszeit ΔT . Durch Kenntnis der Reaktionszeit ΔT kann nun analog der vorhergehenden Rechnung eine Korrelationsrechnung der zeitrichtig verschobenen Ganglinien erfolgen, die Regressionsgerade bestimmt werden und damit auch eine endgültige zeitrichtige Vergleichsdarstellung durchgeführt werden. Ein Beispiel für eine zeitrichtige Vergleichsdarstellung ist in Abbildung 3.3 enthalten (siehe Seite ??).

Der berechnete Korrelationskoeffizient $r = 0,36$ zeigt eine statistisch signifikante Abhängigkeit der Druckspiegelganglinie dieses Grundwasserleiters vom Niederschlag auf. Damit ist bewiesen, daß die Grundwasserressourcen dieses Grundwassersystems durch indirekte Einspeisung erneuert werden. Wie aus Abb.3.3 ersichtlich stimmen die beiden Ganglinien bezüglich des mittleren Zeitpunktes des Auftretens von Spitzen und Anstiegen bei einer Verschiebung von $\Delta T \approx 2$ Tagen in ihrem Verlauf näherungsweise überein. Daß der Verlauf der Druckspiegelganglinie und der reduzierten Niederschlagssummenlinie am Jahresbeginn in den Monaten Jänner bis März keine Übereinstimmung aufweist, ist auf den Einfluß der Schneeschmelze zurückzuführen (vgl. BERGMANN & ÜBERWIMMER, 1992).

In Tab.3.3 sind die untersuchten gespannten Grundwasserleiter des Feistritz- und Safentalles danach eingeteilt, ob aus den gemessenen Ganglinien ein Niederschlags- einfluß nachweisbar ist. Für die Grundwassermeßstellen mit deutlichem Niederschlagseinfluß sind für ausgewählte Stationsjahre (wenige, nur kurzzeitige Datenausfälle, genaue zeitliche Meßwerterfassung und weitgehend stationärer Ganglinienverlauf) die mittleren Korrelationskoeffizienten r zum Nachweis einer bestehenden Einspeisung, die mittlere Reaktionszeit ΔT und die Niederschlagswirksam-

keit PE zusammengestellt. Die Definition und Bestimmung der Niederschlagswirksamkeit PE wird im folgenden Kapitel behandelt.

Tab.3.3: Untersuchte Meßstellen des Feistritz- und Safentales mit den berechneten Korrelationskoeffizienten r , den mittleren Reaktionszeiten ΔT und ihren Niederschlagswirksamkeiten PE.

Meßstelle	Kurzbezeichnung	Korrelationskoeffizient r [-]	Reaktionszeit ΔT [Tage]	Niederschlagswirksamkeit PE [%]
Grafendorf 1	GF178 GF179	0,77 0,83	5	--- ---
Grafendorf 3	GF378 GF379	0,76 0,87	4	21,8 8,5
Grafendorf 4	GF476 GF478 GF479	0,74 0,88 0,75	2	17,8 13,9 10,5
Seibersdorf 1	SB1	KEIN SIGNIFIKANTER NIEDERSCHLAGSEINFLUSS !		
Seibersdorf 2	SB278	0,85	1	38,3
Seibersdorf 3	SB378	0,78	0	10,3
Buch Geiseldorf 1	GEI181 GEI182	0,36 0,25	2	64,1 29,2
Hainersdorf 1	HA11	KEIN SIGNIFIKANTER NIEDERSCHLAGSEINFLUSS !		
Jobst 1	JOB182	SCHWACHER NIEDERSCHLAGSEINFLUSS !		
Kaindorf 1	KAI184	0,87	9	55,2
Kaindorf 2	KAI284	0,49	3	277,9
Kroisbach 1	KRB185	0,65	3	32,0
Obgrün V2 Rath	OBG290	0,62	1	37,9
Waltersdorf Süd	WAL1	KEIN SIGNIFIKANTER NIEDERSCHLAGSEINFLUSS !		
Waltersdorf Nord	WAL2	SCHWACHER NIEDERSCHLAGSEINFLUSS !		

VERGLEICH : DRUCKSPIEGELGANGLINIE - ANGEPASSTE NIEDERSCHLAGSSUMMENLINIE

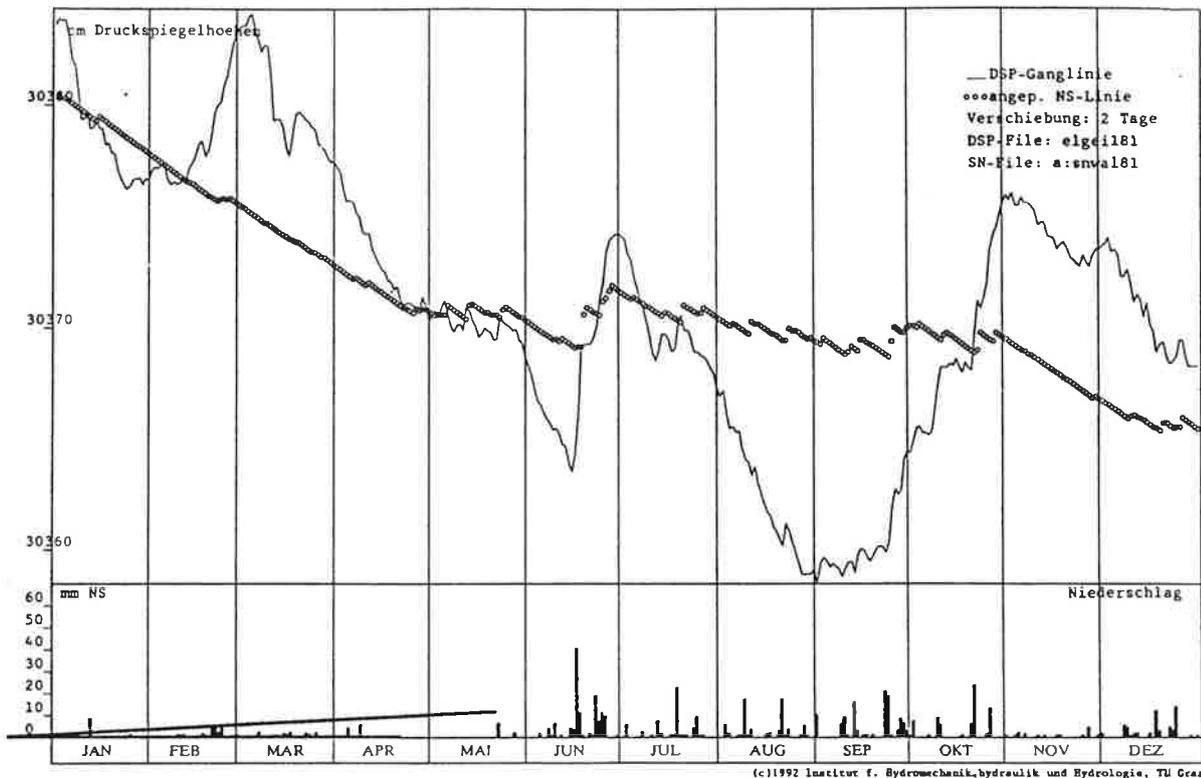


Abb.3.3: Vergleichende Darstellung der luftdruckkorrigierten Druckspiegelganglinie (Station Buch Geiseldorf 1, Jahr 1981) und der zugehörigen um die Reaktionszeit $\Delta T = 2$ Tage verschobenen reduzierten Niederschlagssummenlinie.

3.3 Niederschlagswirksamkeitsanalyse

Bei gespannten Grundwasserleitern kommt es als Folge einer indirekten Einspeisung zu einer Anhebung des Grundwasserspiegels mit einer daran anschließenden Auslaufkurve. Der Vergleich einzelner Druckspiegelschwankungen mit einzelnen Niederschlagsereignissen gestaltet sich schwierig, da einerseits Druckspiegelschwankungen auch anderweitig beeinflusst, verstärkt, gedämpft oder überlagert werden können, und andererseits die Einspeisungsrate in Abhängigkeit verschiede-

ner Niederschlagsparameter variieren kann. Dennoch kann, wie im folgenden gezeigt wird, das statistisch mittlere Verhältnis zwischen gefallenem Niederschlag und Änderung der Druckspiegelhöhe im gespannten Grundwasserleiter berechnet werden.

Analog zur Luftdruckwirksamkeit BE kann hier eine Niederschlagswirksamkeit PE (precipitation efficiency) als Verhältniswert zwischen dem Jahresniederschlag und der von ihm bewirkten jährlichen Summe der Druckspiegelanhebungen berechnet werden. Hiefür wird genauso wie für die Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit eine modifizierte Doppelsummenanalyse verwendet. Während bei der Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit die beiden Größen Luftdruck und Druckspiegelhöhe miteinander verglichen werden, sollen nun die beiden Größen Niederschlag und Druckspiegelhöhe miteinander verglichen werden. Als Niederschlagswerte können allerdings nicht die Tagesniederschläge Verwendung finden, sondern es wird zunächst eine reduzierte Niederschlagssummenlinie (vgl. Kap.3.2) berechnet. So wie bei der Luftdruckwirksamkeitsbestimmung die Größe der vom Luftdruck hervorgerufenen Schwankungen der Druckspiegelhöhe ermittelt worden ist, soll hier berechnet werden, wie groß die Schwankungen der Druckspiegelhöhe sind, die vom Niederschlag hervorgerufen worden sind. Durch eine analoge Vorgangsweise entsteht wie bei der Bestimmung der Luftdruckwirksamkeit auch hier bei Vorliegen einer Beziehung zwischen Niederschlag und Druckspiegelhöhe ein gezackter Linienzug, durch den näherungsweise eine Gerade gelegt werden kann. Die Steigung der Geraden gibt die prozentuelle Abhängigkeit der Schwankungen der Druckspiegelhöhe vom reduzierten Tagesniederschlag, oder anders ausgedrückt, die Wirksamkeit des Niederschlags auf die Druckspiegelhöhe einer Grundwassermeßstelle, an.

Es muß wiederum eine besondere Vorzeichenregelung bei der Summierung der Änderungen der Druckspiegelhöhe und deren Auftragen auf der Ordinate beachtet werden, um statistisch unabhängige, andere Einflüsse auf die Druckspiegelhöhen bei der Bestimmung der Niederschlagswirksamkeit im Mittel ausschalten zu können. Bei der Niederschlagswirksamkeitsanalyse wird die bei der Korrelationsrechnung bestimmte Reaktionszeit ΔT berücksichtigt, indem die reduzierte Niederschlagssummenlinie und die Ganglinie der Druckspiegelhöhe vor der Berechnung um den Wert ΔT der Reaktionszeit zeitlich gegeneinander verschoben werden. In Abb.3.4 ist eine Niederschlagswirksamkeitsanalyse für ein Stationsjahr eines gespannten Grundwasserleiters beispielhaft dargestellt.

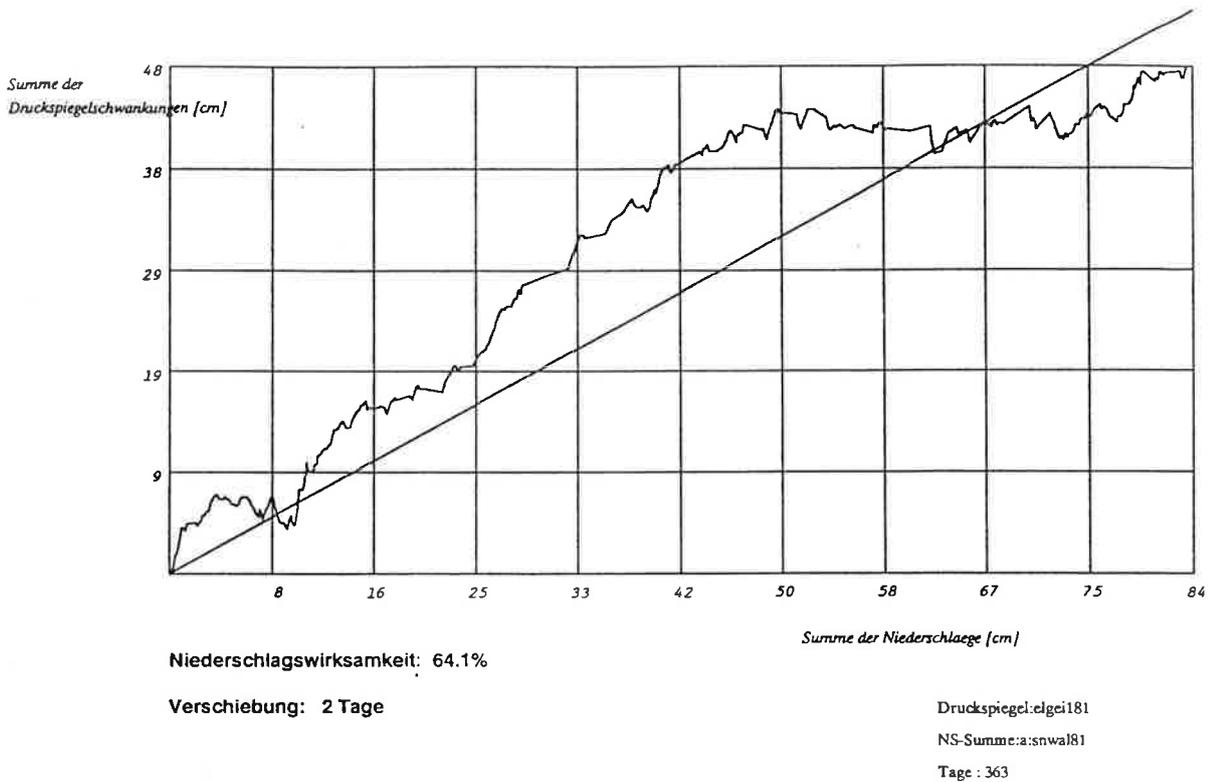


Abb.3.4: Niederschlagswirksamkeit der Station Buch Geiseldorf 1, berechnet am Beispiel des Meßjahres 1981.

Die Methode der Niederschlagswirksamkeitsanalyse reagiert genauso wie die Luftdruckwirksamkeitsanalyse sehr sensibel auf das Bestehen oder Fehlen einer gegenseitigen Abhängigkeit beider Meßgrößen. Da bei der modifizierten Doppelsummenanalyse die Schwankungen der Tagesmittelwerte einzeln miteinander verglichen und entsprechend aufgetragen werden, entsteht bei fehlender Abhängigkeit ein im Bereich der x-Achse näherungsweise horizontal verlaufender, gezackter Linienzug. Nur bei einer tatsächlich bestehenden Abhängigkeit bildet sich über ein Meßjahr ein überwiegend steigender Linienzug aus. Dies weist genauso wie der Korrelationskoeffizient r bei der Korrelationsrechnung auf eine sichere statistische Abhängigkeit von Niederschlag und Druckspiegelhöhe und damit auf eine ständige Erneuerung der Grundwasservorräte des untersuchten gespannten Grundwassersystems hin. Für die untersuchten gespannten Grundwasserleiter des Feistritz- und Safentales sind die Mittelwerte der Niederschlagswirksamkeit PE in Tab.3.3 eingetragen.

Der Wert der Niederschlagswirksamkeit ist nicht nur ein Kennwert eines gespannten Grundwassersystems, dessen Interpretation im folgenden noch näher behandelt wird, sondern zeigt auch deutlich die Funktionsweise gespannter Grundwassersysteme bezüglich der Grundwasserspeicherung. Unter Zugrundelegung der Modellvorstellungen gespannter Grundwassersysteme und der Einspeisungswelle als einer sich vom Einspeisungsbereich ausgehend zum zentralen Bereich des gespannten Grundwasserleiters hin ausbreitenden Druckwelle kann aus den an einer Grundwassermeßstelle aufgezeichneten, niederschlagsabhängigen Anstiegen der Druckspiegelhöhe auf die Inhaltsänderung des gespannten Grundwasserleiters geschlossen werden. Über die Niederschlagswirksamkeit PE und über den Jahresniederschlag $h_{N,j}$ kann die jährliche Summe der Druckspiegelanstiege Δh_j und daraus mit dem Speicherkoeffizienten S die jährliche Summe $h_{R,j}$ aller von der Einspeisung hervorgerufenen Vorratsänderungen des gespannten Grundwasserleiters (ausgedrückt als Höhe) ermittelt werden:

$$h_{R,j} = \Delta h_j \cdot S = PE \cdot h_{N,j} \cdot S \quad [m] \quad (3.9)$$

Der an einer Stelle des Grundwasserleiters vorhandene Grundwasservorrat kann als Vorratshöhe h_v wie folgt angegeben werden:

$$h_v = m \cdot n \quad [m] \quad (3.10)$$

m Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]

n Porosität [-]

Zum Vergleich der als Höhe angegebenen jährlichen Vorratsänderung im gespannten Grundwasserleiter $h_{R,j}$ und der Vorratshöhe h_v , die das Volumen kennzeichnet, das bei einem starken Rückgang der Druckspiegelhöhe, also bei einem "Abbau" der Grundwasservorräte, zur Verfügung stehen würde, wird ein Vergleichswert V wie folgt definiert:

$$V = \frac{h_{R,j}}{h_v} = PE \cdot h_{N,j} \cdot \frac{S_o}{n} \quad [-] \quad (3.11)$$

Beim Beispiel der Station Buch Geiseldorf 1, Meßjahr 1981 erhält man damit ein Verhältnis V von $3,2 \cdot 10^{-5}$ ($PE = 64 \%$; $h_{N,j} = 840 \text{ mm}$; $S_o = 1,2 \cdot 10^{-5}$; $n = 0,2$). Diese enorm kleine Verhältniszahl V , in die die Mächtigkeit m nicht eingeht, und in der der spezifische Speicherkoeffizient S_o und die Porosität n nur mit ihrem Verhältnis vorkommen, weist darauf hin, daß ein gespannter Grundwasserleiter bei Druckspiegeländerungen im gespannten Bereich keinesfalls als Grundwasserspeicher betrachtet werden darf. Das gesamte Volumen, das der gespannte Grundwasserleiter (angenommene Fläche des gespannten Grundwasserleiters $A_G = 10 \text{ km}^2$; $m = 7 \text{ m}$; $PE = 64 \%$; $h_{N,j} = 840 \text{ mm}$; $S_o = 1,2 \cdot 10^{-5}$) - wie das obige Beispiel zeigt - während eines Jahres aufgrund einer zeitlich variablen Einspeisung zwischenspeichert, beträgt nur 450 m^3 . Die Funktion eines Zwischenspeichers müssen damit räumlich begrenzte ungesättigte Zonen im Einspeisungsbereich am Rand des gespannten Grundwassersystems übernehmen. Zuletzt soll im Zusammenhang mit der Analyse von Druckspiegelschwankungen noch der Belastungseinfluß einer Bodenfeuchteänderung auf einen gespannten Grundwasserleiter erwähnt werden. Aufgrund einer sogenannten Gezeitenwirksamkeit entstehen bei stärkeren Niederschlägen kurzzeitig andauernde Druckschwankungen in einer Größenordnung von maximal 1 bis 3 Zentimeter; im allgemeinen liegen sie unter einem Zentimeter. Diese Belastungsänderung auf den gespannten Grundwasserleiter tritt aufgrund der Bodenfeuchteänderung durch Infiltration in die oberste Bodenschicht bereits während eines Niederschlagsereignisses auf. Diese zeitgleich mit höheren Tagesniederschlägen auftretenden kleinen, kurzzeitigen Zacken in der graphischen Darstellung können bei genauem Vergleich von Niederschlag und luftdruckkorrigierter Druckspiegelganglinie (Abb.2.9) erkannt werden. Falls Ganglinien der Druckspiegelhöhe nicht vom Luftdruckeinfluß korrigiert worden sind, werden diese kleinen Schwankungen allerdings vom Luftdruckeinfluß überlagert und sind damit im allgemeinen nicht erkennbar. Druckspiegelschwankungen, hervorgerufen von Bodenfeuchteänderungen, überlagern sich zwar mit den Druckspiegelanstiegen, hervorgerufen von der Grundwassererneuerung, aufgrund ihrer Kleinheit und ihres sehr kurzzeitigen Auftretens können Bodenfeuchteänderungen allerdings das Erscheinungsbild und die berechneten Parameter von Druckspiegelschwankungen, die von einer Grundwassererneuerung hervorgerufen worden sind, nicht wesentlich verfälschen.

4. Untersuchung hydraulischer Verbindungen des gespannten Grundwasservorkommens im mittleren Feistritztal mit oberflächennahen Grundwasserleitern.

Im mittleren Feistritztal liegt ein ausgedehnter gespannter Grundwasserleiter, der durch vier hydraulisch zusammenhängende Bohrungen (GHD1, GHD2, GSB2 und KRB1; vgl. Abb.1.3) erschlossen wird. Die numerische Modellierung dieses Grundwasserleiters wird in Kap.5 näher beschrieben. Da der gespannte Grundwasserleiter in diesem Gebiet starke artesische Druckspiegelhöhen (über 10 m artesische Druckhöhe im Talboden) aufweist und in Talmitte auch in Trockenperioden mehrere Grundwasseraustritte mit zur Feistritz führenden Drainagegräben auftreten, ist vorerst die Frage zu klären, ob es sich hier um einen Aussickerungsbereich aus dem gespannten Grundwasserleiter handelt. Die diesbezüglich vorgenommenen Untersuchungen werden im folgenden beschrieben.

