
BERLINER GEOWISSENSCHAFTLICHE ABHANDLUNGEN

Reihe A/Band 4

von Christian Preller

TREND- UND SPEKTRALANALYSEN VON
GRUNDWASSERSTANDSGANGLINIEN
UND KLIMATOLOGISCHEN REIHEN
ZUR ERMITTLUNG DER
GRUNDWASSERNEUBILDUNG IN DREI
GEBIETEN VON BERLIN (WEST)



Berlin 1978

Verlag von Dietrich Reimer in Berlin

BERLINER GEOWISSENSCHAFTLICHE ABHANDLUNGEN

Reihe A: Geologie und Paläontologie · Reihe B: Geophysik · Reihe C: Kartographie

D 188

Herausgegeben von geowissenschaftlichen Instituten
der Freien und der Technischen Universität Berlin
und der Technischen Fachhochschule Berlin

Schriftleitung:
Dr. G. Pöhlmann (TFH), Dr. J. Pohlmann (FU)
Dr. H. Seyfried (TU)

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren allein verantwortlich

© 1978 by DIETRICH REIMER VERLAG IN BERLIN

| | | | | | |
|------------------------|-----|---|-------|--------------------------|-------------|
| Berliner geowiss. Abh. | (A) | 4 | 84 S. | 27 Abb., 22 Taf., 3 Tab. | Berlin 1978 |
|------------------------|-----|---|-------|--------------------------|-------------|

Christian Preller
Institut für Angewandte Geologie, FU Berlin

**TREND- UND SPEKTRALANALYSEN VON
GRUNDWASSERSTANDSGANGLINIEN
UND KLIMATOLOGISCHEN REIHEN
ZUR ERMITTLUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG
IN DREI GEBIETEN VON BERLIN (WEST)**



1978

Verlag von Dietrich Reimer in Berlin

TREND- UND SPEKTRALANALYSEN VON GRUNDWASSERSTANDSGANGLINIEN UND
KLIMATOLOGISCHEN REIHEN ZUR ERMITTLUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG
IN DREI GEBIETEN VON BERLIN (WEST)⁺

von

Christian Preller^{**}

KURZFASSUNG

Aus drei Gebieten von Berlin (West), die einen geologisch verschiedenen, aber jeweils ziemlich homogenen Aufbau besitzen, wurden ca. 60 Grundwasserstandsganglinien und klimatologische Datenreihen analysiert. Das Ziel ist es, das allgemeine zeitliche Verhalten der Grundwasseroberfläche dieser Gebiete zu beschreiben und in Verbindung damit die Grundwasserneubildung zu berechnen. Grundlage der Untersuchung sind die Trend- und die Spektralanalyse.

Bei der Trendanalyse wurden Polynome ≤ 3 . Grades auf ihre Anwendung als Trendfunktion hin überprüft. Es zeigte sich, daß eine gute Approximation des langfristigen Verhaltens der Grundwasseroberfläche häufig nur durch Polynome 2. oder 3. Grades gegeben ist. Erst dann ist auch für einen begrenzten zukünftigen Zeitraum eine genaue Prognostizierung des mittleren Grundwasserstandes möglich und somit auch eine Abschätzung, wie sich zukünftige Grundwasserentnahmen auswirken können.

Für die Spektralanalyse wurde aufgrund einer vergleichenden Darstellung von drei Berechnungsmethoden das auf der Theorie der stochastischen Prozesse basierende und von BLACKMAN & TUKEY (1959) erweiterte Verfahren zur Analyse der hier vorliegenden Zeitreihen als das am besten geeignete angesehen.

Für die Untersuchung wurde ein entsprechendes EDV-Programm erstellt.

Die Spektralanalyse ergab zwei Periodenbereiche, die sowohl in den Grundwasserstandsganglinien als auch in den klimatologischen Reihen vorkommen. Vorherrschend sind Schwingungen, die durch 60 - 80- monatige Perioden in einer allgemeinen Form quantifiziert werden können. Daneben ist eine Jahresperiode vorhanden, die allerdings in den Grundwasserstandsganglinien nur teilweise, abhängig vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche, nachzuweisen ist.

Abhängig vom Auftreten der mehrjährigen und jährlichen Perioden setzt sich auch die Grundwasserneubildung aus zwei Anteilen zusammen. Als Bezugsgröße wurde die als klimatische Wasserbilanz definierte Größe (Niederschlag minus potentieller Evapotranspiration) angesehen. Bei tieferliegender Grundwasseroberfläche ist nur

⁺ Dissertation an der Freien Universität Berlin

^{**}Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Christian Preller, Institut für Angewandte Geologie d. FU Berlin
1000 Berlin 33, Wichernstr. 16

der Anteil aus dem langzeitlichen Schwingungsverlauf vorstehend aufgeführter Größe anzusetzen, während bei nachweisbarer Jahresperiode und damit geringerem Flurabstand der Grundwasseroberfläche noch ein Anteil aus jährlicher Versickerungsrate hinzukommt.

Mit dem Phasenspektrum wird die Zeitverschiebung zwischen gleichen Perioden in klimatologischen Reihen und Grundwasserstandsganglinien ermittelt.

ABSTRACT

Approximately 60 groundwater level markings and climatological data were analyzed from three areas in Berlin (West) whose structure, although geologically different, are all rather homogeneous. It is the goal of this investigation to describe the general temporal behavior of the water table of these areas and to calculate, in regard to the temporal behavior, the formation of new groundwater. The basis of this investigation is trend and spectral analysis.

Polynomes ≤ 3 rd degree were utilized in the trend analysis in order to determine their applicability as trend functions. It was found that a good approximation of the long term behavior of the water table is frequently given only by polynomes of the 2nd or 3rd degree. Just then is a precise prognosis of the average groundwater level for a limited time span possible and therefore also an estimate of what effects future groundwater removal can have.

On the basis of a comparative description of three (mathematical) methods, the procedure based on the Theory of Stochastic Processes and enlarged by BLACKMANN & TUKEY (1959) was chosen as best suited for the analysis of this time series.

A corresponding computer program was written for the investigation.

The spectral analysis showed two periods that appeared both in the groundwater level markings and in the climatic series. Prevalent are oscillations exhibiting 60 - 80 month periods. In addition, a yearly period was found that is, however, only partially existent in the groundwater level markings and depends upon the water table field distance.

The formation of new groundwater is composed of two parts depending upon the occurrence of the several year period and of the yearly period. As correlation the quantity defined as climatic water-balance (precipitation minus potential evapotranspiration) was chosen. In case the groundwater table should lie deeper, only the part from the long term oscillation course, which consists of the aforesaid quantity, should be taken into account.

The time lag between the same periods in climatic series and groundwater level markings were ascertained the phase spectrum.

RÉSUMÉ

Environ 60 hydrogrammes du niveau de la nappe phréatique et des séries de données climatologiques, provenant de trois régions de Berlin (Ouest) géologiquement différentes mais cependant d'une composition relativement homogène, ont été analysés. Le but du travail est de décrire le comportement général temporel du niveau de la nappe phréatique de ces régions et de calculer à partir de cela la recharge des eaux souterraines.

L'investigation est basée sur l'analyse de tendance et l'analyse spectrale. Lors de l'analyse de tendance, des polynomes du $\leq 3^{\text{e}}$ degré ont été examinés pour leur utilisation comme fonction de tendance. Il en résulte que, dans la plupart des cas, seulement des polynomes du 2^{e} ou 3^{e} degré donnent une bonne approximation du comportement à long terme du niveau des eaux souterraines. C'est seulement après cela qu'une pronostication précise du niveau moyen des eaux souterraines est possible pour une période future limitée et ainsi donc également une estimation des effets futurs des prélèvements d'eau souterraine.

Sur la base d'une comparaison entre trois méthodes de calcul pour l'analyse spectrale, c'est la méthode basée sur la théorie des processus stochastiques et approfondie par BLACKMAN & TUKEY (1959) qui été reconnue comme la plus adéquate pour l'analyse des séries de temps données.

Un programme d'ordinateur a été préparé pour cette recherche.

L'analyse spectrale a donné deux domaines périodiques qui apparaissent aussi bien dans les hydrogrammes du niveau des eaux souterraines que dans les séries climatologiques. Des oscillations, qui peuvent être quantifiées en forme générale par des périodes de 60 à 80 mois, sont prédominantes. Il y a en plus une période saisonnière qui ne se présente que partiellement dans les hydrogrammes en relation avec la profondeur du niveau des eaux souterraines.

La recharge des eaux souterraines se compose de deux parties, en rapport avec les périodes de plusieurs années et les périodes saisonnières. Comme référence on a utilisé la quantité du bilan hydrologique climatique (précipitation moins évapotranspiration potentielle). En cas de plus profond niveau des eaux souterraines la portion du cours de l'oscillation de plusieurs années seulement suffit pour la quantité désignée précédemment, alors que pendant une période saisonnière vérifiable - niveau des eaux souterraines moins profond - s'ajoute une portion du taux de versement saisonnier.

Le décalage de temps entre des mêmes périodes dans les séries climatologiques et dans les hydrogrammes a été déterminé avec le spectre de phases.

VORWORT

Die vielfältigen Probleme bei der Bestimmung von Grundwasserhaushaltsgrößen bilden den Rahmen dieser Arbeit.

Herr Prof. Dr. Brühl, der der Anwendung neuer Berechnungsverfahren auf dem Gebiet der Hydrogeologie sehr aufgeschlossen gegenübersteht, unterstützte mich stets mit seinem großen Fachwissen. Ihm möchte ich an dieser Stelle für eine zweijährige fruchtbare Zusammenarbeit sehr herzlich danken.

Dem Leitenden Baudirektor Herrn Dipl.-Ing. R. Kloos als Vertreter des Senators für Bau- und Wohnungswesen in Berlin, und seinen Mitarbeitern danke ich für die Überlassung der Grundwasserstandsdaten und der Bohrprofile sowie für weitere Hinweise.

Dem Deutschen Wetterdienst, Wetteramt Berlin, und dem Meteorologischen Institut der Freien Universität Berlin gebührt mein Dank für die Überlassung von Daten aus dem meteorologischen Bereich.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr. rer.pol. W. Birkenfeld, Universität Bielefeld, Institut für Statistik und Datenverarbeitung, und Herrn Dr. rer.pol. B. Streitberg, FU Berlin, Institut für Angewandte Statistik. Ihre Erfahrungen und Untersuchungen auf dem Gebiet der Zeitreihenanalyse waren für mich sehr wertvoll.