Zur Feststellung einer Aussickerung aus dem gespannten Grundwasserleiter im mittleren Feistritztal wurde ein Überlaufversuch an der Bohrung GHD1 durchgeführt, bei dem gleichzeitig der oberflächennahe, quartäre Grundwasserleiter, der nur eine geringe Mächtigkeit aufweist, und der Abfluß von den Drainagegräben beobachtet wurden. Ein Drainagegraben konnte als Meßgerinne benutzt werden, in drei andere wurden Meßwehre eingebaut. Drei mit dem oberflächennahen Grundwasser in Kontakt stehende Teiche wurden mit provisorischen Pegelskalen zur Wasserstandsbeobachtung ausgestattet. Unmittelbar neben der Bohrung GHD1 wurde eine seichte Bohrung (Bohrtiefe 6 m) in den oberflächennahen Grundwasserleiter abgeteuft, der an dieser Stelle in einer Tiefe von 2,90 m bis 3,60 m angetroffen wurde und eine Durchlässigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s aufweist. Zusätzlich wurde der Feistritzwasserspiegel am nahegelegenen Pegel Obgrün beobachtet. Das Meßstellennetz ist in Abb.4.1 dargestellt.

Die Meßstellenbetreuung und -beobachtung erfolgte in der zweiten Jahreshälfte 1989 und im Jahr 1990 generell 14-tägig vor und nach dem Beginn des Überlaufversuches und nach Beendigung des Überlaufversuches in entsprechend kürzeren Intervallen. Der Überlaufversuch an der Bohrung GHD1 dauerte vom 24.10.1989 bis 21.03.1990 an. Während dieses Zeitraumes erfolgte eine weiträumige starke Druckabsenkung im gespannten tertiären Grundwasserleiter, auf welche die umliegenden Meßstellen des seichtliegenden quartären Grundwassers jedoch keine Reaktion zeigten. Somit sind trotz der starken artesischen Druckspiegelhöhen die Deckschichten des gespannten, tertiären Grundwasserleiters in diesem Bereich de facto dicht. In diesem Bereich tritt keine Aussickerung aus dem tertiären Horizont auf, was auch eine wesentliche Vorgabe für die numerische Modellierung des

gespannten Grundwasserleiters in diesem Gebiet darstellt.

Die ständige Wasserführung der Drainagegräben auch in Trockenperioden kommt dadurch zustande, daß dieser geringmächtige, quartäre Horizont, der mit den beobachteten Teichen weitgehend ausspiegelt, durch ihn überlagernde alluviale Tonschichten teilweise leicht gespannt ist.

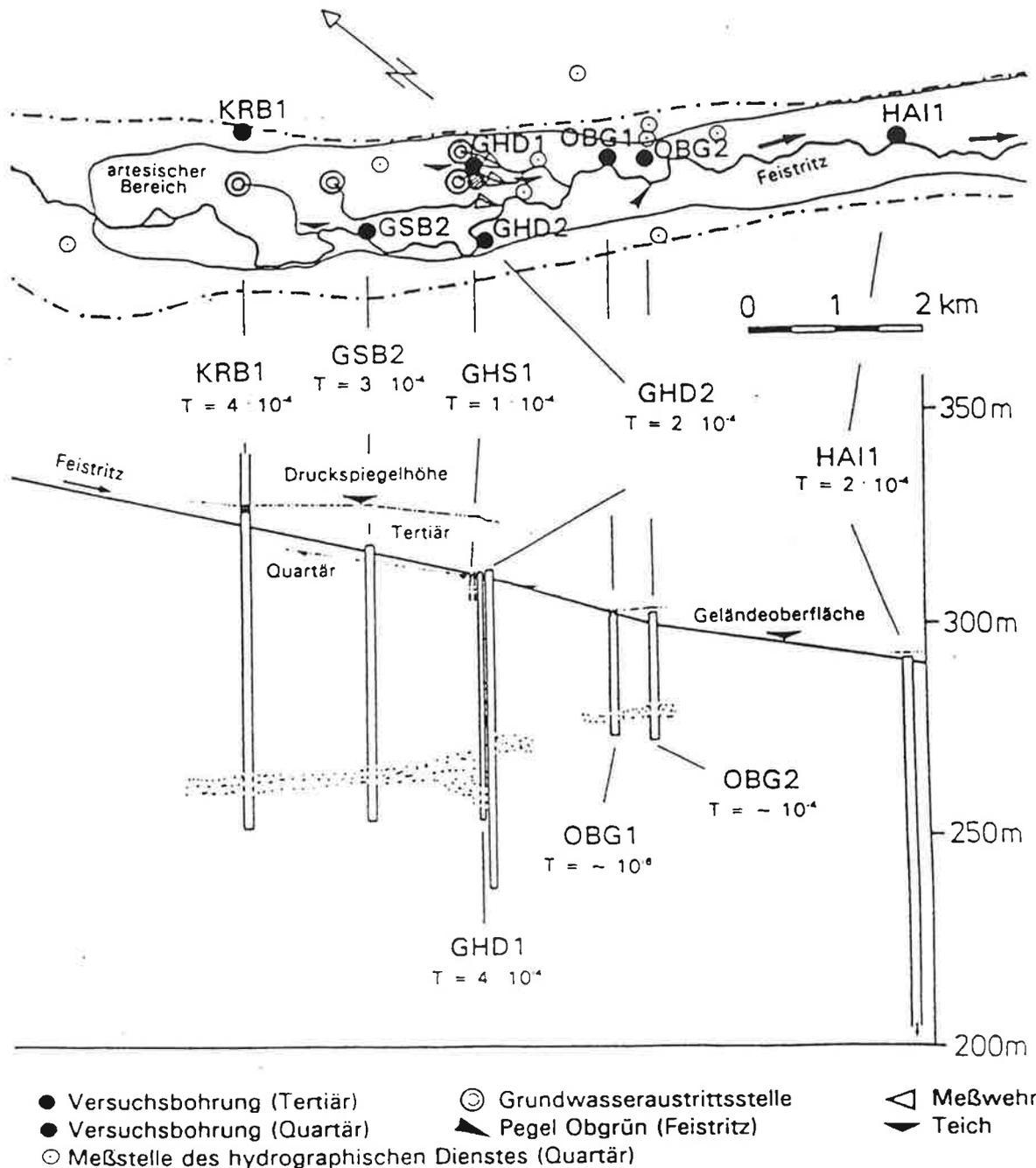


Abb.4.1: Meßstellennetz des tertiären und quartären Grundwasserleiters und der Oberflächengewässer im mittleren Feistritztal.

Durch eine Feststellung des Verlaufes des Grundwasserspiegels und der Grundwasserströmung im seichtliegenden quartären Grundwasserleiter, durch Analyse des Trockenwetterabflusses in den Drainagegräben und der Wasserstände in den Teichen, und durch Vergleich mit dem Ganglinienverlauf des Wasserstandes der Feistritz am Pegel Obgrün und der im Gebiet liegenden, wöchentlich abgelesenen quartären Meßstellen des Hydrographischen Dienstes (Abb.4.1) könnte die Einspeisung des quartären Grundwasserleiters und dessen hydraulischer Zusammenhang mit der Feistritz bestimmt werden. Da jedoch der seichtliegende, quartäre Grundwasserleiter in diesem Bereich aufgrund seiner geringen Mächtigkeit und der mangelhaften Wasserqualität für die Trinkwasserversorgung nicht geeignet erscheint, wurden keine weitergehenden diesbezüglichen Untersuchungen mehr vorgenommen. Die Feststellung des Fehlens einer hydraulischen Verbindung zwischen tertiärem und quartärem Grundwasserleiter war allerdings für die Beschreibung und Modellierung des gespannten Grundwasserleiters im Tertiär von besonderer Bedeutung.

5. Numerische Modellierung des gespannten Grundwasserleiters im Feistritztal

Numerische Grundwassermodelle nach der Methode der Finiten Elemente (PINDER & GRAY, 1977; WANG & ANDERSON, 1982; BEAR & VERRUIJT, 1987) sind ein häufig verwendetes und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten vielseitiges Werkzeug zur Untersuchung von Grundwasserleitern durch numerische Simulation der Grundwasserströmung. Sie werden zur Beschreibung der Grundwasserbewegung im Modellgebiet, zur Prognose allfälliger Veränderungen und zur wasserwirtschaftlichen Planung verwendet. Als Modellgebiet wird jener Teil des zu untersuchenden Grundwasserleiters herausgenommen, von dem hydraulische Parameter bekannt sind, und der für eine wasserwirtschaftliche Nutzung von Interesse ist. Die Ränder des Modellgebietes sind damit häufig nicht identisch mit den Rändern des Grundwasserleiters. Längs des Randes des Modellgebietes sind entsprechende Randbedingungen vorzugeben. Bei zweidimensionalen, horizontalen Grundwassermodellen muß somit nicht nur die Verteilung der Transmissivität T als Produkt des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f und der Mächtigkeit m über das gesamte Modellgebiet angenommen werden, sondern entlang des gesamten Randes des Modellgebietes sind auch Annahmen entweder der Grundwasserspiegelhöhe (Dirichlet-Randbedingung) oder des Grundwasserzuflusses (Neumann-Randbedingung) erforderlich. Mittels dieser Vorgaben und Annahmen kann eine Simulationsrechnung durchgeführt werden. Das Ergebnis einer Simulationsrechnung ist der Verlauf des Grundwasserspiegels über dem Modellgebiet und damit das Strömungsnetz der Grundwasserbewegung, das sich aus den Potentiallinien (Grundwasserschichtenlinien) und den Stromlinien zusammensetzt. Die berechneten Grundwasserspiegelhöhen werden an den Grundwassermeßstellen mit den dort gemessenen Grundwasserspiegelhöhen verglichen. Bei Abweichungen werden unter Belassung der vorgegebenen, bekannten hydraulischen Parameter die für die flächendeckende Vorgabe der Transmissivitätsverteilung und die Randbedingungen getroffenen Annahmen variiert, und es wird im Zuge vielfach wiederholter Simulationsrechnungen danach getrachtet, die berechneten Grundwasserspiegelhöhen den an den Grundwassermeßstellen gemessenen schrittweise anzunähern. Dieser schwierige und zeitaufwendige Vorgang entspricht der Aneichung des Grundwassermodells. Das Grundwassermodell gilt als angeeicht, wenn die simulierte Grundwasserströmung abhängig vom Umfang und von der Güte der für die Eichung verwendeten Meßdaten bestmöglichst mit der tatsächlich im Grundwasserleiter auftretenden Grundwasserströmung übereinstimmt.

Für das Modellgebiet "Mittleres Feistritztal" als Teilbereich eines gespannten

Grundwasserleiters ist für die numerische Modellierung eine ausreichende Datenbasis vorhanden. Für die Modellierung wurde das Programmpaket "Micro-Fem" nach HEMKER & ELBURG (1987) verwendet.

Wie aus ihrer gegenseitigen Beeinflussung bei Entnahmeversuchen erkennbar ist, hängen in diesem Gebiet vier Bohrungen (GHD1, GHD2, GSB2 und KRB1; siehe Abb.1.3 bzw. Abb.5.1), die in den gespannten, tertiären Grundwasserleiter abgeteuft worden sind, hydraulisch zusammen. Da von allen vier Bohrungen Entnahmeversuche vorliegen, sind an diesen Stellen die Transmissivitätswerte des gespannten Grundwasserleiters gegeben (BERGMANN & SACKL, 1984). Die Transmissivitätsverteilung ist aus den geoelektrischen Tiefensondierungen im mittleren Feistritztal (SCHMID, 1982a) und den daran anschließenden lithologischen Untersuchungen (SCHMID, 1982b) bekannt. Ebenso gibt es Angaben über Grundwasserfließrichtungen, und mit Hilfe von Bohrlochmessungen (ARSENAL, 1982) wurden die Grundwasserfließrichtungen an den vier Bohrungen bestimmt. Bei der Modellerstellung muß als erstes das Modellgebiet abgegrenzt werden. Im mittleren Bereich des Modellgebietes Feistritztal liegen die vier oben genannten, hydraulisch zusammenhängenden Bohrungen. Grundsätzlich sollten die Ränder eines Modellgebietes soweit von den Entnahmebrunnen entfernt liegen, daß die angeeichten Randbedingungen bei einer simulierten Grundwasserentnahme nicht beeinflußt werden und somit bei unterschiedlichen Entnahmemengen nicht geändert werden müssen. Bei gespannten Grundwasserleitern, insbesondere auch beim gespannten Grundwasserleiter des mittleren Feistritztales, ergibt sich diesbezüglich das Problem, daß sich einerseits Absenkungstrichter bei Grundwasserentnahmen über mehrere Kilometer ausdehnen, andererseits jedoch hydraulische Parameter nur in einem engen, durch einzelne Bohrungen aufgeschlossenen Bereich bekannt sind. Weiters dehnt sich - wie in Kap.2 beschrieben - in gespannten Grundwassersystemen der Absenkungsbereich bei einer stärkeren Entnahme bis in den Einspeisungsbereich aus, weshalb das Grundwassersystem auch bei erhöhter Entnahme im Gleichgewicht bleibt. Während somit einerseits eine Ausdehnung des Modellgebietes auf den gesamten Absenkungsbereich aufgrund nicht vorhandener geohydraulischer Daten entfernterer Bereiche von vornherein nicht möglich ist, könnte andererseits gerade hierdurch die Zuflußrandbedingung ohnehin nicht gleichgelassen werden, da bei im Gleichgewicht stehenden gespannten Grundwassersystemen bei einer erhöhten Entnahme von einer ebenfalls erhöhten Einspeisung ausgegangen werden muß. Das für das Grundwassermodell im mittleren Feistritztal gewählte Modellgebiet ist in Abb.5.1 eingenordet dargestellt. Von den vier Bohrungen ausgehend ist es, soweit geohydraulische Daten (Ergebnisse der geoelektrischen Tiefensondierungen

und Transmissivitätswerte aufgrund von Entnahmeversuchen) vorliegen, auf ein möglichst großes Gebiet ausgedehnt.

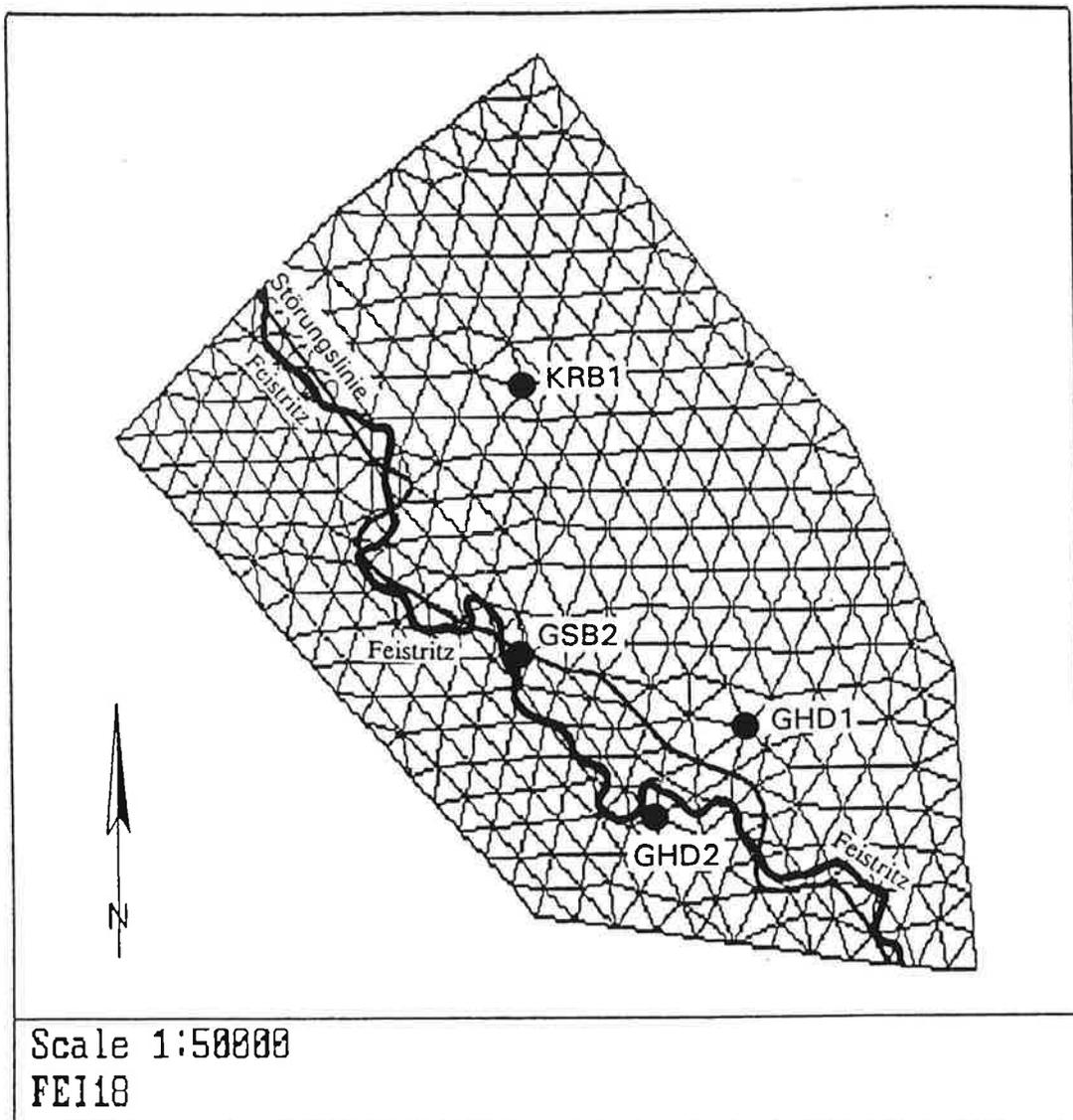


Abb.5.1: Modellgebiet im mittleren Feistritztal.

Über das Modellgebiet wurde ein Dreiecksnetz mit 380 Knoten und 685 Elementen gelegt. Hierbei wurde der aus der geoelektrischen Tiefensondierung bekannte Verlauf einer schwer durchlässigen Störungszone, die den gespannten Grundwasserleiter in zwei Teile gliedert, berücksichtigt. Die Feistritz ist nur zur Angabe der Lage des Modellgebietes im mittleren Feistritztal zusätzlich in Abb.5.1 eingetragen und hat keinen Einfluß auf die durchgeführten Berechnungen. Von größtem Einfluß auf die in der Folge simulierte stationäre Grundwasserströmung ist die Bestimmung stationärer Druckspiegelhöhen an den vier Bohrungen GHD1, GHD2,

GSB2 und KRB1. Von den artesischen Bohrungen GHD1, GHD2 und GSB2 liegen die Werte von mehrjährigen Manometerablesungen vor, und an der Bohrung KRB1 wurden mit einem Schreibpegel über mehrere Jahre Ganglinien der Druckspiegelhöhe aufgezeichnet (vgl. Tab.1.1). Die Höhenlagen der Manometer und der Rohroberkante an der Bohrung KRB1 wurden als Bezugspunkte - durch Hin- und Rücknivellement kontrolliert - auf Zentimeter genau einnivelliert. Die Höhenlagen der Bezugspunkte sind zusammen mit den stationären Druckspiegelhöhen in Tab.5.1 angegeben.

Tab.5.1: Stationäre Druckspiegelhöhen an den Bohrungen im mittleren Feistritzal.

Meßstelle	Kurzbezeichnung	Bezugspunkt [m ü. A.]	keine Entnahme		Entnahme von 4 l/s bei GHD1	
			Meßwert [bar/m]	Druckhöhe [m ü. A.]	Absenkung [m]	Druckhöhe [m ü. A.]
Großhartmannsdorf 1	GHD1	313,55	1,31 bar / + 13,36 m	326,91	~ 10	~ 317
Großhartmannsdorf 2	GHD2	313,20	1,18 bar / + 12,04 m	325,24	5,8	319,44
Großsteinbach 2	GSB2	319,75	0,79 bar / + 8,06 m	327,81	3,5	324,31
Kroisbach 1	KRB1	339,86	-11,6 m	328,26	3,6	324,66

Zur Bestimmung der stationären Druckspiegelhöhen wurde ein Zeitraum ausgewählt, während dessen eine Vielzahl regelmäßiger, an allen Bohrungen vorgenommener Druckspiegelmessungen gut dokumentiert ist und keine Entnahme erfolgte. Am 13.07.1983 endete ein Überlaufversuch an der Bohrung GHD1, und danach ging mehr als ein Jahr lang eine ungestörte Aufspiegelung vor sich, von der wöchentliche bis 14-tägige Meßwerte aller vier Bohrungen vorliegen. Diese Meßwerte wurden halblogarithmisch über die Zeit aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, daß sich in dieser Zeit annähernd stationäre Druckspiegelhöhen an allen vier Bohrungen einstellten. Da ab dem Beginn des Jahres 1985 das an der Bohrung GHD1 montierte Manometer ausfiel, wurden hierfür die näherungsweise stationären Druckspiegelhöhen (Tab.5.1), die den Aufzeichnungen des zweiten Halbjahres 1984 als Mittelwerte entnommen wurden, verwendet.

Die durchgeführten Entnahmeversuche (BERGMANN & SACKL, 1984) ergaben für den Teil östlich der Störungszone, in dem die Bohrungen GHD1 und KRB1 liegen, eine mittlere Transmissivität von etwa $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($\approx 35 \text{ m}^2/\text{Tag}$) und für den Teil

westlich der Störungszone, in dem die Bohrung GHD2 liegt, eine mittlere Transmissivität von etwa $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ($\approx 17 \text{ m}^2/\text{Tag}$). Für die Bohrung GSB2, die ziemlich genau zwischen dem östlichen und westlichen Teil im Bereich der Störungszone liegt, wurde eine Transmissivität von $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt. Da die aufgrund von Entnahmeversuchen berechneten Transmissivitäten einen Mittelwert jener Verteilung der Transmissivität darstellen, die im Umkreis der jeweiligen Bohrung auftritt, entspricht die an der Bohrung GSB2 angegebene Transmissivität keinesfalls der Transmissivität der Störungszone, sondern stellt einen Mittelwert zwischen den östlich und westlich der Störungszone auftretenden Transmissivitäten dar und ist aufgrund der geringen seitlichen Ausdehnung der Störungszone von deren sehr kleiner Transmissivität nur geringfügig beeinflusst.

Bei der nun folgenden Aneichung wurden viele Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen die Transmissivität der Störungszone und die Randbedingungen, insbesondere der Ort und das Ausmaß des seitlichen Randzuflusses, mehrfach variiert und auf diese Weise die berechneten Druckspiegelhöhen den in Tab.5.1 angegebenen Druckspiegelhöhen schrittweise angepaßt wurden. In einem Fall wurde im Zuge der Aneichung auch die Lage des südlichen Randes, an dem eine Dirichlet-Randbedingung mit konstanter Druckspiegelhöhe angenommen wurde, verändert. Zusätzlich wurde die mittlere Transmissivität des östlichen Teiles etwas erhöht, und zwar von $35 \text{ m}^2/\text{Tag}$ auf $42 \text{ m}^2/\text{Tag}$ ($= 4,86 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), und die Transmissivität des westlichen Teils von $17 \text{ m}^2/\text{Tag}$ auf $15 \text{ m}^2/\text{Tag}$ ($= 1,74 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) herabgesetzt. Dies war für eine bessere Anpassung der Druckspiegelhöhen erforderlich und steht durchaus im Einklang mit den Ergebnissen der Entnahmeversuche, da einerseits damit keine größere Abänderung der Werte der Transmissivität erfolgte und andererseits angenommen werden kann, daß der jeweils gegenüber der Störungszone gelegene Teil des Grundwasserleiters über seine Wirkung auf die Ausbildung des Absenkungstrichters und damit auf die Kurve der Wiederaufspiegelung einen geringfügigen Einfluß auf die Ermittlung der Transmissivitätswerte hatte. Die Abweichungen lassen sich damit begründen, daß im östlichen Teil wegen der geringeren Transmissivität des westlichen Teiles die an den Meßstellen GHD1 und KRB1 erhaltenen Transmissivitätswerte geringfügig niedriger ($35 \text{ m}^2/\text{Tag}$ statt $42 \text{ m}^2/\text{Tag}$) und im westlichen Teil aufgrund der höheren Transmissivität des östlichen Teiles den an der Meßstelle GHD2 erhaltenen Transmissivitätswert geringfügig höher ($17 \text{ m}^2/\text{Tag}$ statt $15 \text{ m}^2/\text{Tag}$) erscheinen.

Im Zuge der Aneichung wurde für die mittlere Transmissivität der Störungszone ein Wert von $2 \text{ m}^2/\text{Tag}$ ($= 2,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) erhalten. Zusammen mit der Transmissivitätsverteilung ist die durch Aneichung bestimmte Randverteilung des

seitlichen Randzuflusses (NEUMANN-Randbedingung) in Abb.5.2 angegeben. Da dieses Grundwassermodell sehr sensibel auf eine Änderung der Transmissivitäten und eine Änderung der Größe und des Ortes der Einspeisung reagiert, waren einerseits viele Aneichungsschritte und zum Teil auch nur geringfügige Änderungen der nicht fest vorgegebenen geohydraulischen Parameter im Zuge der Aneichung erforderlich. Andererseits weist diese hohe Sensitivität auch darauf hin, daß die angeeichten Größen mit Hilfe der verwendeten Methode mit relativ großer Zuverlässigkeit bestimmt werden können.

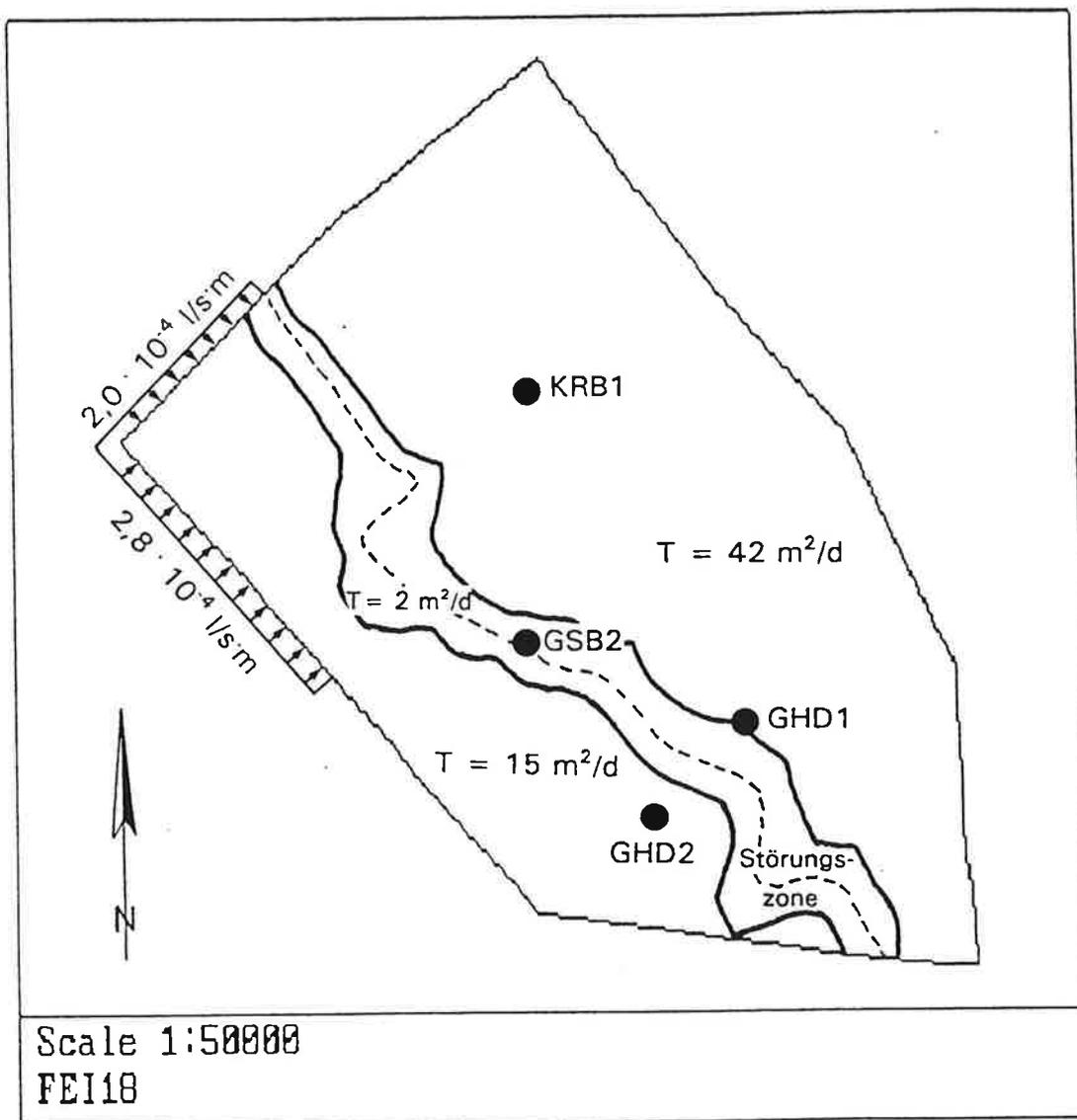


Abb.5.2: Transmissivitätsverteilung und Randzufluß nach erfolgter Aneichung.

In Abb.5.3 ist die mit den angeeichten hydraulischen Parametern berechnete, langfristig stationäre Grundwasserströmung im mittleren Feistritztal für den Fall,

daß keine Entnahme erfolgt, dargestellt. Die Differenzen zwischen den an den Grundwassermeßstellen berechneten und gemessenen (Tab.5.1) Druckspiegelhöhen liegen unter einem Dezimeter.

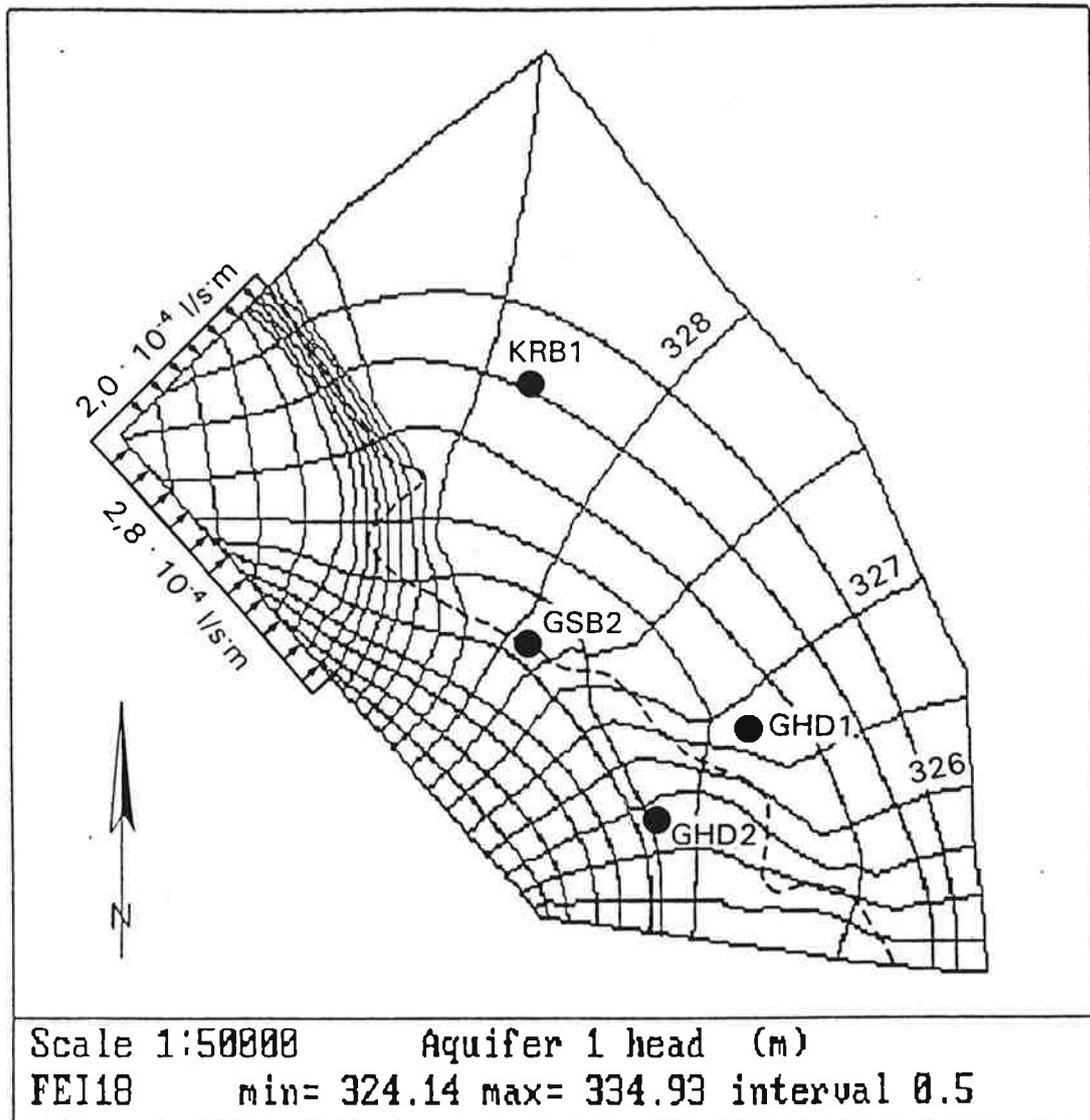


Abb.5.3: Ergebnis der numerischen Simulation der stationären Grundwasserströmung im mittleren Feistritztal ohne Entnahme.

Nach erfolgter Aneicherung für den Fall ohne Entnahme kann nun auch eine Grundwasserentnahme simuliert werden. Hiefür werden die Transmissivitätsverteilung und die Randverteilung des seitlichen Randzuflusses gleichgelassen, die Randzuflußmenge jedoch erhöht. Die Notwendigkeit einer Erhöhung des Randzuflusses ergibt sich einerseits aus den Überlegungen zu Gleichgewichtszuständen gespannter Grundwassersysteme und deren hydraulischen Randbedingungen (Kap.2.1 und 2.2). Andererseits stehen im mittleren Feistritztal einjährige Meßdaten für den Fall

einer näherungsweise gleichbleibenden Grundwasserentnahme aus der Bohrung GHD1 von 4 l/s zur Verfügung. Durch eine Erhöhung des Randzuflusses kann das Grundwassermodell mit Hilfe der Daten der Druckspiegelabsenkung angeeicht werden. Um eine Angleichung der gemessenen (Tab.5.1) und berechneten Druckspiegelhöhen für den Fall einer Grundwasserentnahme von 4 l/s aus der Bohrung GHD1 zu erhalten, ist eine Erhöhung des am Rand des Modellgebietes angesetzten Randzuflusses notwendig, was die in Kap.2 hinsichtlich der Veränderlichkeit der Randbedingungen angestellten Überlegungen nochmals belegt. Die für den Fall einer Dauerentnahmemenge von 4 l/s an der Bohrung GHD1 simulierte Grundwasserströmung im mittleren Feistritztal ist in Abb.5.4 dargestellt.

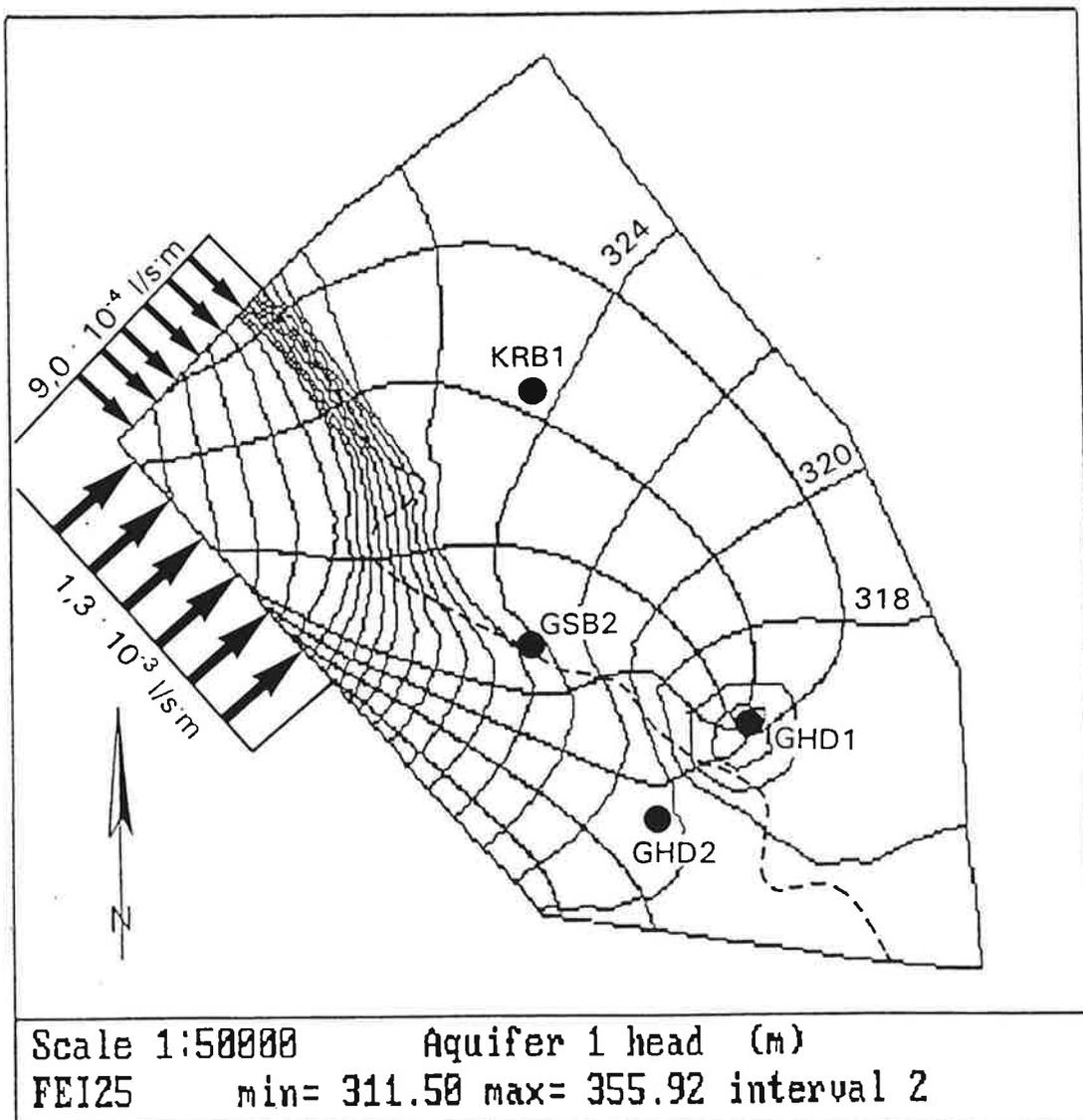


Abb.5.4: Ergebnis der numerischen Simulation der stationären Grundwasserströmung im mittleren Feistritztal bei einer Dauerentnahme von 4 l/s an der Bohrung GHD1 mit Angabe des erhöhten Randzuflusses.

6. Ergebnisse der Untersuchung

Von einem dynamischen Grundwassersystem mit erneuerbaren Grundwasserressourcen kann nach den Definitionen der vorliegenden Arbeit nur gesprochen werden, wenn ein Einspeisungsbereich am Rand des gespannten Grundwassersystems vorliegt, der durch eine erhöhte Einspeisung eine gesteigerte künstliche Entnahmemenge ausgleicht und so bei Entnahme einen neuen Gleichgewichtszustand des Systems bewirkt. Der Nachweis eines in Niederschlagsperioden aktiven Einspeisungsbereiches gelingt für gespannte Grundwassersysteme nur über den Nachweis einer statistischen Abhängigkeit zwischen dem Niederschlag und gemessenen Druckspiegelhöhen. Hiefür ist es nicht maßgeblich, zu unterscheiden, ob infolge des Niederschlages die Einspeisung direkt durch Versickerung des Niederschlagswassers, oder indirekt durch die Hochwasserführung von Bächen und örtliche Infiltration an deren Oberlauf am Beckenrand erfolgt.

Ganglinien der Druckspiegelhöhe gespannter Grundwasserleiter werden nicht nur durch eine Einspeisung beeinflusst, sondern insbesondere auch durch Luftdruckschwankungen. Aus der Elastizität gespannter Grundwasserleiter kann deren Luftdruckwirksamkeit hergeleitet werden, deren Werte für die untersuchten gespannten Grundwasserleiter des Feistritz- und Safentalles mittels einer modifizierten Doppelsummenanalyse berechnet werden können (Tab.2.4). Damit kann der Luftdruckeinfluß quantifiziert und die Ganglinien der Druckspiegelhöhe korrigiert werden. Nach erfolgter Korrektur können die Ganglinien der Druckspiegelhöhe auf einen in ihnen enthaltenen Niederschlagseinfluß überprüft werden. Um eine ähnliche und damit statistisch vergleichbare Niederschlagsgröße zu erhalten, werden die Tagesniederschläge in eine reduzierte Niederschlagssummenlinie verwandelt (Kap.3). Aus Tab.3.3 kann entnommen werden, für welche der untersuchten Meßstellen des Feistritz- und Safentalles mit den verwendeten statistischen Methoden ein Niederschlagseinfluß und damit eine in Feuchtperioden regelmäßig erfolgende Grundwassererneuerung nachgewiesen werden kann. Die untersuchten Meßstationen können demgemäß in drei Gruppen eingeteilt werden, und zwar in solche ohne signifikanten Niederschlagseinfluß, in solche mit schwachem Niederschlagseinfluß und in solche mit deutlichem Niederschlagseinfluß.

Durch Überlegungen zum Aufbau und zur Funktion der untersuchten gespannten Grundwassersysteme und insbesondere durch Klassifikation des Einspeisungsbereiches nach seinem Aufbau und nach seiner Funktion als hydraulische Randbedingung (Kap.2) kann erkannt werden, daß für ein im Gleichgewicht befindliches Grundwassersystem nur ein Typ einer Randbedingung (Typ 1 nach Tab.2.1) in

Frage kommt. Dabei wird die Einspeisungsmenge vom Randbereich gesteuert. Der hydraulisch wirksame Rand eines gespannten Grundwassersystems im Einspeisungsbereich wird hierbei in einer solchen Höhe definiert, daß bis über den Rand rückgestautes Wasser seitlich abfließen kann. Bei einem im Gleichgewicht stehenden Grundwassersystem wird damit nur ein Teil des Niederschlages für eine Erneuerung der Grundwasserressourcen genutzt, der Rest fließt als überschüssiger Zustrom über den hydraulisch wirksamen Rand seitlich ab. Eine erhöhte Grundwasserentnahme hat bei einem im Gleichgewicht befindlichen gespannten Grundwassersystem somit eine erhöhte Einspeisung zur Folge, was sich bei der numerischen Modellierung des Grundwasserleiters im mittleren Feistritztal als eines der hierdurch erhaltenen Ergebnisse auch bestätigte (vgl. Abb.5.2 und Abb.5.4).