Für die vielen anregenden Diskussionen, die zur Klärung hydrogeologischer Zusammenhänge beitrugen und in freundschaftlicher Atmosphäre stattfanden, danke ich sehr den Herren Diplom-Geologen H. Krieger, D. Plöthner und J. Thierbach.

Die Datenverarbeitung erfolgte am Großrechenzentrum für die Wissenschaft in Berlin mittels eines Rechners des Typs TR 440 (AEG-Telefunken).

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|---|-------|
| 1. EINLEITUNG..... | 8 |
| 2. GEOLOGISCHE, HYDROGEOLOGISCHE UND WASSERWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN DES BERLINER RAUMES... | 9 |
| 2.1 Geologie..... | 9 |
| 2.1.1 Tertiär..... | 9 |
| 2.1.2 Quartär..... | 9 |
| 2.2 Hydrogeologie und Wasserwirtschaft..... | 10 |
| 3. ANALYSIERTE ZEITREIHEN AUS DREI GEBIETEN VON BERLIN (W)..... | 11 |
| 3.1 Grundwasserstands-Ganglinien..... | 11 |
| 3.2 Klimatologische Zeitreihen..... | 12 |
| 3.3 Qualität der vorliegenden Datenreihen (Kurze Fehlerbetrachtung)..... | 15 |
| 4. ANALYSE VON ZEITREIHEN..... | 16 |
| 4.1 Instationäre Zeitreihen - Bestimmung von Trendfunktionen..... | 16 |
| 4.2 Methoden der Analyse von stationären Zeitreihen..... | 18 |
| 4.2.1 Allgemeines..... | 18 |
| 4.2.2 Periodogrammanalyse..... | 18 |
| 4.2.3 Stochastischer Prozeß und sein Spektrum..... | 21 |
| 4.2.3.1 Geglättetes Spektrum..... | 26 |
| 4.2.3.2 Die angewandten Gewichtsfunktionen und ihre Eigenschaften..... | 26 |
| 4.2.4 Vertrauensgrenzen von ermittelten Spektraldichtewerten..... | 28 |
| 4.2.5 Die Amplituden bestimmter Perioden in Zeitreihen..... | 29 |
| 4.2.6 Beziehungen zwischen zwei stationären Zeitreihen (Kreuzspektralanalyse)..... | 30 |
| 4.2.6.1 Allgemeines..... | 30 |
| 4.2.6.2 Kreuzkovarianzfunktion, Ko- und Quadratspektrum..... | 30 |
| 4.2.6.3 Glättung des Ko- und des Quadratspektrums..... | 32 |
| 4.2.6.4 Amplituden-, Gain-, Kohärenz- und Phasenspektrum..... | 32 |
| 4.3 Schnelle Fouriertransformation (FFT)..... | 33 |
| 5. EDV - PROGRAMM FÜR DIE ZEITREIHENANALYSE..... | 34 |
| 6. ERGEBNISSE DER ZEITREIHENANALYSE..... | 35 |
| 6.1 Trendanalyse..... | 35 |
| 6.1.1 Allgemeines..... | 35 |
| 6.1.2 Klimatologische Zeitreihen..... | 35 |
| 6.1.3 Gebiet A (Tegeler Forst-Frohnau-Hermsdorf)..... | 35 |
| 6.1.4 Gebiet B (Neukölln)..... | 36 |
| 6.1.5 Gebiet C (Lichtenrade)..... | 38 |
| 6.2 Spektralanalyse..... | 39 |
| 6.2.1 Allgemeines..... | 39 |
| 6.2.2 Klimatologische Zeitreihen aus den drei Gebieten..... | 39 |
| 6.2.3 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes A (Tegeler Forst - Frohnau - Hermsdorf)..... | 42 |
| 6.2.4 Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet A (Kreuzspektrum)..... | 46 |
| 6.2.5 Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet A..... | 49 |
| 6.2.6 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes B (Neukölln)..... | 50 |
| 6.2.7 Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet B (Kreuzspektrum)..... | 52 |
| 6.2.8 Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet B..... | 53 |
| 6.2.9 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes C (Lichtenrade)..... | 54 |

| | Seite |
|--------|--|
| 6.2.10 | Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet C (Kreuzspektrum)..... 56 |
| 6.2.11 | Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet C..... 57 |
| 6.3 | Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen..... 57 |
| 7. | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... 58 |
| 8. | LITERATURVERZEICHNIS..... 60 |

ANHANG:

Tafeln 1 - 22

Taf. 1: Lageplan der Grundwasser-Meßstellen, der Klimastationen und der Gebiete

Taf. 2: Fig. 1: Grundwasserstandsganglinien des Gebietes A

Fig. 2: Polynom-Koeffizienten der Trendfunktionen

Taf. 3: Grundwasserstandsganglinien des Gebietes B

Taf. 4: Fig. 1: Klimatologische Zeitreihen des Gebietes A

Fig. 2: Grundwasserstandsganglinien des Gebietes C

Tafeln 5 - 10 : Bohrprofile der Pegel

Tafeln 11 - 22 : EDV-Programm "SPEKTRUM"

SYMBOLLE UND BEZEICHNUNGEN

(hier nicht aufgeführte Symbole sind im Text erläutert)

| | | |
|--|---|---|
| a_0, A_0 | = | Fourierkonstante |
| $\left. \begin{matrix} a_j, A_j \\ b_j, B_j \\ A, B \end{matrix} \right\}$ | = | Fourierkoeffizienten |
| b, b^* | = | Bandbreite |
| $c_{11}(\tau), c_{22}(\tau)$ | = | Autokovarianzfunktionen einzelner Prozesse |
| $c_{12}(\tau), c_{21}(\tau)$ | = | Kreuzkovarianzfunktion zweier Prozesse |
| C | = | Amplitude |
| $c_{12}^*(\lambda)$ | = | Schätzfunktion für das Amplitudenspektrum |
| E | = | Erwartung |
| F | = | Verteilungsfunktion |
| $g_{12}^*(\lambda)$ | = | Schätzfunktion für das Gainspektrum |
| I_j, I_j^* | = | Periodogramordinaten |
| $KOH_{12}^{*2}(\lambda)$ | = | Schätzfunktion für das Kohärenzspektrum |
| M | = | Verschiebungsendpunkt |
| N | = | letzter beobachteter Meßwert (Endwert einer Datenreihe) |
| P | = | Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung |
| $s_{11}(\lambda), s_{22}(\lambda)$ | = | wahre Auto-Spektraldichtefunktion |
| $s_{11}^*(\lambda), s_{22}^*(\lambda)$ | = | Schätzfunktion für das Autospektrum |
| $s_{12}(\lambda)$ | = | wahre Kreuz-Spektraldichtefunktion |
| T | = | Schwingungsdauer, Periodenlänge |
| V | = | "alignment"-Parameter |
| $w(\tau)$ | = | Gewichtsfunktion (lag-window) |
| $W(\lambda)$ | = | Gewichtsfunktion (spectral-window) |
| $Z_t, Z(t), Z_1(t)$ | = | Zufallsvariable |
| $z_t^O, z^O(t)$ | = | gemessener Wert zur Zeit t |
| $\left. \begin{matrix} z_{1,t}, z_1(t) \\ z_{2,t}, z_2(t) \end{matrix} \right\}$ | = | trendbereinigte Werte einzelner Zufallsvariabler |
| α | = | Konfidenzzahl |
| β_j | = | Polynomkoeffizienten |
| ϵ_j | = | j-ter Zufallsanteil |
| $\lambda = \omega \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{T}$ | = | (allgemeine) Frequenz |
| v | = | Anzahl der Freiheitsgrade (χ^2 - Verteilung) |
| σ^2 | = | Varianz einer Stichprobe |
| $\varphi_{12}^*(\lambda)$ | = | Schätzfunktion für das Phasenspektrum |
| $\omega = 2\pi\lambda$ | = | Kreisfrequenz |
| Δ^k | = | k-te Differenz |

1. EINLEITUNG

Der steigende Bedarf an Wasser für häusliche und industrielle Zwecke wird hauptsächlich durch Grundwasser gedeckt. Besonders in den Ballungszentren von Wohn- und Industrieansiedlungen bilden sich im Bereich größerer Grundwasser-Entnahmeeinrichtungen auch entsprechend große Senktrichter. Dehnen sich diese im Laufe der Zeit immer weiter aus, so ist die Grundwasserneubildung geringer als die Entnahme und es besteht in dem betrachteten Gebiet ein Grundwasserdefizit. In Abhängigkeit der jeweiligen örtlichen Bedingungen (Geologie, Hydrologie, Ökologie und Wirtschaftlichkeit) wird beim Erreichen einer gewissen Absenkung des mittleren Grundwasserspiegels eine Grundwasseranreicherung aus Oberflächengewässern vorgenommen neben einem eventuell möglichen Rückgriff auf Uferinfiltrat. Oftmals wird trotz dieser Maßnahmen kein ausgeglichener Grundwasserhaushalt erzielt, weil die Menge des bewirtschaftbaren Grundwassers nicht bekannt oder nur schwer und relativ ungenau zu quantifizieren ist. Diese hängt von der Grundwasserneubildungsrate ab und es ist der Sinn jeder Bilanzierung des Grundwasserhaushaltes, diese Rate möglichst genau zu bestimmen. Das geschieht generell auf der Grundlage der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung:

$$N = V + A + (R - B)$$

mit $(R - B) \rightarrow 0$ für lange Zeiträume. Es bedeutet

N = Niederschlag

V = Verdunstung

$A = A_o + A_u$

= oberirdischer und unterirdischer Wasserabfluß

$(R - B)$ = Speicherung

R = Rücklage

B = Verbrauch

Hierbei bereitet es oftmals Schwierigkeiten, die wahre Verdunstung, den unterirdischen Abfluß und — in wasserwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten — oft auch den A_o -Anteil genügend genau zu bestimmen.

Eine Alternative zu diesem additiven Ansatz ist die mathematische Analyse des Verhaltens des Grundwassers, wie es durch die Grundwasserstandsganglinien repräsentiert wird. Die Grundwasserstandsganglinien stellen dabei das Ergebnis des Zusammenwirkens von Zeit und Ort, von meteorologischen, physikalischen und geologischen Größen dar. Umfaßt die Analyse auch bestimmte der zuletzt genannten Ausgangsgrößen, so sind Aussagen über die Beziehungen zwischen diesen und den Endgrößen, nämlich den Grundwasserstandsganglinien, möglich. Der Vorteil liegt darin, daß die Ausgangs- und die Endgrößen gemessen bzw. teilweise berechnet werden können. Die Untersuchung dieser Variablen, korreliert mit der örtlichen Geologie, läßt Rückschlüsse auf die Höhe der Grundwasserneubildung zu.

Die Grundwasserstände und die meteorologischen Klimadaten, zeitabhängig registriert, stellen Zeitreihen dar und deshalb wird ihre mathematische Analyse auch als Zeitreihenanalyse bezeichnet. Hierfür stehen sowohl deterministische als auch stochastische Verfahren zur Verfügung. Eine Gegenüberstellung der hauptsächlichsten Methoden erfolgt in Kapitel 4.

In dieser Arbeit wird eine Zeitreihenanalyse von ca. 60 Grundwasserstandsganglinien und Klimadatenreihen aus drei Gebieten von Berlin (W) durchgeführt. Eine flächenbezogene Betrachtungsweise ist notwendig, um Erkenntnisse über Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten im Verhalten der Grundwasserkörper zu erlangen. Diese Erkenntnisse gestatten es gleichzeitig, die jeweilige Grundwasserneubildungsrate einzuschätzen. Hierzu ist es eine notwendige Bedingung, die geologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Verhältnisse des Berliner Raumes zu kennen. Diese werden daher im Folgenden kurz dargelegt.

2. GEOLOGISCHE, HYDROGEOLOGISCHE UND WASSERWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN DES BERLINER RAUMES

2.1 Geologie

Die jüngere geologische Schichtenfolge ist durch viele Bohrungen in ihren großen Zügen gut bekannt. Erste geologische Karten von Teilen des Berliner Raumes wurden schon ab 1875 von der damaligen Königlich Preussischen Geologischen Landesanstalt herausgegeben. Z.Zt. führt der Senator für Bau- und Wohnungswesen mit Hilfe eines großzügigen Bohrprogramms eine engmaschige Erkundung des Untergrundes durch. Der erste Teil dieses Bohrprogramms umfaßte den Norden von Berlin (W) und wurde in den letzten Jahren ausgeführt. Eine Darstellung der Ergebnisse dieser Aufschlußbohrungen gibt FREY (1975). Auf dessen Ausführungen und die von ASSMANN (1957), der die Geologie des Berliner Raumes ausführlich beschreibt, wird hier im wesentlichen Bezug genommen.

2.1.1 Tertiär

In der Schichtenfolge des Tertiärs fehlen im Berliner Raum das Paläozän und das Eozän. Das Unteroligozän, das auch nicht überall vorhanden ist, besteht aus glaukonitischen Sanden und Tonen mit einer stark wechselnden Mächtigkeit von wenigen Dekametern. Das Mitteloligozän besteht aus einem gut konsolidierten, festgelagerten, grünlich-grauen, schwach schluffigen bis schluffigen Ton, dem Septarien- oder Rupelton. Er wurde in Hermsdorf ca. 150 m mächtig vorgefunden. Es kann angenommen werden, daß der Septarienton im Berliner Raum ununterbrochen ausgebildet ist. Diese Tonschicht ist hydrogeologisch sehr bedeutsam, trennt sie doch das liegende haline Wasserstockwerk vom hangenden Süßwasserstockwerk. Das Oberoligozän besteht hauptsächlich aus feinen, schluffigen Sanden mit hohem Glaukonitanteil und eintönigen, mit Glimmer durchsetzten Feinsanden. Die Schichtdicken der Glaukonit- und Quarzsande differieren sehr, insgesamt hat das Oberoligozän stark wechselnde Mächtigkeiten von ca. 7 bis 120 m. Es folgt das Miozän, bestehend aus einer Schichtenfolge von Quarzsanden mit unregelmäßig durchsetzten tonigen und schluffigen Bildungen (Braunkohlenton) und zahlreichen Braunkohlenflözen mit sehr unterschiedlichen Mächtigkeiten.

2.1.2 Quartär

Da im Berliner Raum pliozäne Sedimente fehlen, folgen über einer Erosionsdiskordanz pleistozäne Ablagerungen. Nach WOLDSTEDT & DUPHORN (1974) war in Norddeutschland keine Vereisung aufgetreten, die der Günz-Eiszeit des alpinen Raumes entspricht und daher sind die ältesten pleistozänen Ablagerungen in der Elster-Eiszeit entstanden. Es handelt sich um Geschiebemergel, Sand- und Kiesschichten sehr ungleichartiger Ausbildung (Mächtigkeiten insgesamt ca. 50 bis 80 m). Teilweise liegen diese Schichten unmittelbar auf dem mitteloligozänen Septarienton auf, weil die pleistozänen Gletscher das Miozän stellenweise abgetragen haben. Im nördlichen Teil von Berlin fehlen teilweise die Ablagerungen des Elsterglaziales ganz. Sie sind zusammen mit den Sedimenten des Interglaziales I von den Gletschern der Saale-Eiszeit aufgearbeitet worden. Die Sedimente des Interglaziales I erreichen eine Mächtigkeit von im Mittel etwa 10 bis 20 m und bestehen aus Fein- und Grobsandschichten fluviatilen Ursprungs sowie limnischen Ablagerungen mit einer Tonbank, die als "Paludinenbank" bezeichnet wird.

Die Saale-Eiszeit hinterließ drei Grundmoränen mit wiederum stark wechselnden Mächtigkeiten. Insgesamt beträgt die Ablagerung dieser zweiten Eiszeit im Mittel ca. 30 bis 40 m. Sie besteht aus Schichten von Fein- bis Grobsanden mit dazwischenliegenden Tonmergel- und Bändertonbänken. Das Interglazial II hinterließ nur unzusammenhängende Schichten von geringer Mächtigkeit (ca. 1 bis 3 m), bestehend aus dunkelbraunem Faulschlamm, Torf und Sanden mit humosen Einlagerungen.

Die Ablagerungen der Weichsel-Eiszeit weisen auf den Hochflächen — Barnim-Hochfläche im Norden und Teltow-Hochfläche im Süden Berlins — durchschnittliche Mächtigkeiten von ca. 10 bis 14 m auf und bestehen i. a. aus drei Sand- und Kieshorizonten nebst zwei eingelagerten Grundmoränen.

Im Holozän wirkten die weichseleiszeitlichen Grundmoränen auf den Hochflächen plateaubildend. Je nach seiner Exposition wurde das Grundmoränenmaterial durch Umlagerung aufbereitet und zum großen Teil auch verschiedengradig verlehmt. An der Wende Pleistozän / Holozän haben sich in die Hochflächen junge Täler eingeschnitten, die häufig den durch das Eis vorgeformten Rinnen folgten. Diese wurden wiederum durch fluviatile Einflüsse überprägt. In den Flußtälern lagerten sich Sande und Kiese neben organischen Bildungen ab und über weiten Flächen verbreiteten sich besonders im Berliner Norden Flugsandüberwehungen, die örtlich zur Bildung

von Dünenfeldern führten. Die Mächtigkeiten der äolischen Ablagerungen sind sehr unterschiedlich. Die Dünen im Tegeler Forst erreichen Höhen bis zu 34 m. In den Niederungen sind neben sandigen Ablagerungen verschiedener Korngrößen tonige sowie faulschlammhaltige Lagen, Flachmoortorfe und Moorerden von wenigen Dezimetern bis mehreren Metern Mächtigkeit vorhanden.

2.2 Hydrogeologie und Wasserwirtschaft

Das Berliner Spreetal folgt dem Warschau-Berliner Urstromtal, einer hauptsächlich mit Sanden und Kiesen gefüllten pleistozänen Depression. Nach ASSMANN (1957) und WOLDSTEDT & DUPHORN (1974:153) wird das Gebiet der Weichsel-Eiszeit in das Brandenburger, Frankfurter und Pommersche Stadium untergliedert. Zwischen den Eisrandlagen des Brandenburger und des Frankfurter Stadiums dehnt sich der Berliner Raum aus. Das Berliner Urstromtal führte die Schmelzwasser der Haupteisrandlagen des Frankfurter Stadiums ab (siehe auch HANNEMANN, 1961). Die sandig-kiesigen Ablagerungen der Weichsel-Eiszeit erreichen deshalb im Spreetal besonders große Mächtigkeiten mit bis zu 50 m. Durch dieses Urstromtal, das sich in der Gegend der Berliner Innenstadt (etwa dem Bereich Berlin-Mitte) auf eine Breite von etwa 4 bis 5 km verengt, verläuft in ost-westlicher Richtung das Spreetal und in nord-südlicher Richtung das Haveltal. Begrenzt wird das Urstromtal im Norden und im Süden von den Geschiebemergel-Hochflächen des Barnim (ca. 45 bis 80 m ü. NN) und des Teltow (ca. 40 bis 50 m ü. NN).

Für die Wasserversorgung steht von dem in den tertiären und quartären Lockersedimenten nur der über dem mittelligozänen Septarienton liegende Süßwasserbereich zur Verfügung. Eingelagerte Schichten aus Braunkohlenton, Geschiebemergel und interglazialen Ton führen örtlich zu lokal gespanntem Grundwasser. Nach ASSMANN (1959) liegt in der Gegend von Berlin jedoch insgesamt gesehen ein einziges Süßwasserstockwerk vor. KLOOS (1977: 59ff) zweifelt dies in letzter Zeit zunehmend an und führt aus, daß auf den Hochflächen aufgrund des komplizierteren geologischen Aufbaues sich selbst größere Grundwasserentnahmen an der Oberfläche nicht bemerkbar machten, während registrierte Grundwasserstände aus tieferen Untergrundbereichen auf das Vorhandensein von mehreren Grundwasserstockwerken hindeuten scheinen. Genauere Aufschlüsse in der Frage der Grundwasserstockwerke und ihrer Kommunikation werden von dem schon angesprochenen Bohrprogramm mit mehreren hundert Aufschlußbohrungen erwartet.