Mittels der Luftdruckwirksamkeit kann auch der spezifische Speicherkoeffizient S_0 gespannter Grundwasserleiter bestimmt werden. Der Speicherkoeffizient S_0 gibt die Vorratsänderungen in einem gespannten Grundwasserleiter, die bei einer sich ändernden Druckspiegelhöhe auftreten, an, und bestimmt die Geschwindigkeit instationärer Änderungen der Grundwasserströmung. Der Speicherkoeffizient gespannter Grundwasserleiter liegt in einer völlig anderen Größenordnung als die Porosität n , die die Speicherkapazität ungesättigter Bereiche angibt, woraus erkannt werden kann, daß die Funktion der Zwischenspeicherung einer eingespeisten Wassermenge trotz wesentlich größerer Flächenausdehnung nicht vom gespannten Grundwasserleiter selbst, sondern nur von vorübergehend ungesättigten Randzonen im Einspeisungsbereich wahrgenommen werden kann.

Als Parameter zur Beschreibung des Zustandes und einer Zustandsänderung von gespannten Grundwassersystemen mit erneuerbaren Grundwasserressourcen können für Grundwassermeßstellen mit deutlichem Niederschlagseinfluß die Reaktionszeit ΔT und die Niederschlagswirksamkeit PE bestimmt werden (vgl. Tab.3.3). Die Reaktionszeit ΔT ist die statistisch mittlere, gesamte Zeitdauer zwischen dem Auftreten des Niederschlages und dem dazugehörigen Anstieg der Druckspiegelhöhe. Die Niederschlagswirksamkeit PE gibt das Verhältnis der vom Jahresniederschlag hervorgerufenen jährlichen Summe aller niederschlagsabhängigen Anstiege der Druckspiegelhöhe zum Jahresniederschlag an. Erfolgt eine über das Maß einer zulässigen Dauerentnahmemenge hinausgehende Grundwasserentnahme, tritt ein Abreißen der gesättigten Zone und damit die Ausbildung ungesättigter Zonen im Einspeisungsbereich auf, was eine Vergrößerung der Einspeisungszeit t_E und daher auch eine Vergrößerung der Reaktionszeit ΔT bewirkt. Da damit in diesem Fall kein stationärer Zustand mehr vorliegt und der Einspeisungsbereich gemäß der Klassifikation (Tab.2.1) vom Typ 1 zu einem der

anderen Typen (Typ 2, 3 oder 4) wechselt, treten im Einspeisungsbereich stärkere Spiegelschwankungen auf, die im gespannten Grundwasserleiter im gleichen Ausmaß stärkere Schwankungen der Druckspiegelhöhe bewirken, was wiederum einen Anstieg der Niederschlagswirksamkeit PE hervorruft. Für jene gespannten Grundwassersysteme, bei denen die ständige Erneuerung ihrer Grundwasserressourcen nachgewiesen ist, und die somit für eine langfristige wasserwirtschaftliche Nutzung geeignet erscheinen, können die beiden Parameter ΔT und PE als Referenzmaße für den Ist-Zustand bestimmt werden. Nach Festlegung einer Dauerentnahmemenge auf der Basis eines Dauerentnahmeversuchs und längerfristiger, stärkerer wasserwirtschaftlicher Nutzung (z.B. für eine kommunale Wasserversorgung) können zum Nachweis einer allfälligen Überbeanspruchung des Grundwassersystems (regionale Auswirkungen, länger andauerndes Fortschreiten der Druckspiegelabsenkung, etc.) diese beiden Parameter neuerlich bestimmt werden. Hiefür muß allerdings die Nutzung unterbrochen und es müssen mehrmonatige Ganglinien aufgezeichnet werden. Der Zeitraum zwischen Dezember und April ist dafür allerdings nicht geeignet, da in diesen Monaten Einflüsse von Schneefall und Schneeschmelze auf die gemessenen Druckspiegelhöhen, hervorgerufen durch eine verzögerte Einspeisung je nach Schneelage, auftreten. Ein deutlicher Anstieg sowohl der Reaktionszeit als auch der Niederschlagswirksamkeit weist auf eine längerfristig erfolgte übermäßige Entnahme hin. In diesem Fall muß durch eine entsprechende Verringerung der Entnahmemenge das eingespeiste Grundwassersystem wieder in einen Gleichgewichtszustand übergeführt werden. Ist aber keine deutliche Parameteränderung nachweisbar, so kann davon ausgegangen werden, daß sich keine größeren ungesättigten Zonen im Einspeisungsbereich ausgebildet haben, damit auch kein instationärer Abbauprozess von Grundwasservorräten stattgefunden hat und sich das System daher im Gleichgewichtszustand befindet. Eine Reduktion der Entnahmemenge ist in letzterem Fall nur in dem Ausmaß notwendig, als regionale Auswirkungen oder das Ausmaß der Druckspiegelabsenkung unerwünscht oder inakzeptabel sind (Beeinträchtigung anderer Grundwassernutzer, Schwierigkeiten bei der Grundwasserförderung, etc.). Von einer längerfristigen, größeren Nutzung gespannter Grundwässer, deren Einspeisung nicht nachgewiesen werden kann, ist - ausgenommen in Krisenfällen - generell abzuraten.

In den Kapiteln 4 und 5 wird die eingehende Untersuchung der Grundwasservorkommen im mittleren Feistritztal beschrieben. In diesem Bereich erfolgt keine Aussickerung aus dem gespannten, tertiären Grundwasserleiter, und neben den gefundenen Randbedingungen kann die Grundwasserströmung des gespannten

Grundwasserleiters in diesem Gebiet dargestellt werden (Abb. 5.3 und 5.4). In der Mitte des Gebietes liegt eine schwer durchlässige Störungszone vor. Die Einspeisung erfolgt vom Nordwesten her, und die Größe der Einspeisung ist von der Entnahmemenge abhängig. Der Durchfluß durch den Grundwasserleiter im Bereich der Bohrung KRB1 ist eher gering. Dies und der Verlauf der Stromlinien in diesem Bereich weisen darauf hin, daß die Ausdehnung des gespannten Grundwasserleiters östlich der Bohrung KRB1 gering ist. Für den gespannten Grundwasserleiter im mittleren Feistritztal kann jedenfalls eine ständig erneuerte und damit zulässige Dauerentnahmemenge von mindestens 4 l/s festgelegt werden. Der seichtliegende quartäre Grundwasserleiter ist aus mehreren Gründen für die kommunale Wasserversorgung auch in nächster Zukunft nicht verwendbar und wurde aus diesem Grund bezüglich seiner Erneuerung und seiner Grundwasserströmung nicht weiter untersucht.

Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, daß diese Untersuchung nur durch eine überwiegend von der wasserwirtschaftlichen Planung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung vorgenommene entsprechende Einrichtung und mehrjährige Beobachtung von Meßstellen gespannter Grundwasserleiter im Feistritz- und Safental möglich war. Für eine Analyse von gespannten Grundwassersystemen müssen neben meteorologischen Daten langzeitliche Ganglinien der Druckspiegelhöhe vorliegen, wobei Monatsschreibstreifen regelmäßig gewechselt und bei jedem Austausch mit Eichmarken zur zeitlichen und höhenmäßigen Kontrolle versehen werden müssen. Inwieweit in Zukunft Druckmeßsonden mit elektronischen Datenspeichern oder ähnliche Meßsysteme kostenmäßig und bezüglich ihrer Wartungsfreundlichkeit mit konventionellen Schreibgeräten konkurrieren und auch bei artesischen Meßstellen Verwendung finden können, bleibt abzuklären.

Literaturverzeichnis

- ANDREWS J.N., BALDERER W., BATH A.H., CLAUSEN H.B., EVANS G.V., FLORKOWSKI T., GOLDBRUNNER J.E., IVANOVICH M., LOOSLI H. & ZOJER H. (1983). Environmental isotope studies in two aquifer systems: A comparison of groundwater dating methods. *Isotope Hydrol.* 1983, IAEA-SM-270/93, S.535-576, IAEA, Wien.
- ARSENAL (1982). Bericht über die Bohrlochmessungen im Feistritztal. Bundesversuchs- u. Forschungsanstalt Arsenal, Wien.
- ATLAS DER STEIERMARK (1970). Steiermärkische Landesregierung unter Mitarbeit des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark, Akademische Druck- u. Verlagsanstalt, Graz.
- BEAR J. & VERRUIJT A. (1987). Modeling groundwater flow and pollution. Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, Holland.
- BERGMANN H. (1980). Probleme bei der hydraulischen Beurteilung von geothermisch beeinflussten Tiefenwasservorkommen. Vortrag bei der Gesellschaft f. Strahlenforschung, München.
- BERGMANN H. & SACKL B. (1984). Bericht über die Auswertung der Druckspiegelmessungen an den Artesern des Feistritztales für die Jahre 1983 und 1984. Im Auftrag d. Amtes d. Steiermärk. Landesregierung, Ref. f. wasserwirt. Rahmenplanung, Graz, unveröffentlicht.
- BERGMANN H. & ÜBERWIMMER F. (1992). Die Untersuchung der gespannten Grundwässer im Raume Grafendorf-Seibersdorf (Oststeiermark). Band 74, Bericht d. wasserwirt. Planung, Amt d. Steierm. Landesreg., Graz.
- BERNHART L. (1972). Zur Problematik der Wasserversorgung aus artesischen Brunnen. Bericht der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung 21, Untersuchungen an artesischen Wässern in der nördlichen Oststeiermark, S.7-20, Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung beim Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
- CARSLAW H.S. & JÄGER J.C. (1959). Conduction of heat in solids. Oxford Univ. Press, London.
- CASTANY G. & MARGAT J. (1977). Dictionnaire francais d'hydrogéologie. BRGM, Orléans.
- CLARK W.E. (1967). Computing the barometric efficiency of a well. *J. Hydraul. Div.* 93, HY4, S.93-98, Proc. Am. Soc. Civ. Engng.
- DARCY H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Victor Dalmont-Verlag, Paris, zit. in MARSILY (1986).

ANSCHRIFTEN DER VERFASSEN

O.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Heinz Bergmann

Technische Universität Graz
Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie
8010 Graz, Mandellstraße 9/I

Stud.Ass. Andreas Lettowsky

Technische Universität Graz
Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie
8010 Graz, Mandellstraße 9/I

Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Franz Überwimmer

Technische Universität Graz
Institut für Hydromechanik, Hydraulik und Hydrologie
8010 Graz, Mandellstraße 9/I

- DUPOUIT J. (1863). Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. 2eme edition, Dunot, Paris, zit. in MARSILY (1986).
- DVWK SCHRIFTEN 81 (1987). Erkundung tiefer Grundwasserzirkulationssysteme. Grundlagen und Beispiele. Schriftenr. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Parey, Hamburg.
- ENGELEN G.B. & JONES G.P. (1986). Developments in the analysis of groundwater flow systems. IAHS-Publ. 163, IAHS Press, Wallingford.
- FERRIS J.G., KNOWLES D.B., BROWN R.H. & STALLMAN R.W. (1962). Theory of Aquifer Tests. Geol. Surv. Water-Supply P. 1536-E, US Dep. Geol. Survey, Washington.
- FETH J.H. (1964). Hidden recharge. Ground Wat. 2, S.14-17.
- FURBISH D.J. (1991). The response of water level in a well to a time series of atmospheric loading under confined conditions. Wat. Resour. Res. 27, Nr.4, S.557-568.
- HEMKER C.J. & ELBURG H. (1987). Micro-Fem user's manual, version D.2.0. Elandsgracht 83, 1016 TR Amsterdam.
- JACOB C.E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Transactions American Geophysical Union, Reports and Papers Hydrol., S.574-586.
- MARSILY G.de (1986). Quantitative hydrogeology. Academic Press, London.
- ÖNORM B2400 (1986). Hydrologie; Hydrographische Fachausdrücke und Zeichen. Österr. Normungsinstitut, Wien.
- ÖWWV (1986). Tiefengrundwässer und Trinkwasserversorgung. ÖWWV-Regelblatt 202, Regeln des Österreichischen Wasser-wirtschaftsverbandes, Wien.
- PINDER G.F. & GRAY W.G. (1977). Finite element simulation in surface and subsurface hydrology. Academic Press, London.
- PRZEWLOCKI K. (1975). Hydrologic interpretation of the environmental isotope data in the Eastern Styrian Basin. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 27, S.85-133, Graz.
- ROJSTACZER S. (1988). Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading. Wat. Resour. Res. 24, Nr.11, S.1927-1938.
- RONNER F. & SCHMIED J. (1968). Raubbau an artesischem Wasser in der Ost steiermark. Steir. Beitr. z. Hydrogeologie 20, S.63-80, Techn. Hochschule Graz.

- SCHMID CH. (1982a). Geoelektrische Tiefensondierungen im mittleren Feistritztal. Inst. f. Prospektion, Lagerstättenerschließung und Mineralwirtschaft, Montanuniversität Leoben.
- SCHMID CH. (1982b). Lithologische Untersuchungen des artesischen Grundwasserkörpers im mittleren Feistritztal (Oststeiermark). Inst. f. Angew. Geophysik, Forschungsgemeinschaft Joanneum, Leoben.
- TERZAGHI K. (1925). Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Deuticke-Verlag, Leipzig, zit. in MARSILY (1986).
- WANG H.F. & ANDERSON M.P. (1982). Introduction to groundwater modeling. Finite Difference and Finite Element Methods. Freeman, San Francisco.
- WILSON L.G., de COOK K.J. & NEUMAN S.P. (1980). Recharge from irrigation return flows. WRRRC.
- ZETINIGG H. (1982). Die artesischen Brunnen im steirischen Becken. Mitt. Abt. Geol. Paläont. Bergb. Landesmus. Joanneum 34, Graz.
- ZETINIGG H. (1983). Die Erschließung von gespanntem und artesischem Grundwasser. Gas/Wasser/Wärme 37, Nr.5, S.153-164.
- ZETINIGG H. (1987). Der Schutz artesischer Grundwässer am Beispiel des Steirischen Beckens. Bericht der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung 68, Beiträge zur Kenntnis der artesischen Wässer im Steirischen Becken, S.131-180, Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung beim Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
- ZOJER H. (1987). Gespannte Grundwässer der pannonen Schichtfolge im unteren Feistritz- und Safental. Bericht der Wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung 68, Beiträge zur Kenntnis der artesischen Wässer im Steirischen Becken, S.3-129, Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung beim Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.
- ZÖTL J.G. (1983). Tiefengrundwässer im Oststeirischen Becken (Österreich). Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, H.134, Hannover.

OBERFLÄCHENGEOPHYSIKALISCHE MESSUNGEN
ZUR LITHOLOGISCHEN GLIEDERUNG
DES ARTESISCHEN GRUNDWASSERKÖRPERS
IM MITTLEREN FEISTRITZTAL (OSTSTEIERMARK)

E. Niesner

und

Ch. Schmid

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	83
2. Durchführung der geoelektrischen Tiefensondierung	84
3. Fazielle Änderungen im tieferen Aquifer des mittleren Feistritztales	86
4. Erste Ergebnisse der Ergänzungsmessungen mit der Methode der Induzierten Polarisation entlang des geoelektrischen Profils III	87
5. Zusammenfassung	89
6. Literaturverzeichnis	95

Verzeichnis der Abbildungen

Abb.1: Lage der geoelektrischen Tiefensondierungspunkte und des IP - Profiles	91
Abb.2: Geoelektrische Tiefensondierung - Profil 3	92
Abb.3: Gegenüberstellung geoelektrischer Tiefensondierungsergebnisse und geophysikalischer Bohrlochmessungen	93
Abb.4: Ergebnisse der IP - Messungen (Widerstandsprofil des Polarisationseffektes)	94

1. Einleitung

In den Grundwasserhorizonten des mittleren Feistritztales treten lokal impermeable Zonen auf, sodaß einzelne regionale Bereiche hydraulisch nicht miteinander kommunizieren können. Dies konnte bei der Auswertung von Pumpversuchen an den in diesem Gebiet abgeteuften Aufschlußbohrungen für die Grundwassererkundung festgestellt werden.

Aus den Bohrprofilen der in diesem Abschnitt des Feistritztales abgeteuften Bohrungen (Kroisbach, Großhartmannsdorf 1 und Großsteinbach) ist ersichtlich, daß in einer Tiefe zwischen 50 und 70 m ein geringmächtiger wasserführender Sand- oder Kieskörper in die tertiären Tone und Schluffe eingelagert ist. Südlich dieses Talabschnittes liegen die Bohrung Obgrün I und II, an denen wasserführende Kiese und Sande bereits in Tiefen von 20 m angetroffen wurden. Für weiterführende hydrologische Untersuchungen, etwa eine Simulation, war daher die Frage von Bedeutung, ob es sich bei den durch die Bohrungen im mittleren Feistritztal nachgewiesenen Sand- und Kieshorizonte in unterschiedlichen Tiefenlagen um ein- und denselben Grundwasserspeicher handelt.

Um dies zu untersuchen, wurde der Einsatz von oberflächengeophysikalischen Methoden beschlossen. In der ersten Projektphase wurde mit geoelektrischen Tiefensondierungen gearbeitet. Es ist bekannt, daß mittels Geoelektrik und ergänzender Laboruntersuchungen sowohl auf die Porosität von wassergefüllten Sanden und Kiesen geschlossen werden kann, wie auch Rückschlüsse auf den Tongehalt innerhalb einzelner Horizonte gemacht werden können. Absolutwerte dieser Größen können daraus aber nicht bestimmt werden.

Die Tiefenlage der einzelnen Horizonte kann ebenfalls unter gewissen Voraussetzungen mit der geoelektrischen Tiefensondierung ermittelt werden. Die Problematik für die geoelektrische Tiefensondierung liegt bei diesen Untersuchungen nicht in der Untersuchungstiefe, sondern in der zum Teil geringen Mächtigkeit der grundwasserführenden Sande und Kiese. Aus diesem Grund wurde auch auf den zusätzlichen Einsatz der Refraktionsseismik verzichtet, da hier mit dem Auftreten von Blindzonen

gerechnet werden muß. Bei der Geoelektrik hingegen schien durch den vergleichenden Einsatz verschiedener Rechenprogramme für die Ermittlung der Schichtmächtigkeiten und wahren Widerstände aus den geoelektrischen Tiefensondierungskurven und durch das Vorhandensein der zahlreichen, gut dokumentierten Aufschlußbohrungen, an denen die Tiefensondierungskurven geeicht werden konnten, eine gewisse Chance gegeben, die Aufgabenstellung lösen zu können.

Testmessungen an den Bohrungen und eine interaktive Auswertung zeigten, daß mit einer Geoelektrik in Profilform eine entsprechende Gliederung in der Lithologie sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu erhalten ist.

2. Durchführung der geoelektrischen Tiefensondierung

Eine erste Feldmeßkampagne startete nach den Testmessungen an den Bohrungen im Herbst 1981. Die Auswertung der Profile schien so erfolgversprechend, sodaß beschlossen wurde, das gesamte Meßprogramm durchzuführen, um auch die Möglichkeit zu haben, die Ergebnisse kartenmäßig darzustellen.

Insgesamt wurden 60 geoelektrische Tiefensondierungspunkte mit AB/2 215 m gemessen und ausgewertet. Ein Großteil der Meßzeit fiel in eine vorwinterliche Schönwetterperiode. Die Ergänzungsmessungen wurden im Frühjahr des folgenden Jahres gemessen. Um allfällige Änderungen in den Widerständen der oberflächennahen Schichten berücksichtigen zu können, wurden einzelne Meßpunkte der Herbstmeßkampagne neuerlich gemessen und berechnet. Sämtliche Mittelpunkte der geoelektrischen Tiefensondierungen wurden der Lage und Höhe nach mit der für geophysikalische Untersuchungen notwendigen Genauigkeit eingemessen.

Für die Auswertung der Tiefensondierungskurven wurde vorerst ein interaktives Rechenprogramm vom Geological Survey-Denver/Colorado verwendet. Begonnen wurde mit der Auswertung und Interpretation mit jenen Meßkurven, die in unmittelbarer Umgebung der vorhandenen Aufschlußbohrungen gemessen wurden. Nach einer entsprechenden lithologischen Zuordnung der Widerstandswerte wurde Punkt für Punkt das Tiefensondierungsprofil konstruiert. Für die lithologische Zuordnung der

Widerstandswerte standen geophysikalische Bohrlochmessungen von H. Janschek zur Verfügung. Durch das Vorhandensein eines Widerstandslogs war eine exakte Identifikation derartig geringmächtiger geologischer Einheiten in größeren Tiefen mittels geoelektrischer Tiefensondierungen teilweise möglich.

Die ersten Versuche, eine Karte der Widerstandsverteilung von den grundwasserführenden Sanden und Schottern zu konstruieren, scheiterten an der unterschiedlichen vertikalen Gliederung der errechneten Ergebnisse der einzelnen Tiefensondierungskurven. Einerseits waren die Widerstandsänderungen im Bereich des Aquifers relativ gering, andererseits war es nicht immer möglich, exakt die Ober- und Unterkante der grundwasserführenden Sande und Kiese zu bestimmen. Bei derart geringen Mächtigkeiten kommt es manchmal zu einem schleifenden Übergang zwischen den einzelnen Schichtwiderständen.

Um über diesen Abschnitt des mittleren Feistritztales dennoch eine flächenhafte Widerstandsverteilung des Aquifers zu erhalten, wurden sämtliche Profile überarbeitet. Fehlende Widerstandswerte infolge zu geringer Mächtigkeit der wasserführenden Kiese wurden rechnerisch aus den Widerstandswerten der benachbarten Meßkurven interpoliert. Im Anschluß daran wurden sämtliche Widerstände der wasserführenden Sande und Kiese und die dazugehörigen Schichtmächtigkeiten aufgelistet und gewichtet gemittelt. Dabei zeigte sich erstmals eine eindeutige zonare Verteilung in den Widerständen der artesischen Horizonte des mittleren Feistritztales. Da die Widerstandsänderungen nicht sprunghaft, sondern allmählich erfolgen, kann auf eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme der Feinfraktion in den Sand-Kies-Körpern geschlossen werden. Die in der Karte eingetragene lithologische Grenze zwischen nieder- und höherohmigen Bereich wurde einerseits nach diesen Mittelwerten festgelegt, andererseits wurden auch die Ergebnisse einer ersten hydrologischen Auswertung mit einbezogen.