Die Entwicklung der wasserwirtschaftlichen Situation von Berlin ist seit Beginn des Jahrhunderts immer wieder recht ausführlich dargestellt worden, u.a. durch KELLER (1916) in einer sehr detaillierten Abhandlung der ober- und unterirdischen Wasserwirtschaft Berlins, durch DENNER (1934,1947,1958) und in letzter Zeit durch KLOOS (1963,1965,1977). Hierbei konnte bei der Beurteilung der wasserwirtschaftlichen Gegebenheiten auf langfristige Grundwasserbeobachtungen zurückgegriffen werden, da der Anfang der planmäßigen Beobachtung des Grundwassers in Berlin im Jahre 1869 mit 29 Grundwassermeßstellen liegt. Während es im Jahre 1937 in Groß-Berlin über 2000 Grundwassermeßstellen gab, lag diese Zahl 1975 bei ca. 1150 für das Gebiet von Berlin (W). Aufgrund der Messungen, die durch dieses Beobachtungsnetz gewonnen werden, ist die Gestalt der Grundwasseroberfläche im Stadtgebiet weitgehend bekannt. Sie wird für jedes Frühjahr und jeden Herbst in den Gewässerkundlichen Jahresberichten des Landes Berlin in Form von Grundwasserhöhenkurven-Karten dargestellt (Tafel 1).

Als Folge der Kriegereignisse war der Verbrauch durch das Fehlen von Gewerbe und Industrie sehr gering und es trat eine Aufhöhung des Grundwasserspiegels ein, die in vielen Teilen Berlins zu einer Grundwasserhöhe führte, die etwa der von 1870 entsprach. Mit dem wirtschaftlichen Aufschwung stieg wiederum der Wasserbedarf an und die Grundwasserstände sanken. KLOOS (1977:20) beziffert diese Absenkung mit durchschnittlich 7 cm/a auf das ganze Stadtgebiet von Berlin (W) bezogen. Dies ist ein Beweis für die anhaltend defizitären Grundwasserbilanzen. Einige Zahlen sollen dies weiter verdeutlichen.

KREMS (1975) hat eine überschlägige Grundwasserbilanz für das Wasserwirtschaftsjahr 1972 erstellt. Danach ist bei einer Grundwasserentnahme von 270 hm³ und einer Grundwasserneubildung von 241 hm³ ein Defizit von 29 hm³ vorhanden.

KLOOS (1977:56) ermittelt aus dem Durchschnittsverhalten der letzten Jahre für das gleiche Wasserwirtschaftsjahr folgende Werte:

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Grundwasserentnahme | 269 hm ³ |
| Grundwasserneubildung | 253 hm ³ |

Defizit 16 hm^3 .

Die unterschiedlichen Werte, besonders bei der Grundwasserneubildung mögen verdeutlichen, wie groß die Schwierigkeiten bei der Ermittlung einer Grundwasserbilanz sind. Daher ist es dringend geboten, weitere und genauere Zusammenhänge aus dem Bereich des Grundwasserverhaltens zu erforschen. Hierzu soll die durchgeführte Untersuchung von Grundwasserstandsganglinien und Klimadatenreihen, wie sie in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben ist, dienen.

3. ANALYSIERTE ZEITREIHEN AUS DREI GEBIETEN VON BERLIN (W).

3.1 Grundwasserstands-Ganglinien

Für die durchgeführten Analysen wurden Gruppen von Grundwassermeßstellen betrachtet, die in drei ca. 5 bis 10 km² großen Gebieten von Berlin (W) liegen. Diese Gebiete sind in Tafel 1 eingezeichnet und umfassen

- das auf der Barnim-Hochfläche liegende Areal Tegeler Forst - Frohnau - Hermsdorf mit vorherrschender Bewaldung (Gebiet A);
- den im wesentlichen im Spreetal liegenden Stadtteil Neukölln mit dichtester Bebauung und Versiegelung der Erdoberfläche (Gebiet B);
- den auf der Teltow-Hochfläche liegenden Stadtteil Lichtenrade mit geringer bis mittlerer Bebauung und hohem Anteil an Gartenland (Gebiet C).

Die Gebiete wurden hauptsächlich nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Der Untergrund, besonders der Aquifer, soll nicht von starken Diskontinuitäten gestört sein.
- Es soll keine oder möglichst nur geringfügige Grundwasser-Beeinflussung durch Entnahme (Absenktrichter) vorliegen, weil genauere Einblicke in das Grundwasserverhalten vor allem Ganglinien von Grundwasserkörpern gestatten, die keinen größeren künstlichen Beeinflussungen ausgesetzt sind.
- Die Abdeckung (Versiegelung) der Erdoberfläche soll verschiedene Grade umfassen, um zu ermitteln, wie weit sich die Versiegelung auf die Grundwasserneubildung auswirkt.

Die Ganglinien folgender Grundwassermeßstellen wurden untersucht; die Meßstellenummer dient gleichzeitig als Nummer der Ganglinie (vergl. Tafeln 2, 3 und 4):

| | Meßstelle (Ganglinie) Nr. | Wasserwirtschaftsjahr von bis (einschl.) | | Länge der Ganglinie in Jahren | |
|---------------------------------|---------------------------------|---|------|----------------------------------|----|
| <u>Gebiet A</u> : Tegeler Forst | 0001 | 1954 | 1975 | 22 | |
| | 0004 | 1954 | 1975 | 22 | |
| | - Frohnau | 0115 | 1954 | 1975 | 22 |
| | - Hermsdorf | 0145 | 1958 | 1975 | 18 |
| | | 0146 | 1958 | 1975 | 18 |
| | | 0150 | 1959 | 1975 | 17 |
| | | 0151 | 1959 | 1975 | 17 |
| | | 0157 | 1959 | 1975 | 17 |
| | | 0176 | 1960 | 1975 | 16 |
| | | 0218 | 1960 | 1975 | 16 |
| | | 0248 | 1954 | 1975 | 22 |
| | | 1140 | 1957 | 1975 | 19 |
| | | 1141 | 1954 | 1975 | 22 |
| | | 1142 | 1954 | 1975 | 22 |
| <u>Gebiet B</u> : Neukölln | 0089 | 1954 | 1975 | 22 | |
| | 0251 | 1954 | 1975 | 22 | |
| | 0488 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0489 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0490 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0491 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0492 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0493 | 1958 | 1975 | 18 | |
| | 0494 | 1958 | 1975 | 18 | |

| | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|----|
| | 0793 | 1946 | 1975 | 30 |
| | 0795 | 1946 | 1975 | 30 |
| | 0802 | 1946 | 1975 | 30 |
| | 0803 | 1946 | 1975 | 30 |
| <u>Gebiet C</u> : Lichtenrade | 0083 | 1964 | 1975 | 12 |
| | 0085 | 1954 | 1975 | 22 |
| | 0086 | 1954 | 1975 | 22 |
| | 0124 | 1958 | 1975 | 18 |
| | 0125 | 1958 | 1975 | 18 |
| | 0126 | 1958 | 1975 | 18 |
| | 0127 | 1958 | 1975 | 18 |
| | 0129 | 1958 | 1975 | 18 |
| | 0173 | 1960 | 1975 | 16 |
| | 0217 | 1960 | 1975 | 16 |

Die Messung der Grundwasserstände wurde etwa bis 1965 monatlich durchgeführt, danach erfolgte eine allmähliche Umstellung auf 14-tägige Meßabstände. Für die hier durchgeführte Zeitreihenanalyse wird jedoch immer mit äquivalenten Zeitintervallen von $\Delta t = 1$ Monat gerechnet. Das beruht auf der Tatsache, daß die Analyse einer Zeitreihe mit verschiedenen Meßintervallen eine Aufspaltung in Teilzeitreihen erfordert. Dies ist bezüglich der Aussagefähigkeit ungünstig, weil die Teilzeitreihen einen kürzeren Zeitraum umfassen als die Gesamtreihe. Hinzu kommt, daß sich bei den vorliegenden Ganglinien die Höhenänderung der Grundwasseroberfläche innerhalb eines 14-tägigen Zeitraumes nur in vernachlässigbaren cm-Bereichen bewegt. Es soll aber darauf hingewiesen werden, daß es durchaus Grundwasserstandsganglinien geben kann, bei denen dies nicht zu vertreten ist und z.B. kurze Perioden von Interesse sind.

Die Schichtenfolge der untersuchten Pegel sind in Form von Säulenprofilen in den Tafeln 5 bis 10 dargestellt.

3.2 Klimatologische Zeitreihen

Der Grundwasserstand ist abhängig von den schon in der Einleitung genannten Größen. Zweifellos sind die meteorologischen Variablen die überaus maßgebenden. Da das Klima über einer größeren Fläche wie Berlin mit besiedelten und unbesiedelten Gebieten kleinere Unterschiede aufweisen kann, wurde das in dem jeweiligen Gebiet herrschende örtliche Klima in die Untersuchungen einbezogen. Als die das Klima repräsentierenden Größen werden in dieser Arbeit die folgenden Parameter angesehen:

- Niederschläge in mm/Monat
- Monatsmittel der Temperatur um 14 Uhr in Grad Celsius
- Monatsmitteltemperatur in Grad Celsius
- Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit um 14 Uhr in % .

Diese Aufzeichnungen stammen aus den in den einzelnen Gebieten liegenden bzw. nächstgelegenen Klima- und Niederschlags-Meßstationen. Es sind dies

für das Gebiet A die Klimastation in Frohnau (Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Berlin);

Länge der Meßreihen: von Nov. 1958 bis Okt. 1975 = 17 Wasserwirtschaftsjahre;

für das Gebiet B die Klimastation auf dem Zentralflughafen Tempelhof (Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Berlin);

Länge der Meßreihen: von Nov. 1947 bis Okt. 1975 = 28 Wasserwirtschaftsjahre;

für das Gebiet C die Niederschlagsmeßstelle Lichterfelde (Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Berlin) für die Niederschläge und

die Klimastation Dahlem des Meteorologischen Institutes der Freien Universität Berlin für die Temperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit;

Länge der Meßreihen: von Nov. 1957 bis Okt. 1975 = 18 Wasserwirtschaftsjahre;

- Monatsmittel des Luftdruckes der Station Dahlem des Meteorologischen Institutes der FU Berlin. Der Luftdruck ist auf Null Grad Celsius und Normalschwere korrigiert und auf NN reduziert. Beim Luftdruck kann davon ausgegangen werden, daß dieser über dem Berliner Gebiet gleich ist und nur vernachlässigbare Luftdruckunterschiede aufweist. Die Lage der Wetterstationen ist aus Tafel 1 ersichtlich.

Die Längen der klimatologischen Reihen richteten sich nach denen der entsprechenden Grundwasserstands-Ganglinien.

Im Sinne von VAN EIMERN (1968) und KLAUSING & SALAY (1976) wird in dieser Arbeit die Differenz aus Niederschlag minus potentieller Evapotranspiration als klimatische Wasserbilanz definiert. Sie ist einfach zu ermitteln, weil die potentielle Evapotranspiration ohne Schwierigkeiten aus meteorologischen Daten berechnet werden kann. DAMMANN (1965:318) beschreibt vereinfachend die potentielle Evapotranspiration mit "was verdunsten könnte, wenn genügend Wasser vorhanden wäre". Dies wird oft in dem für die Grundwasserneubildung wichtigen Winterhalbjahr der Fall sein, so daß hier aktuelle und potentielle Evapotranspiration etwa gleiche Größe besitzen.

Die potentielle Evapotranspiration wurde in allen 3 Teilgebieten zum Vergleich jeweils nach HAUDE und nach THORNTHWAITE berechnet, um zu ermitteln, ob sich größere Unterschiede ergeben. Der Vorteil beider Berechnungsverfahren liegt in der geringen Anzahl klimatischer Größen, die zudem überall gemessen und somit in genügender zeitlicher Länge vorliegen. Im einzelnen gehen sie aus den nachfolgend aufgeführten Gleichungen hervor. Nach HAUDE (in RICHTER & LILLICH, 1975:116) ist die tägliche

$$\text{potentielle Evapotranspiration} = x \cdot P_{14} \cdot (1 - F_{14}/100) \quad \text{in mm/d} \quad (3.2.1)$$

mit P_{14} = Sättigungsdampfdruck der Luft (bei der Temperatur der Luft um 14 Uhr)

F_{14} = relative Luftfeuchtigkeit um 14 Uhr

x = Monatskoeffizient

= 0.26 für Oktober bis Februar

= 0.33 für März und August

= 0.39 für April und Mai

= 0.37 für Juni

= 0.35 für Juli

= 0.31 für September

P_{14} kann nach der Formel von MAGNUS (KÖHLER, 1926:67) berechnet werden:

$$P_{14} = 4.579 \cdot 10^{\frac{7.45 \cdot t_{14}}{234.67 + t_{14}}} \quad (3.2.2)$$

mit t_{14} = Temperatur um 14 Uhr

Statt der täglichen kann nach HAUDE (1959) auch die monatliche potentielle Evapotranspiration berechnet werden. Hierzu werden die Monats-Mittelwerte der 14 Uhr-Tagestemperatur und der relativen Feuchtigkeit um 14 Uhr benötigt. HAUDE weist ausdrücklich darauf hin, daß "dieser mittlere Monatswert des Sättigungsdefizites... immer kleiner ausfällt, als wenn der Mittelwert aus der Summe der einzelnen Tageswerte des Sättigungsdefizites von 14 Uhr, dividiert durch die Zahl der Monatstage, berechnet wird. Dieser Unterschied ist klimaabhängig. Er beträgt über alle Monate des Jahres für Mitteleuropa 9%. Diese Beziehung ist sehr streng." In der vorliegenden Berechnung wurde dies durch einen entsprechenden Korrekturfaktor berücksichtigt.

Nach THORNTHWAITE (in UHLIG, 1959) ist die korrigierte monatliche

$$\text{potentielle Evapotranspiration} = 16 \left(10 \frac{t_m}{I}\right)^a k \quad \text{in mm/Monat} \quad (3.2.3)$$

mit $I = \sum_{m=1}^{12} (t_m / 5)^{1.51}$ (Wärmeindex)

t_m = Monatsmitteltemperatur

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 17.92 \cdot 10^{-3} \cdot I + 0.49$$

k = Korrekturfaktor in Abhängigkeit der geographischen Breite (Berlin 52°28')

= 0.76 für November

= 0.70 für Dezember

= 0.74 für Januar

= 0.78 für Februar

= 1.02 für März

= 1.15 für April

= 1.33 für Mai

= 1.36 für Juni

- = 1.37 für Juli
- = 1.25 für August
- = 1.06 für September
- = 0.92 für Oktober

Ein Vergleich der Ergebnisse beider Berechnungsverfahren zeigte, daß die höheren Verdunstungsraten im Sommerhalbjahr allgemein bei THORNTHWAITE auftraten und mehr in der zweiten Jahreshälfte lagen. Darauf hat schon UHLIG (1959:389) hingewiesen und ausgeführt, daß in unseren Breitengraden aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit in der zweiten Jahreshälfte nicht diese hohen Werte auftreten können und DAMMAN (1965:319) hob in diesem Zusammenhang die größere Variationsbreite der HAUDEschen Gleichung hervor, die, auf die Monatswerte bezogen, sich besser den klimatischen Bedingungen in Deutschland anpaßt. Auf diesen Sachverhalt sind auch die mitunter recht großen Differenzen zwischen den Monatswerten der beiden Gleichungen zurückzuführen. Insgesamt gesehen gleichen sich jedoch die Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration wiederum einander an, wie es aus Abbildung 1 für das Gebiet B (Neukölln) ersichtlich ist. Danach trat die maximale Differenz zwischen den Jahressummen im Wasserwirtschaftsjahr 1959 auf und betrug im

| Gebiet | A | B | C |
|-------------------|----------|----------|----------|
| nach HAUDE | 760 mm/a | 789 mm/a | 752 mm/a |
| nach THORNTHWAITE | 655 mm/a | 682 mm/a | 663 mm/a |
| Differenz | 105 mm/a | 107 mm/a | 89 mm/a |

Betrachtet man die Durchschnittswerte der gesamten Reihen, so ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen:

| Gebiet | A | B | C |
|--|----------|----------|----------|
| Durchschnittswerte | | | |
| Niederschlag | 570 mm/a | 590 mm/a | 579 mm/a |
| 14 Uhr Temperatur (Monatsmittel) | 11.7°C | 12.0°C | 12.0°C |
| Monatsmittel-Temperatur | 8.5 °C | 9.4 °C | 8.8 °C |
| potentielle Evapotranspiration n. HAUDE | 622 mm/a | 665 mm/a | 621 mm/a |
| potentielle Evapotranspiration n. THORNTHWAITE | 619 mm/a | 651 mm/a | 630 mm/a |

Zum Vergleich sei auf andere Untersuchungen verwiesen. SPANGENBERG (1973) ermittelt im Rahmen von Wasserbilanzbetrachtungen im Aachener Raum die Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration nach HAUDE, THORNTHWAITE und TURC. Er kommt zu dem Schluß, daß die Werte nach THORNTHWAITE gegenüber denen nach HAUDE und TURC zu hoch seien. Festzustellen ist, daß die Werte nach THORNTHWAITE für das Aachener Gebiet mit denen der hiesigen Gebiete recht gut übereinstimmen.

VAN EIMERN (1968) kommt bei Untersuchungen in Weihenstephan auch zu guten Übereinstimmungen zwischen den potentiellen Evapotranspirationen, berechnet nach THORNTHWAITE und nach HAUDE.

Insgesamt werden aus den Berliner Gebieten folgende klimatologische Zeitreihen untersucht (vergl. Taf. 4):

| Gebiet | A | B | C |
|--|------|------|------|
| Reihen-Nr. | | | |
| monatliche Niederschläge | 5001 | 5102 | 5201 |
| 14 Uhr - Monatsmittel-Temperatur | 5002 | 5102 | 5203 |
| Monatsmittel-Temperatur | 5003 | 5103 | 5203 |
| relative Luftfeuchtigkeit (Monatsmittel) | 5004 | 5104 | 5204 |
| potentielle Evapotranspiration n. HAUDE | 5005 | 5105 | 5205 |
| potentielle Evapotranspiration n. THORNTHWAITE | 5006 | 5106 | 5206 |
| klimatische Wasserbilanz (HAUDE) | 5010 | 5110 | 5210 |
| klimatische Wasserbilanz (THORNTHWAITE) | 5011 | 5111 | 5211 |
| für die drei Gebiete | | | |
| Monatsmittel des Luftdruckes in mbar der Station Dahlem , auf 0 °C und Normalschwere korrigiert und auf NN reduziert | | 5300 | |

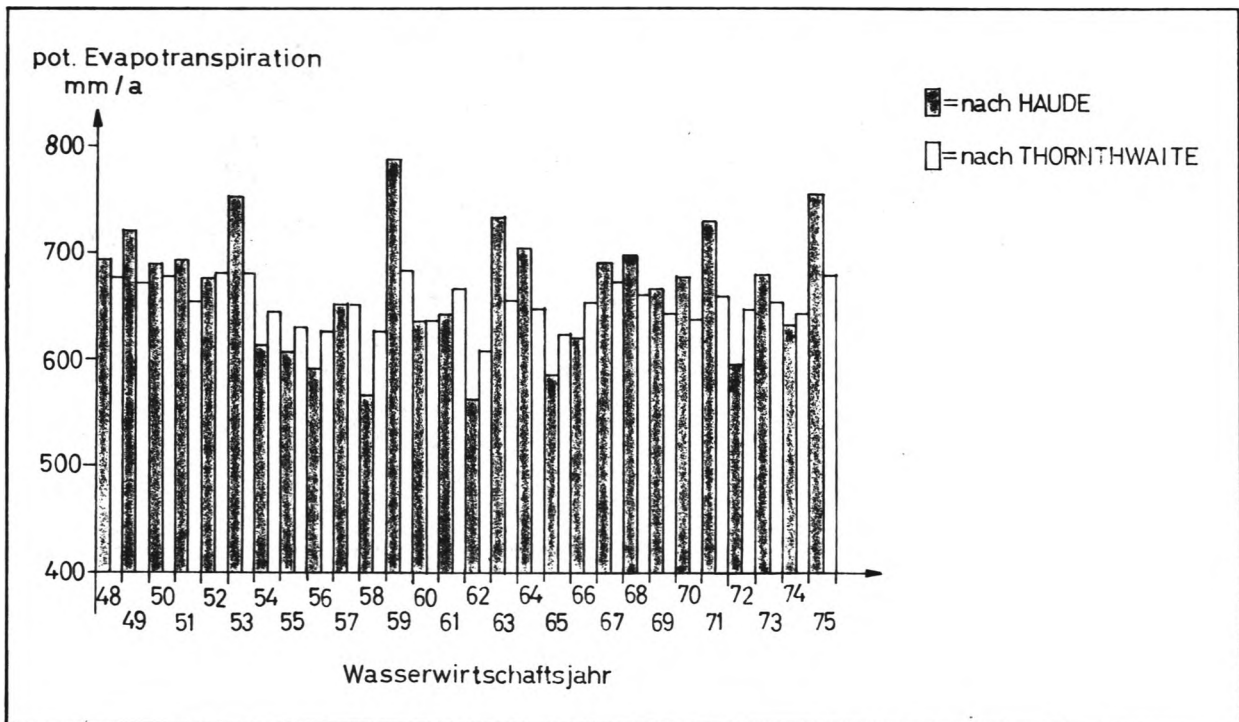


Abb. 1: Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration nach HAUDE und nach THORNTHWAITE für das Gebiet B.