3. Fazielle Änderungen im tieferen Aquifer des mittleren Feistritztales

Sowohl die geoelektrische Tiefensondierung an der Bohrung Großhartmannsdorf 2 als auch das Widerstandslog weisen in einer Tiefe zwischen 40 und 60 m einen niederohmigen Horizont aus (Abb. 2 und 3). Aus der Cuttingsanalyse weiß man aber, daß es sich um einen wasserführenden Sandhorizont handelt, der auch verfiltert ist und mittels Pumpversuch getestet wurde. Die im Hangenden dieses Aquifers anstehenden schluffigen Tone weisen hingegen einen höheren Widerstand auf. Der Schichtwiderstand der Liegendtone zeigt dagegen den erwarteten niedrigen Widerstand. Hier nähert man sich den Grenzen der Computerauswertung. Jener Kurventyp, wo die Schichtwiderstände allmählich kleiner werden, ist besonders schwierig aufzulösen. Das Vorhandensein des Bohrprofiles war hier für die lithologische Zuordnung unumgänglich.

Gegen die Bohrung Großhartmannsdorf 1 steigen aber die Schichtwiderstände in diesem an den Tiefensondierungspunkten ausgewiesenen Sanden allmählich deutlich an, woraus geschlossen werden kann, daß dieser Horizont zunehmend grobklastisch wird.

Somit konnte durch diese geoelektrischen Tiefensondierungen an den Querprofilen diese Faziesänderung im Aquifer erstmals nachgewiesen werden. Wäre dieses Profil vor dem Abteufen der Bohrung Großhartmannsdorf 2 vorgelegen, hätte man den Ansatzpunkt dieser Bohrung mit Sicherheit weiter gegen NE versetzt.

Außerdem nimmt die Mächtigkeit der grundwasserführenden Sande und Kiese ebenfalls allmählich zu, und liegt an der Bohrung Großhartmannsdorf 1 nur noch in Tiefen um 20 m. Gegen Ende dieses Profiles scheint dieser Horizont aber allmählich auszukeilen. Dieser Trend war auch an den übrigen Querprofilen in diesem Abschnitt des Feistritztales festzustellen.

Um die hydrologischen Zusammenhänge zwischen der Bohrung Kroisbach im Norden und den beiden Bohrungen Obgrün im Süden des Untersuchungsgebietes darstellen zu können, wurde die auf die bereits beschriebene Art und Weise ermittelte Faziesgrenze flächenhaft dargestellt.

Geht man von der Annahme aus, daß die in Abb. 1 eingetragene Grenze auf eine Zu- bzw. Abnahme der Feinfraktion in den grundwasserführenden Sanden und Kiesen hinweist, so sieht man, warum einzelne Bohrungen auf den Überlaufversuch der Bohrung Kroisbach nicht reagierten. Es zeigt sich, daß Bohrungen im "Mühlviertel", die sich im Privatbesitz befinden, sowie die Bohrung Großsteinbach und Großhartmannsdorf 2 in jenem Teil des Feistritztales liegen, wo der Grundwasserkörper eine wesentlich geringere Durchlässigkeit aufweist. Die Bohrungen Kroisbach, Großhartmannsdorf 1, Obgrün I und Obgrün II liegen in einem höherohmigen Teil des Feistritztales. Daß jedoch die Bohrung Obgrün I und II auf die Überlaufversuche der Bohrung Kroisbach nicht reagierten, ist darauf zurückzuführen, daß es sich außerdem bei dem an den Bohrungen Obgrün I und II erbohrten Grundwasserkörper um ein höheres, vermutlich zwischen den Bohrungen von Großhartmannsdorf und Obgrün beginnendes Grundwasserstockwerk handelt. Das eigentliche tiefer liegende Grundwasserstockwerk wurde an den Bohrungen Obgrün nicht erreicht. Dies zeigen die ebenfalls vorliegenden Tallängsprofile sehr deutlich.

4. Erste Ergebnisse der Ergänzungsmessungen mit der Methode der Induzierten Polarisation entlang des geoelektrischen Profils III

Da sich die Auswertung und Interpretation der geoelektrischen Tiefensondierungen aus den Jahren 1981 bzw. 1982 im Grenzbereich dieser Methodik bewegt, wurde unter anderem im Zuge eines Forschungsprojektes ("Geophysik der Erdkruste"/Teilprojekt StA 60/84, E.NIESNER & F.WEBER, 1985) das Profil III mit der Methode der Induzierten Polarisation weitgehend nachgemessen, um eben die durch die Geoelektrik ausgewiesene lithologische oder fazielle Grenze zu verifizieren. Auch für die Induzierte Polarisation erwiesen sich die beiden Bohrungen am Profil als hilfreich. Die IP-Messung liefert neben dem elektrischen Widerstand als zusätzlichen Parameter die Polarisierbarkeit des Untergrundes. Dadurch sind aus IP-Messungen weitergehendere Aussagen als mit geoelektrischen Messungen, bei denen vorwiegend mit Gleichstrom gearbeitet wird, möglich. Ursache für die in Sedimenten auftretenden Polarisationserscheinungen ist der Membranpolarisationseffekt. Dieser Effekt tritt dann bevorzugt auf, wenn in den Poren bzw. Kapillaren der Sedimente Tone eingelagert sind. Durch diese IP-Effekte können auch sehr geringe Vertonungen, die den elektrischen Widerstand einer

Formation noch nicht entscheidend beeinflussen, aber für die Permeabilität eines Horizontes von größter Wichtigkeit sind, nachgewiesen werden. Reine Sande und Tone haben hingegen sehr geringe Polarisierbarkeiten. Damit schien das IP-Verfahren für die hier vorliegende Fragestellung, bei der es um die Lokalisierung von Zonen mit guter und schlechter Permeabilität geht, gut geeignet.

Die Lage des IP-Profiles ist in Abb. 1 eingezeichnet. Die Elektrodenkonfiguration und die Meßpunktabstände wurden so gewählt, daß eine bessere laterale Auflösung als mit den Tiefensondierungen erwartet werden kann. Es wurde vorwiegend mit einer Dipol-Dipol-Anordnung mit einem Elektrodenabstand von 10 m und einem Meßpunkt-
abstand von 20 m gearbeitet.

Die Ergebnisse von Dipol-Dipol IP-Messungen werden üblicherweise in der Form von Pseudosektionen dargestellt. Die wahre Tiefe der Schichtgrenzen kann aus diesen Pseudosektionen noch nicht abgelesen werden. Um nun zu den tatsächlichen Tiefenwerten zu können, wurden die Pseudosektionen weiter bearbeitet. Nach L.S.EDWARDS (1977) läßt sich für jede Elektrodenkonfiguration eine effektive Eindringtiefe berechnen. Damit ergibt sich eine Darstellung, in der die tatsächliche Tiefe der geologischen Schichtgrenzen und damit auch deren Einfallen wiedergeben wird.

Die Meßergebnisse sowohl der Polarisierbarkeit als auch des elektrischen Widerstandes entlang dieses Profiles sind in Abb. 4 dargestellt und zeigen ein ähnliches Bild wie die oberflächennahen Bereiche des Tiefensondierungsprofiles. Oberflächennah zeigt sich eine höherohmige Sand- und Kiesschicht, deren Mächtigkeit in Richtung der Bohrung GH2 zunimmt. Die Widerstände dieser Schicht erreichen in der Nähe des Feistritzflusses die höchsten Werte. Aufgrund der Widerstandswerte in diesem Horizont kann angenommen werden, daß diese Schicht grundwasserführend ist und damit ein oberflächennahes, zur Zeit nicht genutztes Grundwasserstockwerk vorhanden ist. Im Liegenden dieser Kiesschicht nehmen die Widerstände rasch auf Werte unter 50 Ohm.m ab. Diese Widerstände entsprechen Schluffen oder Tonen. Deutlich ist in diesem Profil erkennbar, daß diese Schluffe und Tone zwischen den Profilmarkierungen 500 und 750 m an die Oberfläche heranreichen. Dieses Strukturhoch der Tone und Schluffe stimmt lagemäßig mit der durch die geoelektrische Tiefensondierung 1981

prognostizierten lithologischen Grenze zusammen. Diese laterale Inhomogenität stellt somit einen weiteren Anhaltspunkt über das Vorliegen einer lithologischen Grenze dar.

Auch die Meßergebnisse der Polarisierbarkeit entlang dieses Profils zeigen ein ähnliches Bild. Auffallend ist, daß im Bereich der Bohrung GH1 die höchsten Polarisierbarkeiten auftreten. Sowohl die höherohmigen Sande bzw. Kiese als auch die niederohmigen Bereiche von Schluffen und Tonen zeigen in Übereinstimmung mit der Theorie niedrige Polarisierbarkeiten. Auch bei diesem Profil ist eine deutliche Zweiteilung erkennbar. Ein Vergleich mit dem vorliegenden älteren Profil zeigt gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen.

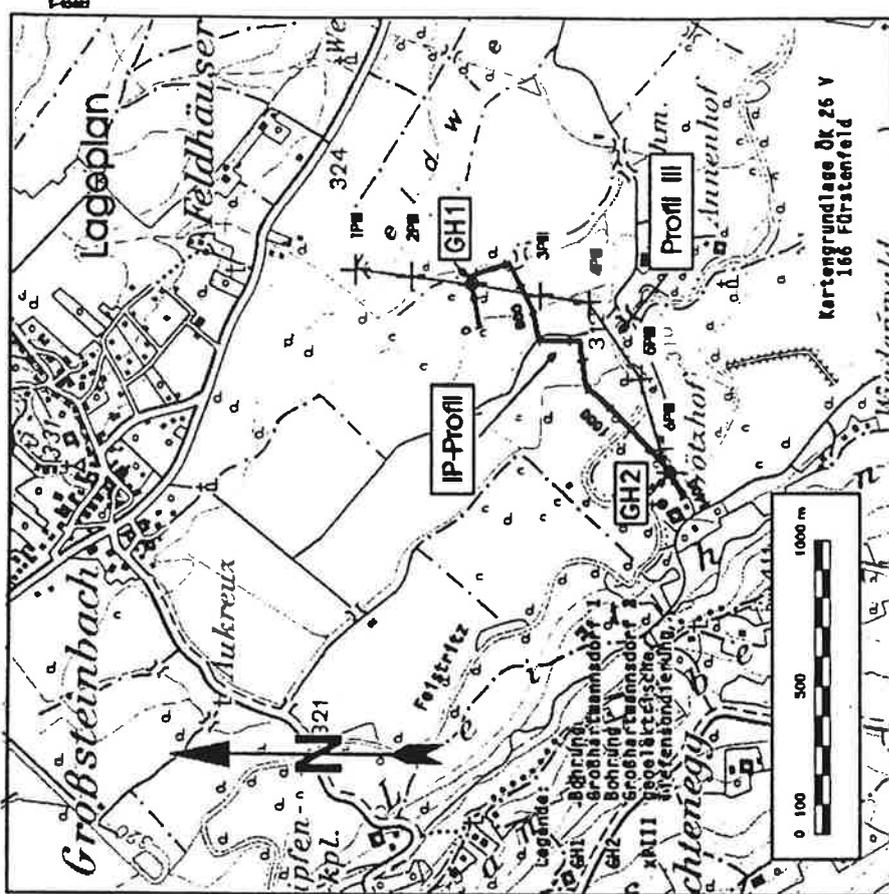
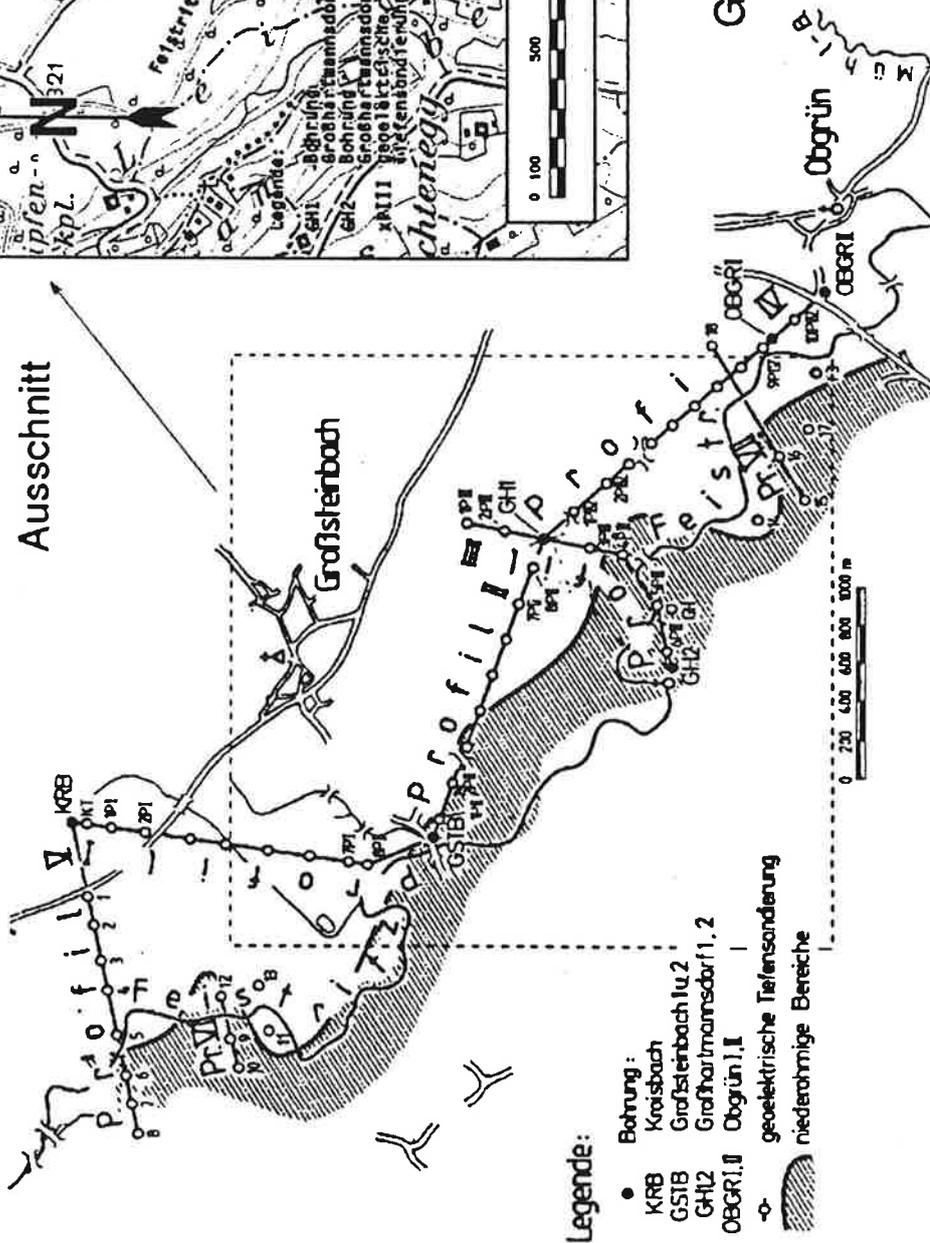
5. Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchungen war es, möglichst genaue Informationen über den Bereich zwischen den beiden Bohrungen Großhartmannsdorf 1 und 2 (GH1 und GH2) zu erhalten, da neben anderen Bohrungen in diesem Gebiet auch bei diesen beiden Bohrungen bei Pumpversuchen keine hydraulische Kommunikation der Grundwasserleiter festgestellt werden konnte und damit das Vorliegen einer inpermeablen Zone bzw. einer lithologischen Grenze zwischen diesen beiden Bohrungen angenommen werden mußte. Diese inpermeable Zone bzw. die Permeabilitätsverhältnisse der Grundwasserleiter in diesem Bereich des Feistritztales wurden ursprünglich mit geoelektrischen Tiefensondierungen untersucht. Dabei konnte erstmals diese vermutete Grenze auskartiert werden. Um die damals aufgestellte Vermutung zu erhärten, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes das Verfahren der Induzierten Polarisierung eingesetzt. Mit diesem Verfahren läßt sich zusätzlich zum elektrischen Widerstand des Untergrundes auch dessen Polarisierbarkeit bestimmen. Die Polarisierbarkeit gibt nun, wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben, einen Aufschluß über die Permeabilität der Horizonte. Weiters lassen sich über die Messung der Polarisierbarkeit auch geringmächtigere Horizonte als mit den Widerstandsmessungen auflösen, wenn ein entsprechender Kontrast in den Polarisierbarkeiten vorliegt.

Zusätzlich lagen auch bei der Bohrung GH2 Bohrlochmessungen vor, die ebenfalls in die Interpretation eingebunden wurden.

Die Permeabilitäten der einzelnen Horizonte ändern sich auf dem Profil sehr rasch und mit den Messungen konnte bestätigt werden, daß bei den tieferliegenden Horizonten keine hydraulische Verbindung zwischen den beiden Bohrungen vorliegt. Etwa in der Mitte des Profiles bei 600 m reichen die tertiären Tone und Kiese sehr nahe an die Oberfläche, sodaß auch der oberflächennahe Aquifer in diesem Bereich eine verminderte Durchlässigkeit besitzt. Mit Hilfe der geoelektrischen Tiefensondierungen und im speziellen mit der IP-Messung war es daher gut möglich, die lithologischen Informationen von den Bohrungen auf ein größeres Gebiet zu extrapolieren.