Die Längen der klimatologischen Reihen leiten sich aus den Längen der Aufzeichnungen ab und entsprechend sind sie im Gebiet A 17 Wasserwirtschaftsjahre, im Gebiet B 28 Wasserwirtschaftsjahre und im Gebiet C 18 Wasserwirtschaftsjahre lang.

3.3 Qualität der vorliegenden Datenreihen (Kurze Fehlerbetrachtung)

Da bei der hier durchgeführten Zeitreihenanalyse Monatswerte betrachtet werden, stellt die unterschiedliche zeitliche Länge der Monate gegenüber der Voraussetzung der Äquivalenz der zeitlichen Meßabstände eine gewisse Ungenauigkeit dar. Exakt ist $\Delta t = 365 : 12 = 30.41$ Tage. Es besteht hier also ein systematischer zeitlicher Fehler, der sich aber über den Zeitraum eines Jahres selber ausgleicht und keine weiteren Folgen hat. Daneben gibt es noch die eigentlichen Meß- und Übertragungsfehler. Es wurde angenommen, daß diese dem Normalverteilungsgesetz der Fehler folgen und sich daher gegenseitig aufheben. Dies gilt für die Grundwasserstandsganglinien und Klimadatenreihen gleichermaßen. Für die Grundwasserstandsganglinien allein bestehen noch zufällige zeitliche Fehler, die davon herrühren, daß nicht immer genau am gleichen Wochentag die Messung durchgeführt wurde oder werden konnte. Die aus dieser zeitlichen Ungenauigkeit folgenden Differenzen in der Grundwasseroberfläche sind vernachlässigbar gering, da (lt. mündlicher Mitteilung von Herrn Schneemann; Senator für Bau- und Wohnungswesen) eine Änderung der Grundwasseroberfläche innerhalb weniger Tage in den drei betrachteten Gebieten kaum beobachtet wurde. Außerdem kann angenommen werden, daß auch diese Fehler dem Normalverteilungsgesetz folgen. Zusätzlich wurden die Ganglinien auf "Ausreißer" (outliers) kontrolliert. Werte, die offensichtlich falsch waren, wurden durch den Mittelwert aus den Nachbarwerten ersetzt.

HAMPE (1977) hat normalverteilte lineare stochastische Prozesse (s. Kapitel 4) untersucht und festgestellt, daß auch bei Vorhandensein von einzelnen Ausreißern nicht zusätzlich die Gefahr einer Mißinterpretation des Spektrums besteht. Danach wäre ein einzelnes kurzes Zufallsereignis, wie es von KISIEL (1969: 14 "catastrophic event") angeführt wird, ohne weiteren Einfluß auf das Spektrum.

4. ANALYSE VON ZEITREIHEN

4.1 Instationäre Zeitreihen - Bestimmung von Trendfunktionen

Eine notwendige Voraussetzung für die Existenz des Spektrums und damit für die Spektraluntersuchung von Zeitreihen ist deren Stationarität. Jede Zeitreihe ist daher auf Instationarität hin zu überprüfen, diese gegebenenfalls zu bestimmen und aus der Reihe zu eliminieren (Abb. 2). Die Instationarität repräsentiert die langfristige Entwicklungstendenz des betrachteten Phänomens und wird allgemein als Regression, im Zusammenhang mit der Zeit als Trend bezeichnet. In Abhängigkeit der Reihenlänge und damit für einen gewissen zukünftigen Zeitraum ermöglicht der Trend sowohl eine Aussage über das weitere Verhalten der Grundwasseroberfläche als auch zugleich eine Abschätzung des bewirtschaftbaren Grundwasservorrates. Die Genauigkeit der Aussage hängt von einer bestmöglichen Approximation der Instationarität durch eine entsprechend gewählte Funktion ab. Da sich zudem das Spektrum leicht durch einen nicht oder nur unvollständig entfernten Trend verfälscht darstellt, ist dessen Bestimmung und Eliminierung stets größte Aufmerksamkeit zuzuwenden.

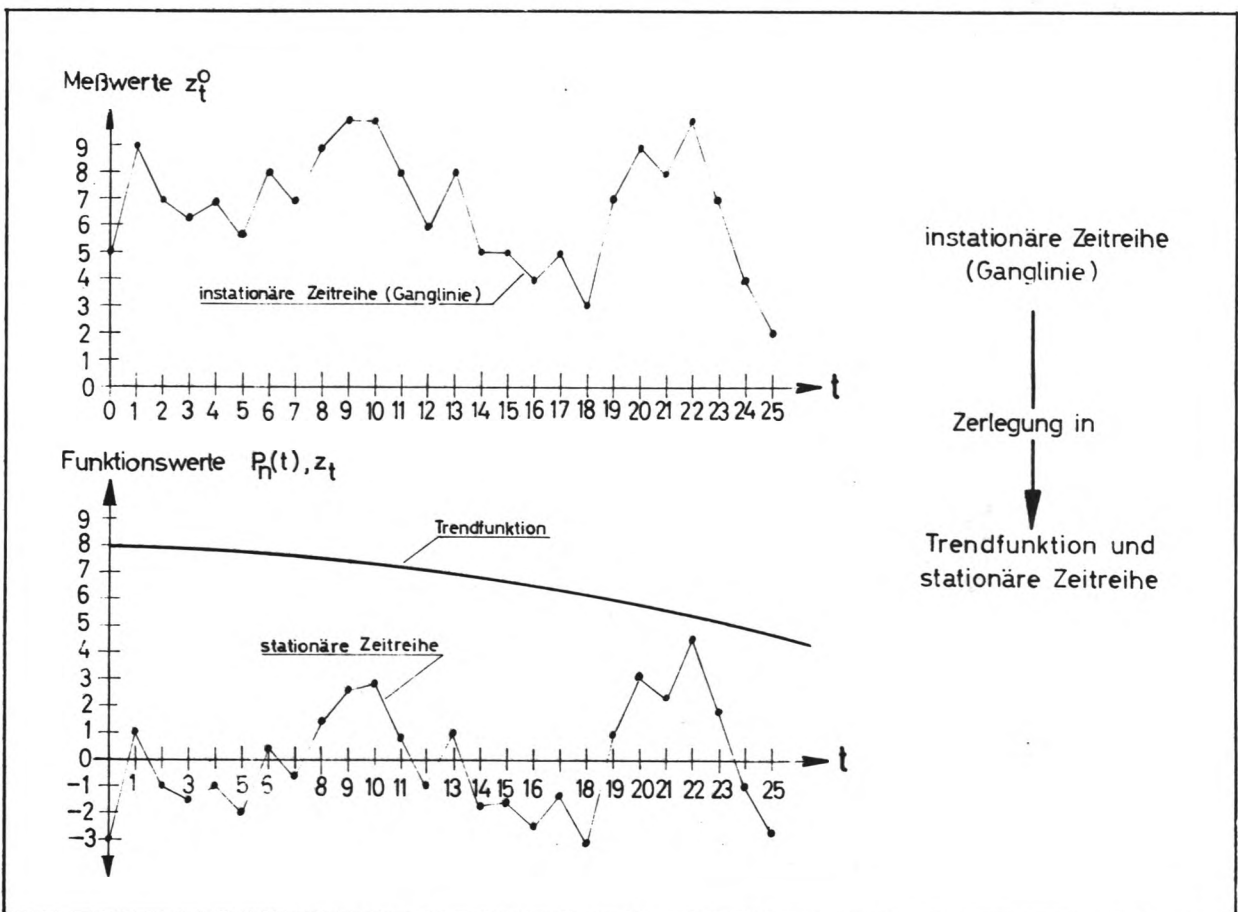


Abb. 2: Instationäre Zeitreihe und ihre Zerlegung.

Bei der üblichen Art der Überprüfung auf Instationarität wird die vorliegende Zeitreihe in gleichlange Teilsreihen unterteilt, deren einzelne Mittelwerte und Varianzen gebildet und diese miteinander verglichen. Zeigt insbesondere der Mittelwert Abweichungen in einer Richtung, so kann auf das Vorhandensein einer Instationarität geschlossen werden, ohne jedoch eine Aussage über deren mathematische Funktion machen zu können. Eine andere Art der Prüfung auf Instationarität hat sich während der praktischen Anwendung als sehr günstig erwiesen. Bei

dieser wird die Spektraldichte der instationären Zeitreihe berechnet. Zeigt sich das Spektraldichte-Maximum im ersten Frequenzintervall ($T \rightarrow \infty$), so kann mit großer Sicherheit auf einen vorhandenen Trend geschlossen werden. BOTOW (1975:35) führt aus, daß i.a. ein linearer Trend angenommen wird. Dies stellt in vielen Fällen nur eine grobe Näherung dar und kann zu verfälschten Spektren führen. Eine bessere Approximation der Trendfunktion wird durch Exponentialfunktionen oder Polynome erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit werden Polynome bis zum 3. Grad als Trendfunktion überprüft:

$$P_3(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \quad (4.1.1)$$

Es besteht die Schwierigkeit, den Grad des Polynomes zu schätzen, da i.a. a priori keine Information über die Trendfunktion vorliegt. Hierbei kann die Differenzenmethode (variate-difference-method) eine Hilfe bedeuten. Die Differenzenmethode zur Bestimmung des Grades n eines Polynomes zur Approximation ist bei gegebenen Funktionswerten aufgrund einer in diesem Falle natürlich unbekanntem deterministischen Funktion ein bekanntes Verfahren. Bei zufallsbehafteten Funktionen wird ein modifiziertes Verfahren angewandt, das unter Bildung der k -ten Differenzen $\Delta^k z(t)$ eine Abschätzung der Varianz der 2. statistischen Momente der Zeitreihe für $k=1,2,3,\dots$ ermöglicht. Die Abschätzung stabilisiert sich bei einem bestimmten k , das als Anhalt für den Grad des Polynomes dienen kann, welches die systematische Komponente repräsentiert. Eine ausführliche Erörterung der Methode sowie das in dieser Arbeit angewandte Berechnungsschema ist in KENDALL & STUART (1966:384 ff) dargestellt. Außerdem wird auf die grundlegenden Ausführungen von ANDERSON (1923,1926,1927) verwiesen, der u.a. anführt, daß die Anwendung hoher Differenzen nur bei langen Reihen sinnvoll ist und im allgemeinen der erste "stabile" Wert auch der beste ist. Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, daß die Prognostizierung des Grundwasserspiegels nur für einen begrenzten Zeitraum durchgeführt werden kann, weil jedes Polynom für weiter zunehmendes t unbegrenzt steigt oder fällt.

Die Bestimmung der Koeffizienten des Polynomes erfolgt mit der Methode der kleinsten Quadrate. Als höchster Grad des Polynomes wird in dieser Arbeit $n \leq 3$ angenommen. Es hat sich gezeigt, daß bei den vorliegenden Reihen kein höherer Grad notwendig war.

Im Falle einer diskreten Funktion hat die Größe

$$R = \sum_{t=0}^N [z_t^0 - P_n(t)]^2 \quad z_t^0 = \text{Meßwert zur Zeit } t \quad (4.1.2)$$

$$= \sum_{t=0}^N [z_t^0 - (\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3)]^2 \quad t = 0, 1, \dots, N$$

dann ein Minimum, wenn daß Polynom $P_n(t)$ die Funktion z_t^0 ($t = 0, 1, 2, \dots, N$) am besten approximiert. Durch partielle Differentiation und Minimierung (KREYSZIG, 1974)

$$\frac{\partial R}{\partial \beta_0} = 0; \quad \frac{\partial R}{\partial \beta_1} = 0; \quad \dots \dots \dots \quad \frac{\partial R}{\partial \beta_n} = 0 \quad (4.1.3)$$

ergibt sich zur Berechnung der β_j ein Gleichungssystem von $n+1$ Normalgleichungen. Für den Fall $n=3$ folgt:

$$\begin{array}{l} \beta_0 N + \beta_1 \sum_{t=1}^N t + \beta_2 \sum_{t=1}^N t^2 + \beta_3 \sum_{t=1}^N t^3 = \sum_{t=1}^N z_t \\ \beta_0 \sum_{t=1}^N t + \beta_1 \sum_{t=1}^N t^2 + \beta_2 \sum_{t=1}^N t^3 + \beta_3 \sum_{t=1}^N t^4 = \sum_{t=1}^N z_t t \\ \beta_0 \sum_{t=1}^N t^2 + \beta_1 \sum_{t=1}^N t^3 + \beta_2 \sum_{t=1}^N t^4 + \beta_3 \sum_{t=1}^N t^5 = \sum_{t=1}^N z_t t^2 \\ \beta_0 \sum_{t=1}^N t^3 + \beta_1 \sum_{t=1}^N t^4 + \beta_2 \sum_{t=1}^N t^5 + \beta_3 \sum_{t=1}^N t^6 = \sum_{t=1}^N z_t t^3 \end{array} \quad (4.1.4)$$

Die Koeffizienten β_j von Polynomen mit geringerem als 3. Grades ergeben sich aus demselben Gleichungssystem durch Streichung bestimmter Zeilen und Spalten.

Die Funktionswerte $P_n(t)$, $t = 0, 1, \dots, N$, werden von der Funktion z_t^0 , $t = 0, 1, \dots, N$ subtrahiert:

$$z_t = z_t^0 - P_n(t) \quad (4.1.5)$$

Die vorliegende Restfunktion ist nun stationär und hat den Mittelwert Null. BOX & JENKINS (1970:378) schlagen unter anderem auch vor, statt der Originalreihe die k-te Differenzenreihe zu untersuchen:

$$\begin{aligned} k = 1 : \quad \Delta^1 z_t &= z_{t+1} - z_t \\ k = 2 : \quad \Delta^2 z_t &= \Delta^1 z_{t+1} - \Delta^1 z_t \\ k = 3 : \quad \Delta^3 z_t &= \Delta^2 z_{t+1} - \Delta^2 z_t \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

Dieses Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit nicht angewandt, da als Bezugsreihe generell nur die vom Trend befreite Reihe betrachtet wird.

In den folgenden Kapiteln werden nur noch stationäre homogene Zeitreihen betrachtet. In dieser Arbeit wird allgemein eine Änderung der Charakteristik der Ganglinie als Inhomogenität angesehen. Zeitreihen, bei denen Hinweise auf Heterogenitäten vorliegen, werden im einzelnen in Kapitel 6 behandelt. Zum Begriff der Inhomogenität oder Heterogenität wird unter anderem auf die Untersuchung von YEVJEVICH & JENG (1969) und die Ausführungen von KISIEL (1969) verwiesen.

4.2 Methoden der Analyse von stationären Zeitreihen

4.2.1 Allgemeines

Es liegt nahe, im Verhalten der Grundwasseroberfläche, wie bei vielen geophysikalischen Vorgängen, gewisse zyklische Eigenschaften zu vermuten, ohne diesen Zyklen unbedingt eine Periodizität im strengen Sinne zuzuordnen. Können Zyklen in dieser Form mittels eines geeigneten Verfahrens nachgewiesen und quantifiziert werden und stellen sie zudem einen wesentlichen Bestandteil des Vorganges dar, so führt dies zur Klärung innerer und äußerer Zusammenhänge und damit zum Rückschluß auf verursachende Phänomene. Die Aufgabe besteht nun darin, die Schwankungen bzw. Schwingungen, die in einer Zeitreihe (Grundwasserstandsganglinie, klimatologische Reihe) enthalten sind, als Periodizitäten in einer verallgemeinerten Form zu quantifizieren.

Zur Analyse von stationären Zeitreihen stehen im wesentlichen drei mathematische Verfahren zur Verfügung. Entsprechend ihrer historischen Entwicklung sind dies

- 1) die auf der harmonischen oder Fourieranalyse aufbauende Periodogrammanalyse von A. SCHUSTER (1906 a, b);
- 2) die auf der Theorie der stochastischen Prozesse (u.a. KHINTCHIN, 1934) in Verbindung mit der Methode von BLACKMAN & TUKEY (1959) basierende Methode;
- 3) die Schnelle Fourier-Transformation (FFT) nach COOLEY & TUKEY (1969).

4.2.2 Periodogrammanalyse

Bei der Zeitreihenanalyse mit den älteren Ansätzen liegt die Vorstellung einer Komponentenzerlegung zugrunde, das heißt, das Zeitreihenelement setzt sich aus reinen periodischen Komponenten und einer Zufallskomponente zusammen. Dabei werden erstere als real angesehen, während letztere in der Regel die Bedeutung eines nicht mehr erklärbaren Restes hat (NAEVE, 1969). Entsprechend werden die periodischen Komponenten als deterministische Größen aufgefaßt und behandelt.

Zu diesen Methoden kann auch die von SCHUSTER (1906 a, b) bezüglich der Sonnenfleckenperioden auf der Grundlage der Fourier-Analyse entwickelte Periodogrammanalyse gezählt werden. Es handelt sich im wesentlichen um die Quadrate der Amplituden der Einzelschwingungen, aus denen diese Beobachtungsreihe besteht, und die als Ordinatenwerte in Abhängigkeit der Periodenlänge T (Abszisse) aufgetragen werden. Durch den Vergleich mit seinem physikalischen Analogon, nämlich der Zerlegung des Lichtes, gebraucht SCHUSTER auch schon den Begriff des

"Spektrums".

Eine harmonische Analyse einer Datenreihe allein sagt noch nichts über ihren inneren Zusammenhang aus. Deshalb führte SCHUSTER (1906 b) auch schon einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz in Form einer e-Funktion für die Erwartung (expectancy) ein, mit dem die Wahrscheinlichkeit des realen Auftretens der ermittelten Perioden abgeschätzt werden konnte. Im Folgenden werden die mathematischen Zusammenhänge der Periodogramm- bzw. Fourieranalyse kurz dargelegt.