Gesamtlageplan der geoelektrischen Messungen
im mittleren Feistritztal



Gegenüberstellung von IP-Profil
und Geoelektrikprofil III

Stand: Jänner 93

Abb. 1: Lage der geoelektrischen Tiefensondierungspunkte und des IP - Profiles

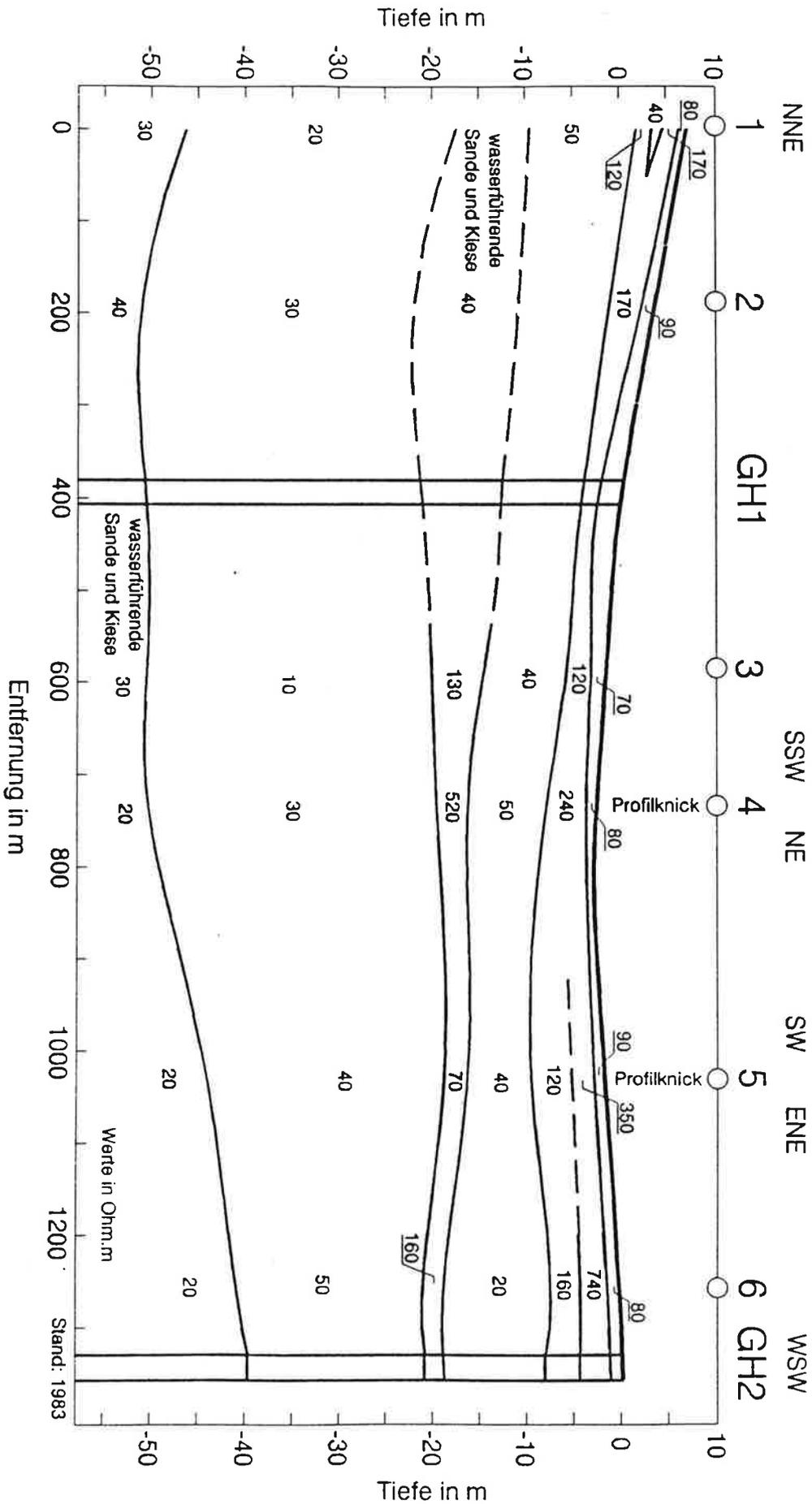


Abb. 2: Geoelektrische Tiefensondierung - Profil 3

Bohrlochmessungen in der Bohrung Großhartmannsdorf 2

Ausschnitt aus Profil III der Geoelektrik

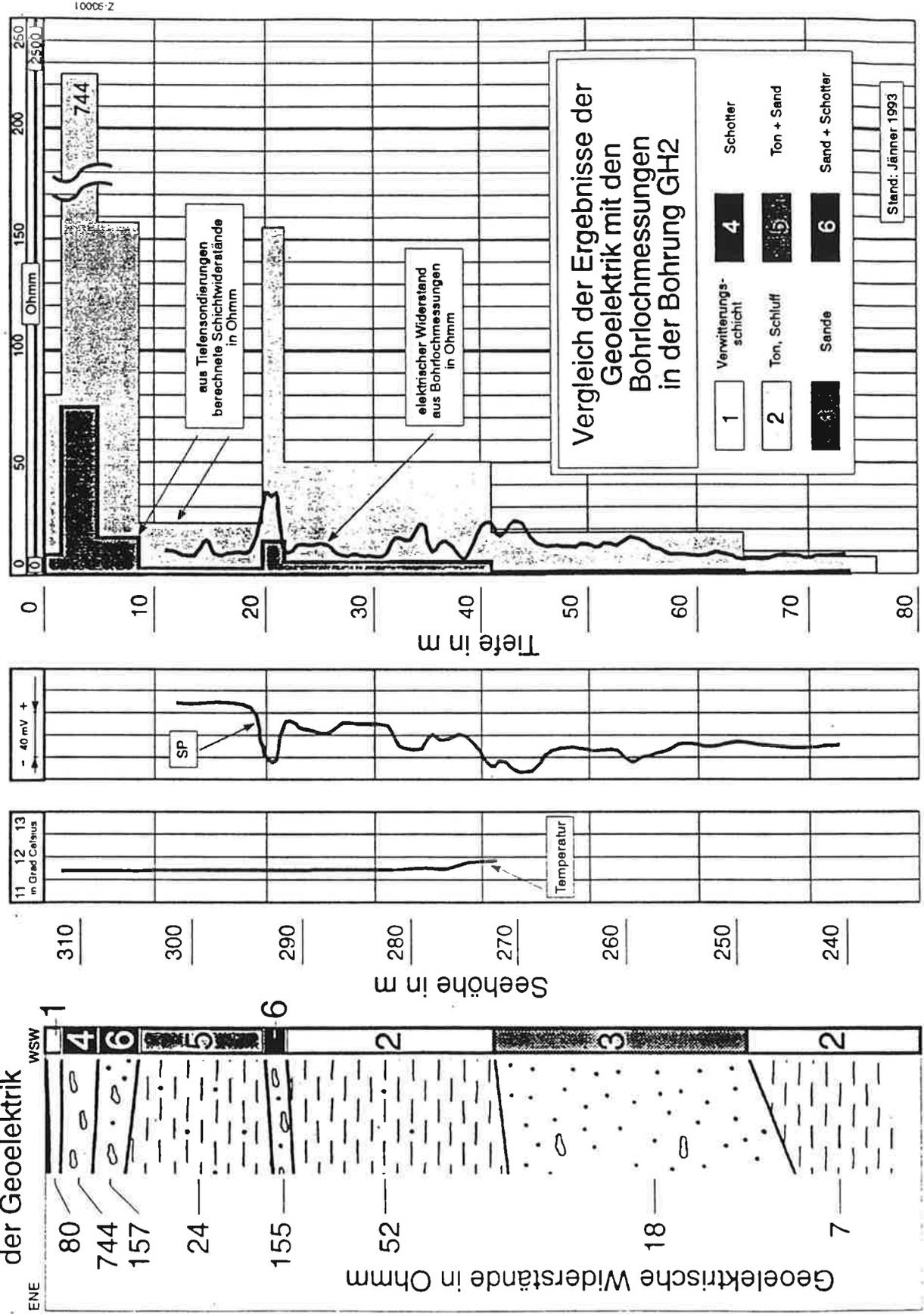


Abb. 3: Gegenüberstellung geoelektrischer Tiefensondierungsergebnisse und geophysikalischer Bohrlochmessungen

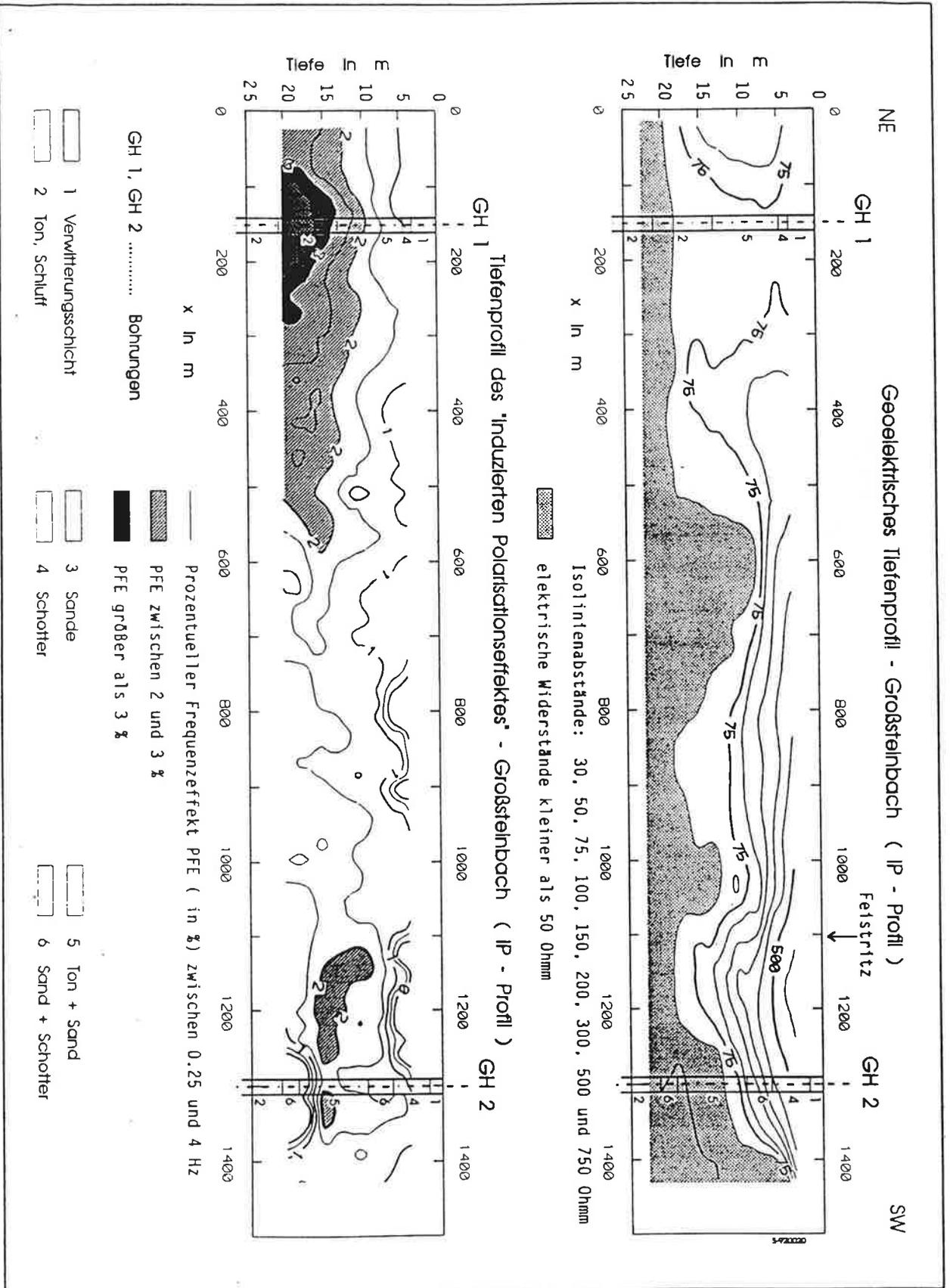


Abb. 4: Ergebnisse der IP - Messungen (Widerstandsprofil und Profil des Polarisierungseffektes)

6. Literaturverzeichnis

EDWARDS, L.S. (1977): A modified pseudosection for resistivity and IP, *Geophysics*, 42, 1020-1036

JANSCHKE, H. (1981): Bericht über die geophysikalischen Bohrlochmessungen in den Bohrungen Kroisbach und Großhartmannsdorf 2/Stmk., unveröff. Bericht

NIESNER, E. & F.WEBER (1985): Anwendung der Induzierten Polarisation auf nichtmetallische Materialien, unveröff. Projektendbericht, Geophysik der Erdkruste, Teilprojekt StA 60/84

SCHMID, Ch. (1982): Lithologische Untersuchungen des artesischen Grundwasserkörpers im Mittleren Feistritztal (Oststeiermark), unveröff. Bericht

ANSCHRIFTEN DER VERFASSER

Dipl.-Ing. Dr. Erich Niesner

Institut für Geophysik
Montanuniversität
8700 Leoben

Dipl.-Ing. Dr. Christian Schmid

Institut für Angewandte Geophysik
Forschungsgesellschaft Joanneum GmbH.
8700 Leoben

GEOPHYSIKALISCHE BOHRLOCHMESSUNGEN
ZUR UNTERSUCHUNG VON ARTESISCHEN HORIZONTEN
IN DER OSTSTEIEMARK

J. Schön

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorbemerkungen und Zielstellungen	99
2.	Lithologische Profilgliederung auf der Grundlage geophysikalischer Bohrlochmeßergebnisse	99
3.	Korrelation ausgewählter Horizonte	105
4.	Literaturverzeichnis	111

Verzeichnis der Abbildungen

Abb.1:	Lithologische Aussagen aus Bohrlochmessungen Bohrloch Hirnsdorf/Stmk	102
Abb.2:	Gamma - Widerstands - Cross - Plot	104
Abb.3:	Drei Hauptformen der Gammakurve und die entsprechende sedimentologische Interpretation	105
Abb.4:	Typische "Glockenform" eines gamma (GR) - und Widerstandslogs (R 16), Bohrung Leitersdorf	106
Abb.5:	Lage der Bohrungen im Gebiet des Feistritz- und Safentales	107
Abb.6:	Korrelation der Bohrungen Leitersdorf und Speilbrunn	109
Abb.7:	Korrelation der Bohrungen Kroisbach - Großsteinbach II - Hainersdorf	110

1. Vorbemerkungen und Zielstellung

Die Tatsache, daß die Oststeiermark einerseits als Wassermangelgebiet ausgewiesen ist und andererseits über eine Vielzahl (mehr als 1500) von artesischen Hausbrunnen verfügt (H.Zetinigg, 1982), erfordert die systematische Klärung der hydrogeologischen Situation einschließlich der möglichen hydraulischen Verbindung genutzter Aquifere für eine

- künftige Nutzung artesischer Wasservorkommen,
- sinnvolle Bewirtschaftung und dem Wasserrechtsgesetz entsprechende Nutzung bestehender Brunnen,
- Klärung allfälliger Konfliktsituationen zwischen Eigentümern von artesischen Hausbrunnen, Gemeinden bzw. Wasserverbänden und der Landesregierung.

Als ein Beitrag zur Klärung dieser Fragen wurden nach ersten Testmessungen und Voruntersuchungen systematische bohrlochgeophysikalische Messungen und eine entsprechende Interpretation vorgenommen. Dabei erfolgte eine Konzentration auf Bohrungen im Bereich des Feistritztales und des Safentaales.

Da der Frage nach einer möglichen Verbindung der angetroffenen bzw. genutzten Aquifere benachbarter Bohrungen besondere Bedeutung zukam, wurde neben einer Interpretation der Einzelbohrung besonderer Wert auf die Untersuchung korrelativer Zusammenhänge anhand der Bohrlochmessungen und bezogen auf benachbarte Bohrungen gelegt.

2. Lithologische Profilgliederung auf der Grundlage geophysikalischer Bohrlochmeßergebnisse

Zur lithologischen Gliederung in sedimentären Folgen werden bevorzugt das Gammalog, die Widerstandslogs sowie das Eigenpotentiallog verwendet. Ein derartiges Meßprogramm erlaubt die lithologische Gliederung des Profils vor allem hinsichtlich der

hydrogeologisch relevanten Gesteinstypen (Abgrenzung von Sand/Kies/Schotter gegenüber Ton/Mergel/ Schluff). Die wesentlichsten Indikationen liefern dabei

- das Gammalog: In der vorliegenden Arbeit wird das Gammalog mit GR (Gamma ray) bezeichnet; die Maßeinheit sind cps (counts per second). Tone als wichtigster Träger einer natürlichen Gammastrahlung weisen hohe Werte (17 ... 20 cps) auf; nahezu tonfreie Sande, Kiese und Schotter liegen im Bereich 3 ... 5 cps. Dazwischen liegen tonige bzw. schluffige Sande und Kiese sowie Mergel mit Intensitäten je nach Vertonungsgrad.

Das Gammalog erlaubt auch eine quantitative Angabe in Form eines bohrlochgeophysikalisch ermittelten Tongehaltes (B-TONGEH., häufig auch bezeichnet mit SH von engl. shale), der unter Verwendung empirischer Korrelationen ermittelt wird.

Erhöhte Gammawerte können jedoch auch durch radioaktiv wirksame Komponenten im Sand- bzw. Grobkornbereich (Glaukonitsande, Gerölle etc.) bedingt sein.

- die Widerstandslogs: Für die vorliegende Arbeit wurden Potentialsondenmessungen verwendet; die 16"-Normale wird mit R16, die 64"-Normale mit R64 bezeichnet. Maßeinheit ist das Ohm.m (Ohm.m). Tone besitzen aufgrund ihrer besonderen elektrochemischen Eigenschaften eine hohe elektrische Leitfähigkeit und damit niedrige Widerstände etwa im Bereich um 20 bis maximal 50 Ohm.m. Kiese und Sande hingegen sind infolge der meist nur gering mineralisierten Porenwässer durch hohe elektrische Widerstände (über 80 Ohm.m) ausgewiesen. Fast stets zeigen dabei die beiden Kurven ein Auseinanderlaufen. Diese als "Separation" bezeichnete Erscheinung ist ein weiterer wichtiger Indikator für permeable Sand- bzw. Kies-Bereiche. Tonige Sande bzw. sandige Tone liegen zwischen den Ton- und Sandniveaus der Widerstände.

Die Aussagefähigkeit der Eigenpotentialkurve (SP) wird wesentlich von dem Konzentrationsunterschied zwischen Spülung und Schichtwasser bestimmt. Ist dieser hinreichend, erlaubt sie ebenfalls eine Sand-Ton-Gliederung. Maßeinheit ist das mV (Millivolt).

Für die im Profil zu erwartenden Gesteinsarten gelten damit folgende Regeln:

sandige Bereiche: niedrige Gammaintensitäten, hohe Widerstände mit Separation der R16- R64-Kurven

tonige Bereiche: hohe Gammaintensitäten, niedrige Widerstände, keine Separation.

Abbildung 1 zeigt als Beispiel die Bohrung Hirnsdorf. Gammalog und Widerstandslogs erlauben bereits anhand des Kurvenbildes (Spur 1 und Spur 2) eine Abgrenzung sandig-kiesiger und toniger Bereiche.

Eine quantifizierende Bearbeitung kann mit der Ermittlung des Tongehaltes vorgenommen werden.

Der bohrlochgeophysikalisch ermittelte Tongehalt wird dabei nach einer linearen Beziehung berechnet

$$B\text{-TONGEH.} = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}$$

Dabei ist GR der aktuelle Meßwert der Gammakurve
 GR_{\min} der minimale Meßwert der Gammakurve
 (entspricht Sand)
 GR_{\max} der maximale Meßwert der Gammakurve
 (entspricht Ton)

Es sind auch andere (nichtlineare) empirisch ermittelte Korrelationsbeziehungen gebräuchlich (siehe z.B. Fertl, 1983).

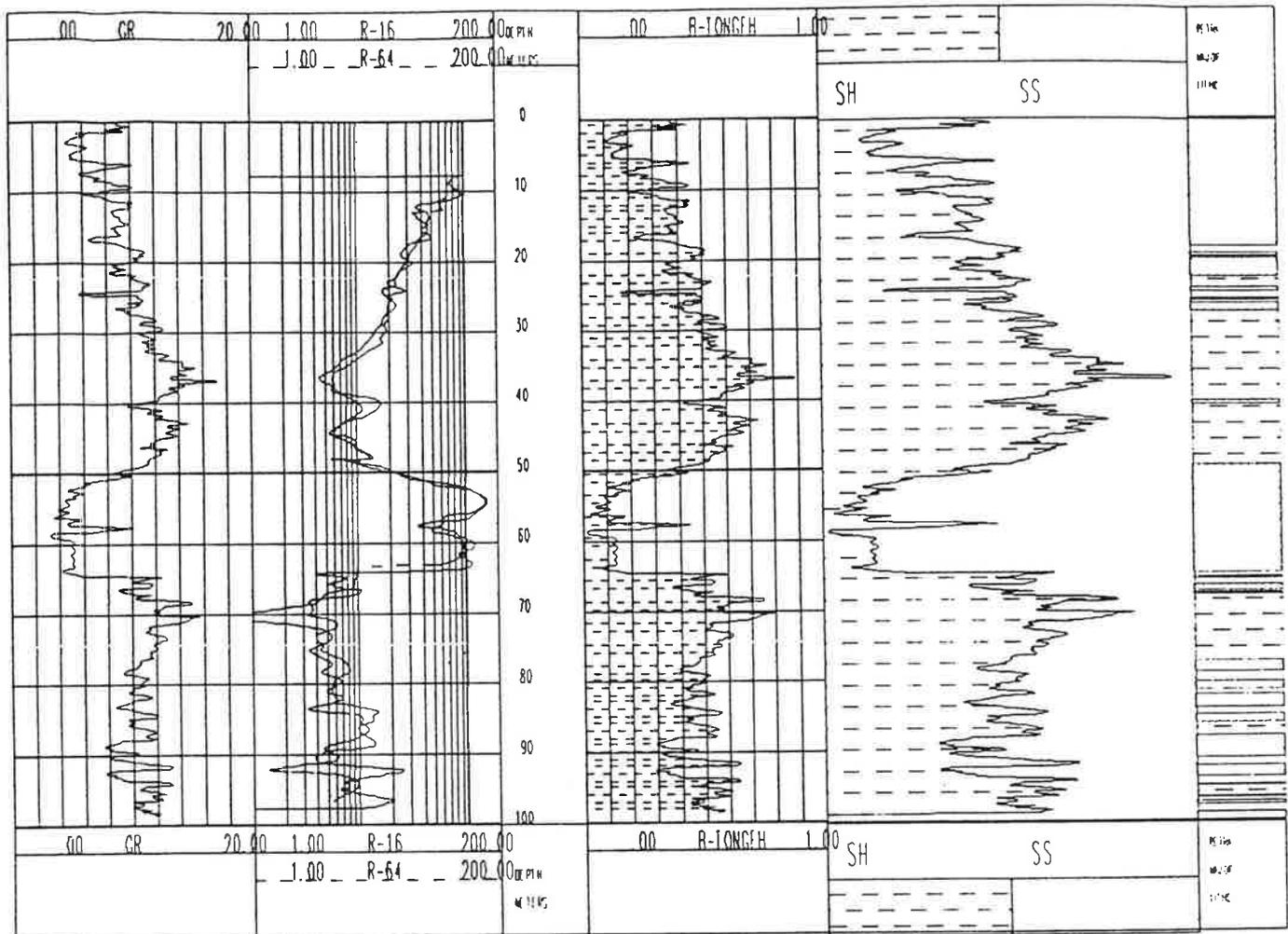


Abb. 1: Lithologische Aussagen aus Bohrlochmessungen, Bohrung Hirnsdorf/Stmk.

Spur 1 :Gammalog GR; Skala 0 ... 20 cps

Spur 2: Widerstandslogs R16 und R64; Skala 1 ... 200 Ohm.m (logarithmisch)

Spur 3: Tiefe in m

Spur 4: Bohrlochgeophysikalisch ermittelter Tongehalt (B-TONGEH.); Skala 0 ... 1

$GR_{\min} = 3$ cps

$GR_{\max} = 18$ cps

Spur 5: Ton (SH)- und Sand (SS)-Volumenanteile

Spur 5: Dominierende Gesteinsart

Maximal- und Minimalwerte können aus der Einzelbohrung entnommen werden; es empfiehlt sich jedoch, hierbei auch Nachbarbohrungen einzubeziehen.

Eine weiterführende Bearbeitungsmethodik beruht auf Korrelationen unter Verwendung statistischer Merkmale (sogenannter cross-plots).

Abb. 2 zeigt zunächst eine Gegenüberstellung der Gamma (GR)- und Widerstands-(R16)-Werte in einem GR-R16-crossplot. Jedes eingetragene Kreuz repräsentiert ein Meßwertpaar; diese sind für 10 cm - Abstände aufgenommen. Es wurde als Beispiel wiederum die Bohrung Hirnsdorf gewählt.

Die Anordnung der Meßwerte in einem relativ schmalen Band im cross-plot entspricht den oben angeführten "Regeln" und belegt darüberhinaus, daß es sich im wesentlichen um Kies/Sand - Schluff - Ton - Folgen handelt und keine Besonderheiten wie etwa radioaktive Sande auftreten.

Der bereits erläuterten Regel

Sand, Kies - niedrige Gammawerte, hohe spezifische elektrische Widerstände
Ton - hohe Gammawerte, niedrige spezifische elektrische Widerstände

folgend, lassen sich im cross-plot Sand-, Schluff- und Tonbereiche abgrenzen. Neben der Logdarstellung werden unmittelbar die zugehörigen Tiefenabschnitte angezeigt und damit eine "lithologische Sofortauswertung" vorgenommen. Auf diese Weise ist eine separate Bearbeitung der einzelnen Bohrungen möglich.

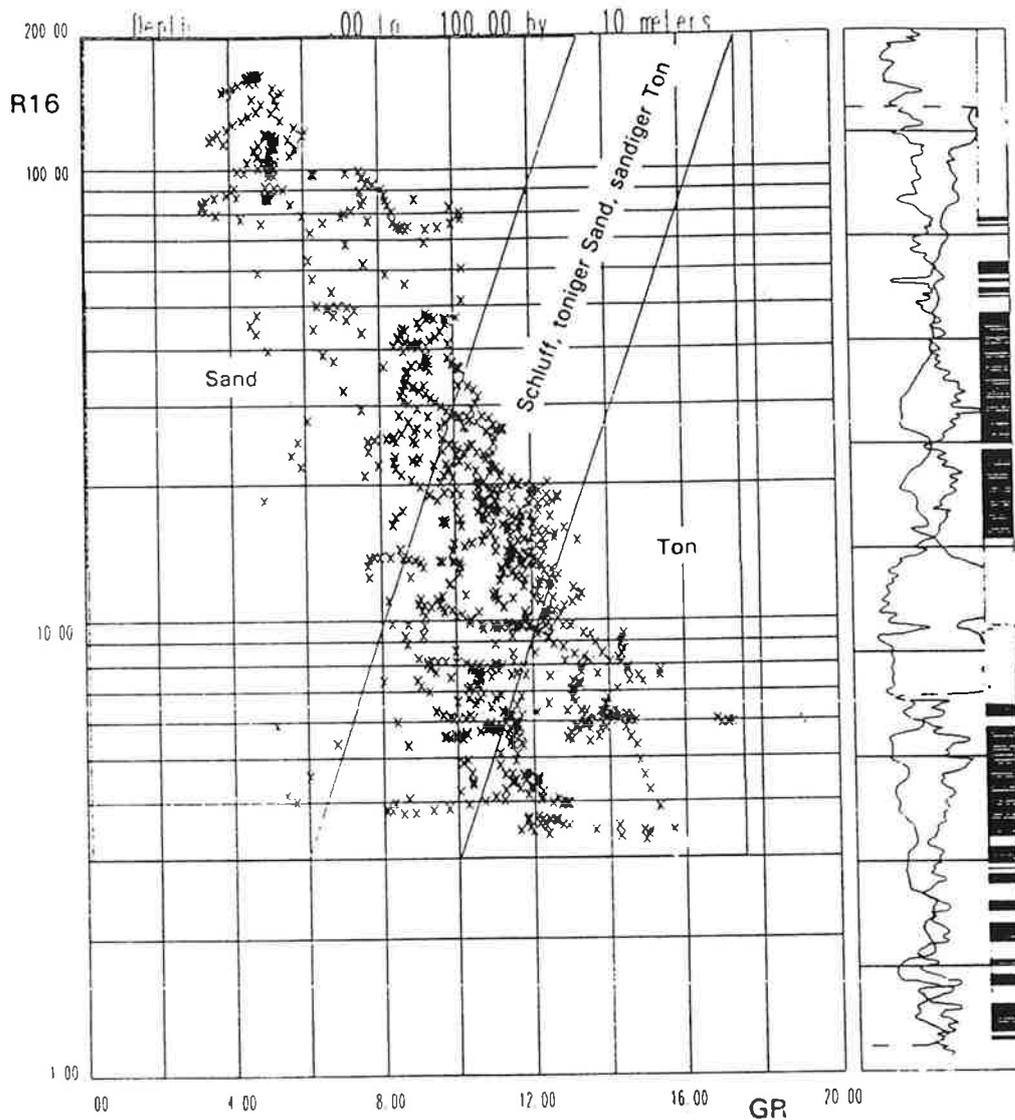


Abb. 2: Gamma-Widerstands-cross-plot.

Es sind die Wertepaare GR und R16 für den Tiefenbereich 0 ... 100 m der Bohrung Hirnsdorf gegenübergestellt (Meßpunktabstand 10 cm)

x-Achse: Gammameßwerte in cps; Achsenskala 0...20 cps

y-Achse: Widerstandswerte in Ohm.m; Achsenskala 1...200 Ohm.m
(logarithmisch)

Rechts neben dem cross-plot sind die Meßkurven gezeichnet (R16, GR), wobei die gleiche Skalenbreite (1...200 Ohm.m bzw. 0...20 cps) für die Logdarstellung gilt.

Daneben befinden sich die den eingegrenzten Bereichen zugeordneten lithologischen Angaben

Sand

Schluff

Ton

3. Korrelation ausgewählter Horizonte

Eine Korrelation einzelner Horizonte in benachbarten Bohrungen ist prinzipiell anhand des lithologischen Profils (Abschnitt 2) möglich. Es zeigt sich jedoch, daß dabei vor allem jene Informationen teilweise ungenutzt bleiben, die in der Kurvenform der einzelnen Logs stecken. Aus dem Gammalog werden beispielsweise Typen der Sedimentationsabfolge abgeleitet, wie dies Abb. 3 zeigt.

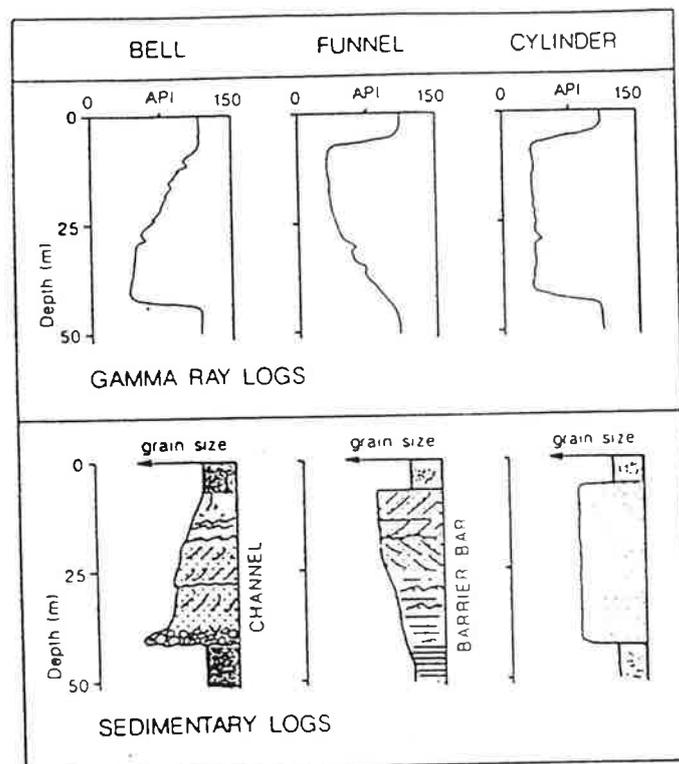


Abb. 3: Drei Hauptformen der Gammakurve und die entsprechende sedimentologische Interpretation (nach Serra und Sulpice, 1975; übernommen von Rider, 1990)

In ähnlicher Weise lassen sich bestimmte Kurventypen aus den Bohrlochmeßkurven im Bereich des Feistritz- und Safentales ableiten. Hierzu wurden jedoch die Gamma- und die Widerstandskurve genutzt, da beide einen hohen lithologischen Informationsgehalt aufweisen und eine Gegenläufigkeit zeigen.

Abb. 4 zeigt hierzu ein Beispiel, das die Grundform "Glocke" (bell) aufweist.

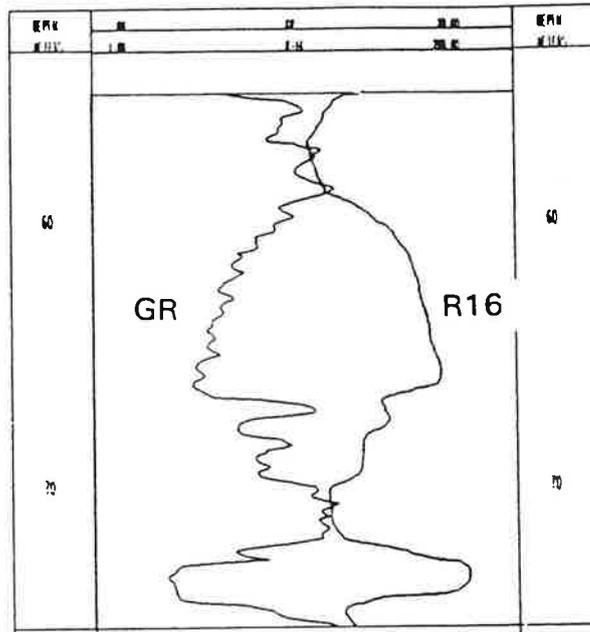


Abb. 4: Typische "Glockenform" eines Gamma (GR)- und Widerstandslogs (R16)
Bohrung Leitersdorf Tiefenabschnitt 55 ... 75 m

Die Zielstellung der lithologischen Gliederung und Korrelation besteht unter diesen Gesichtspunkten vornehmlich in einer Ähnlichkeitsanalyse von Stauern und Aquifere**n** bzw. Sedimentationsfolgen auf der Grundlage des Gamma- (bzw. Eigenpotential-) und Widerstandslogs (R16-Normale). An zwei Beispielen soll die Aussagekraft derartiger Untersuchungen dargestellt werden. Hierzu wurden die in Tabelle 1 enthaltenen Bohrungen genutzt.

Tabelle 1 - Bohrungen und Meßverfahren

Nr.	Bezeichnung	Seehöhe	Endteufe	Gemessene Logs
1	Kroisbach	339,8	90	SP/GR/WID.NOR/TEMP/FM)
2	Großsteinbach 2	319,2	60	SP/GR/WID.NOR/TEMP/FM)
3	Großhartmannsdorf 2	313,2	80	SP/WID.NOR/TEMP)
4	Hainersdorf	292,0	135	SP/GR/WID.NOR/TEMP/FM)
5.	Speilbrunn	283,1	230	SP/GR/R16/R64/TEMP
6.	Leitersdorf	281,0	150	SP/GR/R16/R64

Die Lage der Bohrungen geht aus Abb. 5 hervor.

Lage der Bohrungen im Gebiet des Feistritz- und Safentals

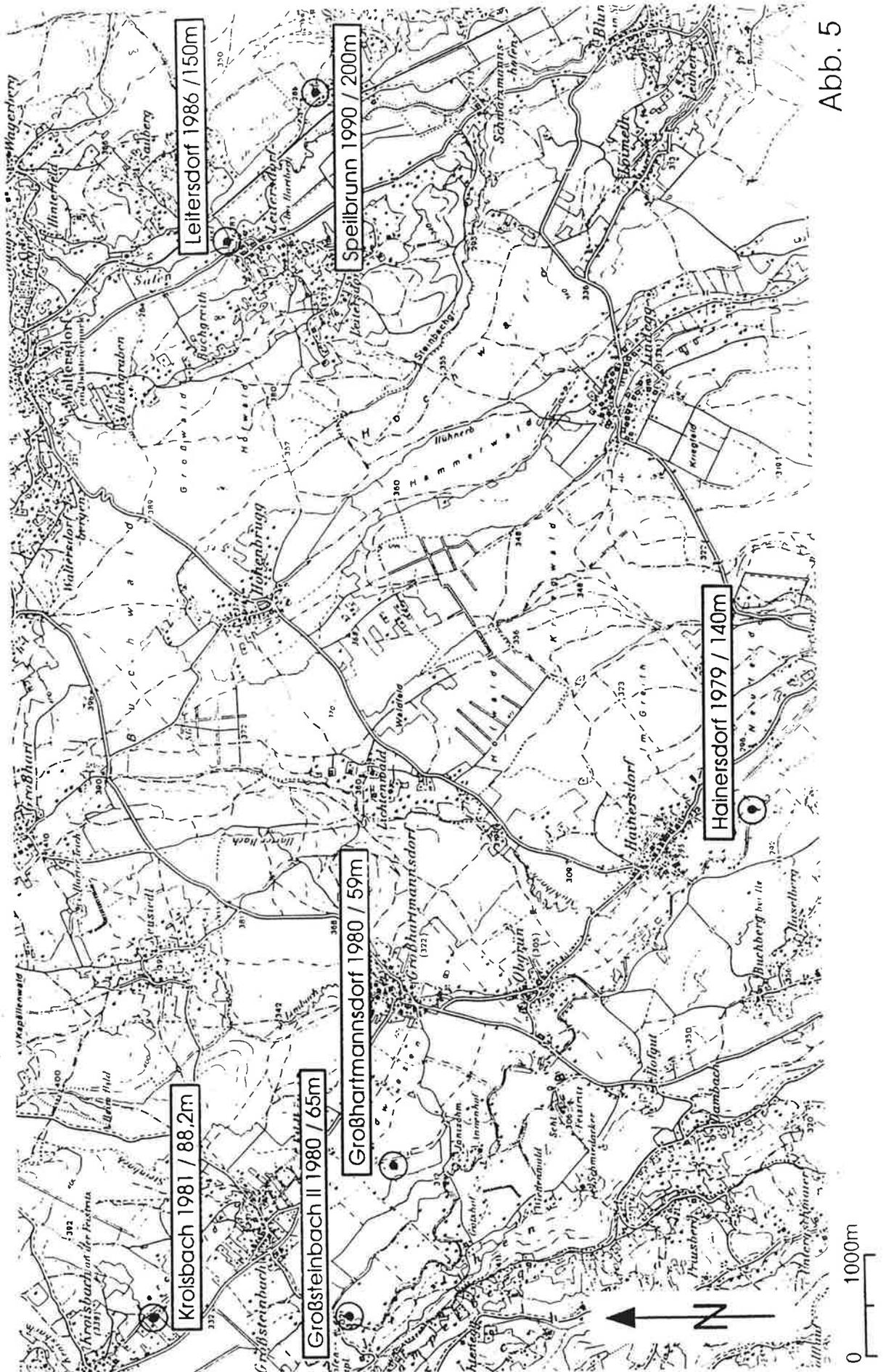


Abb. 5

Beispiel 1: Korrelation der Bohrungen Leitersdorf und Speilbrunn

Abb.6 zeigt die Logs (Gammalog GR und Widerstandslog R16) der beiden Bohrungen bezogen auf Seehöhe. Deutlich lassen sich anhand des Kurvenbildes einzelne Sandhorizonte korrelieren. Insbesondere der Aquiferbereich B ist in seiner Sedimentationsfolge offensichtlich in beiden Bohrungen gleichartig aufgebaut und weist eine Gliederung in 2 Abschnitte auf.

Beispiel 2: Korrelation der Bohrungen Kroisbach-Großsteinbach II - Hainersdorf

Abb. 7 zeigt wiederum die auf Seehöhe bezogenen Logs. In vergleichbarer Weise wie bei Beispiel 1 läßt sich anhand des Kurvenbildes der mit A bezeichnete Aquifer über die 3 Bohrungen korrelieren. Dieser Horizont ist mit nahezu gleicher fazieller Ausbildung bohrlochgeophysikalisch von der Bohrung Kroisbach bis zur Bohrung Hainersdorf in etwa gleicher Tiefenlage (260 ... 270 m ü.A.) korrelierbar. Er entspricht im Verlauf und in der Tiefenlage dem von Bergmann, Lettowski und Überwimmer in der Arbeit "Hydraulische Untersuchungen der gespannten Grundwasservorkommen im Feistritz- und Safental/Oststeiermark" (Abb. 4.1) beschriebenen "ausgedehnten gespannten Grundwasserleiter".

Die Beispiele belegen, daß eine sedimentologisch orientierte Interpretation auf der Grundlage typischer Kurvenmerkmale ein wertvolles Mittel zur Korrelation von Lockergesteinsprofilen darstellt.

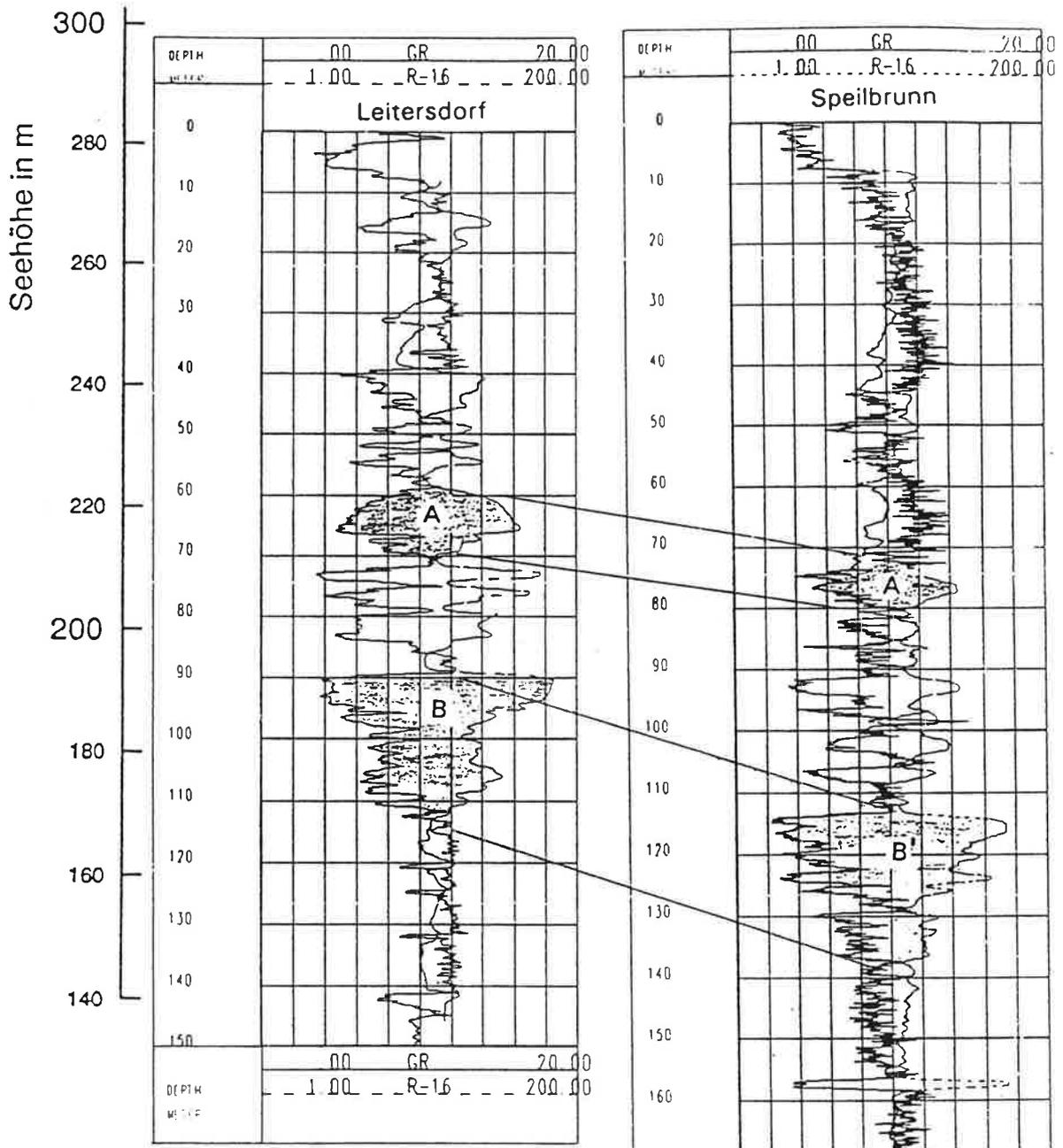


Abb. 6: Korrelation der Bohrungen Leitersdorf und Speilbrunn
 Meßkurven: Gammalog GR mit Skala 0 ... 20 cps
 Widerstandslog R16 mit logarithmischer Skala
 1 ... 200 Ohm.m
 A,B Sandhorizonte bzw. Aquiferbereiche

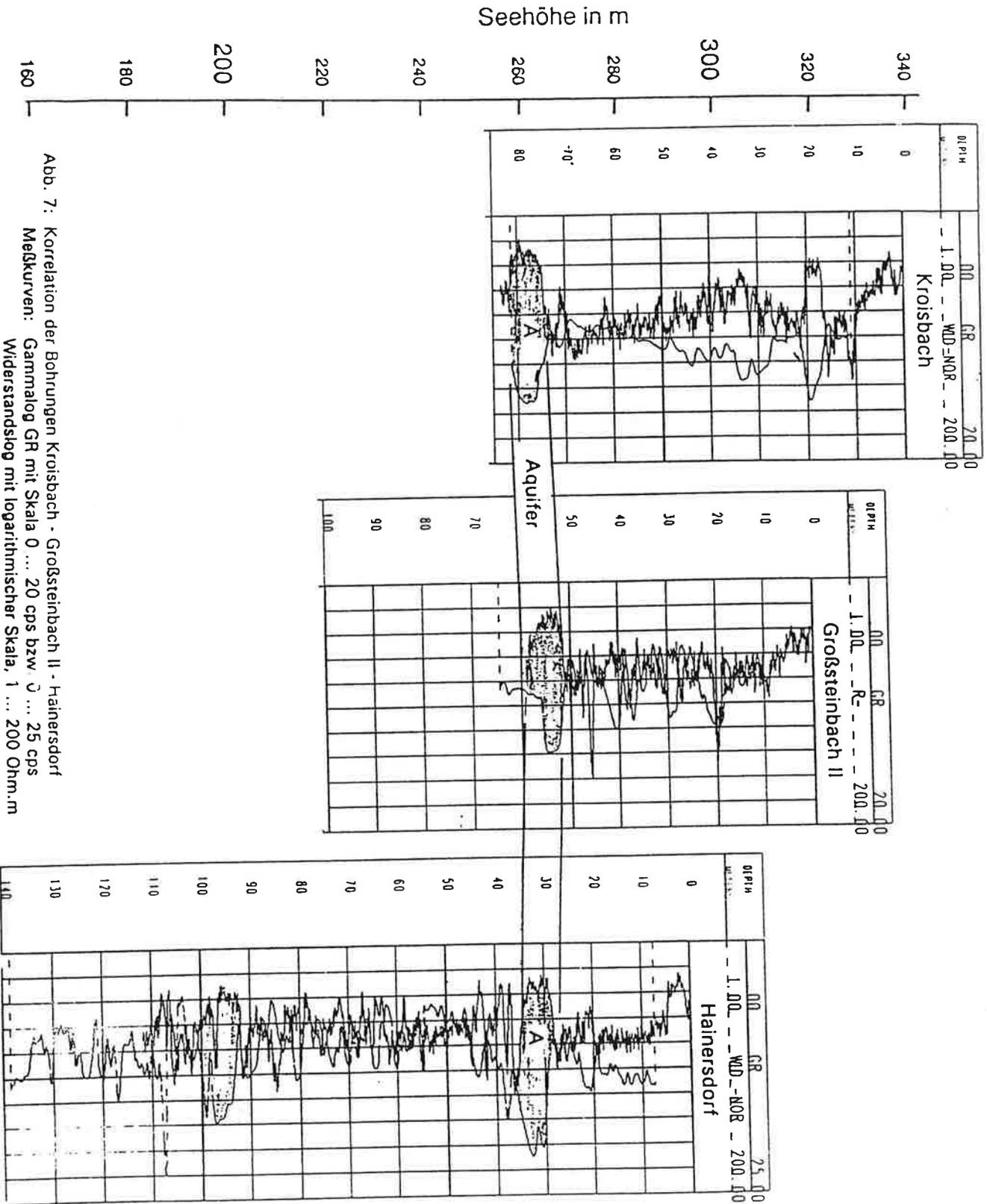


Abb. 7: Korrelation der Bohrungen Kroisbach - Großsteinbach II - Hainersdorf
 Meßkurven: Gammalog GR mit Skala 0 ... 20 cps bzw. \bar{U} ... 25 cps
 Widerstandslg mit logarithmischer Skala, 1 ... 200 Ohm.m

6. Literaturverzeichnis

- Bergmann, H., Lettowsky, A., Überwimmer, F.: Hydraulische Untersuchung der gespannten Grundwasservorkommen im Feistritz- und Safental/Oststeiermark (Ber. Wasserwirtsch. Planung, in Druck 1993)
- Fertl, W. (1983): Gamma ray spectral logging: A new evaluation frontier, Part VI, World Oil, Oct. 1983 - reprint, 8 S.
- Rider, M.H.: The geological interpretation of well logs. Blackie and Son Ltd. Glasgow, Halsted Press New York, 1986
- Zetinigg, H.: Die artesischen Brunnen im steirischen Becken (mitt. Abt. Geol. Paläont. Bergb., Landesmuseum, Heft 43, Graz 1982)
- Zetinigg, H.: Die Erschließung von gespanntem und artesischem Grundwasser. Gas/Wasser/Wärme 37, Nr. 5, S. 153-167, 183.

ANSCHRIFT DES VERFASSERS

Univ.Prof. Dr. Jürgen Schön

Institut für Angewandte Geophysik
Forschungsgesellschaft Joanneum GmbH.
8700 Leoben

VERZEICHNIS DER BISHER ERSCHIENEN BÄNDE

- | | | |
|---------|---|----------------------|
| Band 1 | VORTRAGSREIHE ABFALLBESEITIGUNG, 18. April 1964.
Neuaufgabe 1968, von W. Tronko, B. Bilek, J. Wotschke,
K. Stundl, F. Heigl, E.v. Conrad. | S 84.-- |
| Band 2 | EIN BEITRAG ZUR GEOLOGIE UND MORPHOLOGIE DES MÜRZTALES,
von R. Sperlich, W. Scharf, A. Thurner, 1965.
W. Tronko, 1965 | S 84.--
S 84.-- |
| Band 3 | VORTRAGSREIHE ABFALLVERARBEITUNG, 18. März 1965, von F. Fischer,
R. Braun, F. Schönbeck, W. Tronko, K. Stundl, B. Urban. | S 84.-- |
| Band 4 | GEWÄSSERSCHUTZ IST NÖTIG, von J. Krainer, F. Hahne, H. Kalloch,
F. Schönbeck, H. Moosbrugger, L. Bernhart, W. Tronko, 1965. | S 84.-- |
| Band 5 | DIE MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE, VERSUCH EINER ZUSAMMEN-
FASSUNG. NÖRDLICH VON GRAZ, von H. Zetinigg, Th. Puschnik,
H. Novak, F. Weber, 1966. | S 140.-- |
| Band 6 | VORTRAGSREIHE ABFALLVERARBEITUNG, 18. November 1965,
von F. Schönbeck, H. Sontheimer, A. Kern, H. Rasworschegg,
J. Wotschke, J. Brodbeck, R. Spinola, Stundl, W. Tronko, 1966. | S 120.-- |
| Band 7 | SEISMISCHE UNTERSUCHUNGEN IM GRUNDWASSERFELD FRIESACH
NÖRDLICH VON GRAZ, von H. Zetinigg, Th. Puschnigg, H. Novak,
F. Weber, 1966. | S 140.-- |
| Band 8 | DER MÜRZVERBAND, von E. Fabiani, P. Bilek, H. Novak, E. Kauderer,
F. Hartl, 1966. | S 140.-- |
| Band 9 | RAUMPLANUNG, FLÄCHENNUTZUNGSPLÄNE DER GEMEINDEN, von
J. Krainer, H. Wengert, K. Eberl, F. Plankensteiner, G. Gorbach, H. Egger,
H. Hoffmann, K. Freisitzer, W. Tronko, H. Bullmann, I.E. Holub, 1966. | S 140.-- |
| Band 10 | SAMMLUNG, BESEITIGUNG UND VERARBEITUNG DER FESTEN
SIEDLUNGSABFÄLLE, von H. Erhard, 1967. | S 66.-- |
| Band 11 | SIEDLUNGSKUNDLICHE GRUNDLAGEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT-
LICHE RAHMENPLANUNG IM FLUSSGEBIET DER MÜRZ, von H. Wengert,
E. Hillebrand, K. Freisitzer, 1967.
W. Popp, M. Noe, 1969. | S 131.--
S 112.-- |
| Band 12 | HYDROGEOLOGIE DES MURTALES, von N. Anderle, 1969. | S 131.-- |
| Band 13 | 10 JAHRE GEWÄSSERGÜTEAUFSICHT IN DER STEIERMARK 1959 - 1969,
von L. Bernhart, L. Sölkner, H. Ertl, W. Popp, M. Noe, 1969. | S 112.-- |

- Band 14 GEWÄSSERSCHUTZMASSNAHMEN IN SCHWERPUNKTGEBIETEN STEIERMARKS, 1970 (DAS VORLÄUFIGE SCHWERPUNKT-PROGRAMM 1964 UND DAS SCHWERPUNKTPROGRAMM 1966), von F. Schönbeck, L. Bernhart, E. Gangl, H. Ertl. S 66.--
- Band 15 INDUSTRIELLER ABWASSERKATASTER STEIERMARKS, von L. Bernhart, 1970. S 187.--
- Band 16/ TÄTIGKEITEN UND ORGANISATION DES WIRTSCHAFTSHOFES DER
17 LANDESHAUPTSTADT GRAZ, ABFALLBEHANDLUNG IN GRAZ, LITERATUR ANGABEN ZUM THEMA "ABFALLBEHANDLUNG", von A. Wasle, 1970. S 112.--
- Band 18 ABWASSERFRAGEN AUS BERGBAU UND EISENHÜTTE, von L. Bernhart, K. Stundl, A. Witschel, 1971. S 66.--
- Band 19 MASSNAHMEN ZUR LÖSUNG DER ABWASSERFRAGEN IN ZELLSTOFFFABRIKEN, von B. Walzel - Wiesentreu, W. Schönauer, 1971. S 150.--
- Band 20 BODENBEDECKUNG UND TERRASSEN DES MURTALES ZWISCHEN WILDON UND DER STAATSGRENZE, von E. Fabiani, M. Eisenhut, mit Kartenbeilagen, 1973. S 168.--
- Band 21 UNTERSUCHUNG AN ARTESISCHEN WÄSSERN IN DER NÖRDLICHEN OSTSTEIERMARK, von L. Bernhart, J. Zötl, H. Zetinigg, 1972. S 120.--
- Band 22 GRUNDWASSERUNTERSUCHUNGEN IM SÜDÖSTLICHEN GRAZERFELD, von L. Bernhart, H. Zetinigg, J. Novak, W. Popp, 1973. S 90.--
- Band 23 GRUNDWASSERUNTERSUCHUNGEN IM NORDÖSTLICHEN LEIBNITZER-FELD, von L. Bernhart, E. Fabiani, M. Eisenhut, F. Weber, E.P. Nemecek, Th. Glanz, W. Wessiak, H. Ertl, H. Schwinghammer, 1973. S 150.--
- Band 24 GRUNDWASSERVERSORGUNG AUS DEM LEIBNITZERFELD von L. Bernhart, 1973. S 150.--
- Band 25 WÄRMEBELASTUNG STEIRISCHER GEWÄSSER, von L. Bernhart, H. Niederl, J. Fuchs, H. Schlatte, H. Salinger, 1973. S 150.--
- Band 26 DIE ARTESISCHEN BRUNNEN DER SÜDWESTSTEIERMARK, von H. Zetinigg, 1973. S 120.--
- Band 27 DIE BEWEGUNG VON MINERALIEN IN BODEN UND GRUNDWASSER, von L. Bernhart, 1973. S 150.--
- Band 28 KENNZAHLEN FÜR DEN ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN VERGLEICH THERMISCHER ABLAUGEVERWERTUNGSANLAGEN, von L. Bernhart, D. Radner, H. Artledter, 1974. S 100.--
- Band 29 GENERALPLAN DER WASSERVERSORGUNG STEIERMARKS, ENTWURFSSTAND 1973, von L. Bernhart, E. Fabiani, E. Kauderer, H. Zetinigg, J. Zötl, 1974. S 400.--

- Band 30 GRUNDLAGEN FÜR WASSERVERSORGUNGSWIRTSCHAFTLICHE PLANUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, 1. TEIL, EINFÜHRUNG, HYDROGEOLOGIE, KLIMATOLOGIE, von L. Bernhart, J. Zötl, H. Zojer, 1975. S 120.--
- Band 31 GRUNDLAGEN FÜR WASSERVERSORGUNGSWIRTSCHAFTLICHE PLANUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, 2. TEIL, GEOLOGIE, von L. Bernhart, P. Beck - Mannagetta, A. Alker, 1975. S 120.--
- Band 32 BEITRÄGE ZUR WASSERWIRTSCHAFTLICHEN RAHMENPLANUNG IN DER STEIERMARK, von L. Bernhart, 1975. S 200.--
- Band 33 HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN BOHRUNGEN UND BRUNNEN IN DER OSTSTEIERMARK, von H. Janaschek, I. Köpper, H. Polesna, H. Zetinigg, 1975. S 150.--
- Band 34 DAS GRUNDWASSERVORKOMMEN IM MURTAL BEI ST. STEFAN O.L. UND KRAUBATH, von I. Arbeiter, H. Ertl, P. Hacker, H. Zetinigg, 1976. S 200.--
- Band 35 WASSERVERSORGUNG FÜR DAS UIMLAND VON GRAZ. ZUR GRÜNDUNG DES WASSERVERBANDES UMLAND - GRAZ, von L. Bernhart, K. Pirkner, 1977. S 180.--
- Band 36 GRUNDWASSERSCHONGEBIETE, von W. Kasper, H. Zetinigg, 1977. S 150.--
- Band 37 VORBEREITUNG EINER ZENTRALWASSERVERSORGUNG FÜR DIE SÜDOSTSTEIERMARK, von L. Bernhart, 1978. S 140.--
- Band 38 ZENTRALWASSERVERSORGUNG FÜR DIE SÜDOSTSTEIERMARK, von L. Bernhart, 1978. S 140.--
- Band 39 GRUNDWASSERUNTERSUCHUNGEN IM UNTEREN MURTAL, von E. Fabiani, H. Krainer, H. Ertl, W. Wessiak, 1978. S 250.--
- Band 40 GRUNDLAGEN FÜR WASSERVERSORGUNGSWIRTSCHAFTLICHE PLANUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, 3. TEIL, DIE GRUNDWASSERFÜHRUNG IM TALE DER LASSNITZ, SULM, UND SAGGAU ZWISCHEN GRUNDGEBIRGE UND LEIBNITZERFELD, von H. Fessler, 1978. S 30.--
- Band 41 GRUNDLAGEN FÜR WASSERVERSORGUNGSWIRTSCHAFTLICHE PLANUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, 4. TEIL, DIE GRUNDWASSERERSCHLISSUNG IM TALE DER LASSNITZ, SULM, UND SAGGAU ZWISCHEN GRUNDGEBIRGE UND LEIBNITZERFELD, von H. Zetinigg, 1978. S 30.--
- Band 42 ZUR GEOLOGIE IM RAUM EISENERZ - RADMER UND ZU IHREM EINFLUSS AUF DIE HYDROCHEMIE DER DORTIGEN GRUNDWASSER, von U. Mger, 1979. S 120.--
- Band 43 DIE GRUNDWASSERVERHÄLTNISSSE IM KAINACHTAL (ST. JOHANN O.H. - WEITENDORF), von M. Eisenhut, J. Novak, H. Zojer, H. Krainer, H. Ertl, H. Zetinigg, 1979. S 150.--

- Band 44 GRUND- UND KARSTWASSERUNTERSUCHUNGEN IM HOCHSCHWAB-
GEBIET, TEIL I, NATURRÄUMLICHE GRUNDLAGEN; GEOLOGIE -
MORPHOLOGIE - KLIMATOLOGIE, von E. Fabiani, V. Weissensteiner,
H. Wakonigg, 1980. S 180.--
- Band 45 GRUND- UND KARSTWASSERUNTERSUCHUNGEN IM HOCHSCHWAB-
GEBIET, TEIL II, DIE UNTERSUCHUNGEN: GESCHICHTE - DURCHFÜHRUNG -
METHODIK; VON E. Fabiani, 1980. S 80.--
- Band 46 GRUND- UND KARSTWASSERUNTERSUCHUNGEN IM HOCHSCHWAB-
GEBIET, TEIL III, GEOPHYSIK - ISOTOPENUNTERSUCHUNG - HYDROCHEMIE,
von Ch. Schmid, H. Zojer, H. Krainer, H. Ertl, R. Ott, 1980. S 200.--
- Band 47 GRUND- UND KARSTWASSERUNTERSUCHUNGEN IM HOCHSCHWAB-
GEBIET, TEIL IV, DIE UNTERSUCHUNG IM TRAGÖSSTAL,
von E. Fabiani, 1980. S 200.--
- Band 48 GRUND- UND KARSTWASSERUNTERSUCHUNGEN IM HOCHSCHWAB-
GEBIET, TEIL V, UNTERSUCHUNGEN IN DEN SÜDLICHEN HOCHSCHWAB-
TÄLERN (ILGENERTAL BIS SEEGRABEN), von E. Fabiani, 1980. S 280.--
- Band 49 UNTERSUCHUNG ÜBER DIE MÖGLICHKEIT ZUR ENTNAHME VON
GRUNDWASSER IM SÜDLICHEN HOCHSCHWABGEBIET UND DEREN
BEWIRTSCHAFTUNG, von Ch. Meidl, J. Novak, W. Wessiak, 1980. S 280.--
- Band 50 KONZEPT EINER ZENTRALWASSERVERSORGUNG HOCHSCHWAB SÜD,
von L. Bernhart, 1980. S 200.--
- Band 51 REGIONALE ABWASSERANLAGEN IN DER STEIERMARK,
BEMÜHUNGEN UND ERGEBNISSE, von L. Bernhart, P. Bilek,
E. Kauderer, H. Senekowitsch, O. Thaller, 1980. S 300.--
- Band 52 GRUNDWASSERUNTERSUCHUNGEN IM MURTAL ZWISCHEN
KNITTELFELD UND ZELTWEG, von I. Arbeiter, h. Krainer, H. Ertl,
H. Zetinigg, 1980. S 100.--
- Band 53 GRUNDWASSERUNTERSUCHUNGEN IM UNTEREN SAGGAUTAL,
von I. Arbeiter, H. Krainer, H. Zetinigg, 1980. S 100.--
- Band 54 "10 JAHRE WASSERVERBAND HOCHSCHWAB - SÜD" von L. Bernhart,
W. Kneissel, J. Novak, R. Ott, F. Schönbeck, 1981. S 120.--
- Band 55 DIE AUSWIRKUNGEN DES KRAFTWERKBAUES VON OBERVOGAU AUF
DAS GRUNDWASSER, von H. Fessler, 1981. S 200.--
- Band 56 FESTVERANSTALTUNG "10 JAHRE WASSERVERBAND
HOCHSCHWAB - SÜD 1971 - 1981", von L. Bernhart, R. Burgstaller,
M. Rupprecht, H. Sökner, G. Bujatti, E. Wurzer, A. Zdarsky, J. Krainer,
V. Ahrer, 1981. S 100.--

Band 57	GRUNDLAGEN FÜR WASSERVERSORGUNGSWIRTSCHAFTLICHE PLANUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, von L. Bernhart, E. Höbl, E. Schubert, E. Fabiani, H. Zetinigg, H. Zojer, E.P. Nemecek, E.P. Kauch, 1981.	S 200.--
Band 58	WASSERBEDARF DER SÜDWESTSTEIERMARK, von L. Bernhart, 1982.	S 200.--
Band 59	KOSTENAUFTEILUNGSSCHLÜSSEL FÜR ABWASSERVERBÄNDE, von P. Bilek, E. Kauderer, 1982.	S 200.--
Band 60	DIE QUELLEN DES SCHÖCKELGEBIETS, von H. Zetinigg, W. Griessler, Th. Untersweg, V. Weissensteiner, Ch. Meidl, 1982.	S 200.--
Band 61	BEDARFSERMITTLUNG FÜR EINEN STEIRISCHEN WASSERVERBUND, von Ch. Meidl, Ch. Kaiser, mit einer Einführung von L. Bernhart, 1983.	S 200.--
Band 62	DIE MESSUNGEN DER FLIESSGESCHWINDIGKEITEN DES GRUNDWASSERS IM MUR- UND MÜRZTAL, von H. Zetinigg, 1983.	S 100.--
Band 63	GRUNDLAGEN FÜR EINEN STEIRISCHEN WASSERVERBUND - LEITUNGSFÜHRUNGEN IN DER SÜDWESTSTEIERMARK, von J. Novak, Ch. Kaiser, 1983.	S 200.--
Band 64	STEIRISCHES WASSERVERBUNDMODELL, von J. Novak, 1983.	S 200.--
Band 65	DER KARST AM OSTUFER DER WEIZKLAMM, von G. Fuchs, 1983.	S 150.--
Band 66	HYDROGEOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IN DEN NÖRDLICHEN GESÄUSEBERGEN, von W. Kollmann, 1983.	S 250.--
Band 67	DIE AUSWIRKUNGEN DES KRAFTWERKBAUES SPIELFELD AUF DAS GRUNDWASSER, von H. Fessler, 1983.	S 250.--
Band 68	BEITRÄGE ZUR KENNNTNIS DER ARTESISCHEN WÄSSER IM STEIRISCHEN BECKEN, von H. Zojer, H. Zetinigg, 1987.	S 200.--
Band 69	BEITRÄGE ZUR KENNNTNIS DER GESPANNTEN GRUNDWÄSSER IM MITTLEREN ENNSTAL UND PALTENTAL, von G. Suette, H. Zetinigg, 1988.	S 200.--
Band 70	GRUNDWASSERMODELL MURTAL, ANSCHNITT ST. STEFAN O.L. - KRAUBATH, von W. Erhart, - Schippeck, Ch. Kaiser, 1990.	S 200.--
Band 71	KARSTHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM WEIZER BERGLAND, von P. Hacker, 1991.	S 200.--
Band 72	MARKIERUNGSVERSUCHE IN KARSTGEBIETN DER STEIERMARK, von A. Huber, M. Pöschl, H. Zetinigg, 1991.	S 200.--

- Band 73 KARSTHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM EINZUGSGEBIET
DES MIXNITZBACHES, von H. Stadler, 1992. S 200.--
- Band 74 HYDROGEOLOGIE UND GRUNDWASSERMODELL DES LEIBNITZER-
FELDES, von J. Frank, A. Jawecki, H.P. Nachtnebel, H. Zojer, 1993. S 500.--
- Band 75 UNTERSUCHUNGEN DER GESPANNTEN GRUNDWASSERVORKOMMEN IM
FEISTRITZTAL UND SAFENTAL, von H. Bergmann, A. Lettowsky, E. Niesner,
Ch. Schmid, J. Schön, F. Überwimmer, 1992. S 300.--

In diesen Preisen ist die 10 %ige Mehrwertsteuer nicht enthalten.
Soweit lagernd, sind sämtliche Berichtsbände in der Landesdruckerei,
Formblattverlag, Hofgasse 15, 8010 Graz erhältlich.