Eine periodische kontinuierliche Funktion kann durch eine Überlagerung sinusförmiger Schwingungen dargestellt werden. Eine Funktion ist periodisch, wenn die Identität

$$f(t) \equiv f(t+T) \quad \text{mit } T = \text{Periodendauer} \quad (4.2.2.1)$$

bzw. mit $T = 2\pi$

$$f(t) \equiv f(t+2\pi) \quad \text{für alle } t \quad (-\infty < t < \infty) \quad (4.2.2.2)$$

besteht. Die Fourierreihe lautet für diesen Fall (LAUGWITZ, 1967):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} (a_j \cos jt + b_j \sin jt) \quad (4.2.2.3)$$

mit
$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (\text{Mittelwert der Funktion})$$

$$a_j = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos jt dt$$

$$b_j = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin jt dt$$

Die vorliegenden Beobachtungsreihen sind jedoch nicht-analytisch gegebene diskrete Funktionen, deren Funktionswerte z_t ($t = 0, 1, \dots, N$) an $N+1$ äquidistanten Stützstellen vorliegen. Unter allgemeinen Bedingungen erfolgt eine Approximation bei ungerader Anzahl von Meßdaten (bzw. Stützstellen) durch die trigonometrische Reihe (STUMPF, 1937:35ff)

$$z_t = A_0 + \sum_{j=1}^{N/2} (A_j \cos 2\pi \lambda_j t + B_j \sin 2\pi \lambda_j t) \quad (4.2.2.4)$$

mit
$$A_0 = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N z_t = \bar{z}$$

$$A_j = \frac{2}{N+1} \sum_{t=0}^N z_t \cos 2\pi \lambda_j t$$

$$B_j = \frac{2}{N+1} \sum_{t=0}^N z_t \sin 2\pi \lambda_j t$$

Die Bereichslänge $(0, N)$ ist zugleich die Länge $T_1 = N \cdot \Delta t$ der Grundperiode. Sie entspricht einer vollen Sinusschwingung mit $T = 2\pi$. Bei gleichen Meßabständen $\Delta t = 1$ (Monat) ergeben sich die weiteren Perioden durch ganzzahlige Division der Grundperiode:

$$T_2 = \frac{T_1}{2} = \frac{N}{2} \quad \text{Monate} \quad (4.2.2.5)$$

$$T_{\frac{N}{2}} = \frac{T_1}{N/2} = 2 \quad \text{Monate}$$

Die entsprechenden Frequenzen sind:

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{N} \quad \left[\frac{1}{\text{Monate}} \right] \quad (\text{Grundfrequenz})$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{2}{N} \quad \text{''}$$

(4.2.2.6)

$$\lambda_{\frac{N}{2}} = \frac{1}{2} \quad \text{''} \quad (\text{Nyquist- oder Faltungsfrequenz})$$

Die letzte Schwingung, die noch beobachtet werden kann, ist die mit der Dauer $T_{N/2}$. Die Quadrate der Amplituden der Teilschwingungen

$$I_j = C_j^2 = A_j^2 + B_j^2 \quad (4.2.2.7)$$

werden als Ordinaten I_j in Abhängigkeit der Frequenzen des Periodogramms aufgetragen. Eine andere Darstellungsweise für die Periodogrammordinaten ist

$$I_j^* = \frac{C_j^2}{2\sigma^2} \quad \text{mit} \quad \sigma^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N C_j^2 \quad (4.2.2.8)$$

Aus beiden Gleichungen ist ersichtlich, daß durch die Bildung der Quadrate die großen Amplituden gegenüber den kleineren eine stärkere Bedeutung erhalten. Die diesen großen Amplituden entsprechenden Schwingungen werden als die hauptsächlichsten angesehen, aus denen der Vorgang besteht. In Gl. (4.2.2.8) stellt I_j^* den prozentualen Betrag des j -ten Amplitudenquadrates am Gesamtbetrag der Amplitudenquadrate aller Schwingungen dar und wird oft als Energie dieser j -ten Schwingung angesehen. Daher wird auch in anderen physikalischen Bereichen von Energiespektrum gesprochen (KÖNIG & WOLTERS, 1972).

Die harmonische Analyse einer endlichen diskreten, nicht regelmäßigen Funktion weist Schwächen auf. Besonders in den Fällen, in denen die Periodizitäten von größeren Unregelmäßigkeiten überdeckt sind, ist bei ihrer Anwendung folgendes zu bedenken:

die Bedingung Gl. (4.2.2.2) ist bei den endlichen Reihen nicht erfüllt, weil die Funktion im unendlichen Bereich nicht definiert ist. Es ergibt sich ein diskontinuierliches Spektrum (Linienpektrum), dessen Liniendichte von der Länge der Reihe abhängt. Desweiteren ist zu berücksichtigen, daß im Spektrum eine Linie ($=I_j$) genau dann die richtige Schwingung anzeigt, wenn diese auch genau eine der harmonischen Schwingungen ist, die sich aus der Grundperiode durch ganzzahlige Division ergibt. Das ist jedoch in allen praktisch vorkommenden Reihen nicht der Fall, da die Beobachtungslänge willkürlich ist und dem natürlichen Schwingungsvorgang nicht entspricht. Man erhält also ein Spektrum, das die wahre Periode nur ungefähr anzeigt (STUMPF, 1937).

Die vorgenannten Nachteile sind auch in statistischen Beziehungen zu erkennen. Betrachtet man I_j selbst als Zufallsvariable und ist $\zeta(\lambda_j)$ eine Ordinate des wahren Spektrums so kann nachgewiesen werden, daß für $N \rightarrow \infty$ und somit $j \rightarrow \infty$

$$\lim_{j \rightarrow \infty} E(I_j) = \zeta(\lambda_j) \quad (4.2.2.9)$$

und

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \text{Varianz}(I_j) = [\zeta(\lambda_j)]^2 \quad \lambda \neq 0 \quad (4.2.2.10)$$

ist. Nach Gl. (4.2.2.9) ist das Periodogramm zwar asymptotisch erwartungstreu, jedoch konvergiert die Varianz Gl. (4.2.2.10) unabhängig von der Länge N der Beobachtungsreihe nicht gegen Null, sondern gegen einen endlichen Wert (GRENANDER & ROSENBLATT, 1956:91ff). Das Periodogramm ist daher eine inkonsistente Schätzfunktion. Das hat zur Folge, daß das Periodogramm unregelmäßig um den wahren Wert hin- und herschwankt. Formal bezeichnen alle Spitzen des Periodogramms Schwingungen, die an der Bildung des Phänomens beteiligt sind und es besteht

die Schwierigkeit, diese Schwingungen zu interpretieren. Es kann jedoch eine Verbesserung des Periodogramms durch eine Glättungs- oder Ausgleichsfunktion erfolgen. DAVIS (1973:269) schlägt hierfür eine einfache gewichtete Mittelung vor. BÜTOW (1975:48) gelangte zu der Auffassung, daß bei der Periodogramm-Analyse von Grundwasserstandsganglinien eine Korrektur des (Power) Spektrums nicht notwendig sei. Insofern dürften eindeutige Aussagen nur dann möglich sein, wenn das Spektrum herausragende Spitzen enthält. KÖNIG & WOLTERS (1972:60) sehen das ungeglättete Periodogramm als unbrauchbar an.

Abschließend kann festgestellt werden, daß i.a. Beobachtungsreihen so kompliziert sind, daß sie durch deterministische Ansätze nur unvollkommen untersucht werden können. Daher wird die in neuerer Zeit auf der Grundlage der Theorie der stochastischen Prozesse entwickelte Methode als die zur Untersuchung der hier vorliegenden Zeitreihen als die geeignetste angesehen. Sie berücksichtigt den stochastischen Charakter der Grundwasserstandsganglinien und der klimatologischen Zeitreihen.

4.2.3 Stochastischer Prozeß und sein Spektrum

Ein stochastischer Prozeß wird von einem Zufallsmechanismus gebildet. Er unterliegt daher Wahrscheinlichkeitsgesetzen im Gegensatz zu einem deterministischen Prozeß, bei dem aufgrund einer Funktionalgleichung ein eindeutiges Verhältnis zwischen unabhängiger und abhängiger Größe besteht. Der Vielfalt der in der Natur vorkommenden physikalischen Vorgänge entsprechen auch die stochastischen Prozesse. Sie überspannen einen Bereich, der vom - dem Sinne nach - deterministischen bis zum reinen Zufallsprozeß reicht (s. hierzu KISIEL, 1969:15ff; BLACKMAN & TUKEY, 1958).

Nach den grundlegenden Ausführungen von KHINTCHIN (1934) besteht ein stochastischer Prozeß aus einer Schar zeitabhängiger Zufallsvariablen $Z(t)$. Der stochastische Prozeß wird nun durch eine n -dimensionale Verteilungsfunktion dieser Variablen gekennzeichnet:

$$F(z_0, \dots, z_n; t_0, \dots, t_n) = P \left[Z(t_0) < z_0, \dots, Z(t_n) < z_n \right] \quad (4.2.3.1)$$

Auf weitere notwendige Bedingungen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Nach JEVJEVICH (1972) sind:

- a) eindimensionale Prozesse alle Variablen in Abhängigkeit der Zeit, z.B. Wasserspiegelschwankungen eines Sees, Abfluß eines Flusses und ähnliche Reihen;
- b) zweidimensionale Prozesse alle Aufzeichnungen entlang einer geometrischen Dimension und der Zeit, z.B. der Sauerstoffgehalt eines Flusses, der sich mit Fließlänge und Zeit ändert;
- c) dreidimensionale Prozesse die Variablen, die sich außer in der Zeitdimension auch in zwei geometrischen Dimensionen ändern, z.B. die Verteilung des Niederschlages über einer Fläche und in Abhängigkeit der Zeit;
- d) vierdimensionale Prozesse die Variablen, die raum- und zeitabhängig sind, z.B. die Permeabilität des Bodens, die sich in Richtung der Raum- und Zeitkoordinaten ändert.

Die einzelne Zeitreihe stellt eine Realisation eines Prozesses dar. Ihr besonderes Merkmal ist, daß sie nur eines von (unendlich) vielen möglichen Ergebnissen eines physikalischen Vorganges ist, wenn dieser entsprechend oft wiederholt wird (PLATE, 1974). Da aber natürliche Vorgänge nicht reproduzierbar sind, besteht daher auch keine Möglichkeit, diese Vorgänge beliebig oft zu wiederholen, um repräsentative Ergebnisse bei der Untersuchung zu erzielen. Unter gewissen Bedingungen sind dazu lange, zusammenhängende Meßreihen äquivalent. Diese Forderung ergibt sich auch schon aus dem Gesetz der großen Zahlen (Ergodizität), das in Abb.3 dargestellt ist (WOLD, 1965:17).

Die Menge der stochastischen Prozesse wird weiter eingeeengt, in dem nur stationäre stochastische Prozesse betrachtet werden, bei denen für alle N und t die folgende Bedingung gilt: alle $N+1$ Verteilungsfunktionen sind invariant gegenüber Verschiebungen auf der Zeitachse (Abb.4).

$$F(z_0, \dots, z_N; t_0, \dots, t_N) = F(z_0, \dots, z_N; t_0 + \tau, \dots, t_N + \tau) \quad (4.2.3.2)$$

Das Folgende stellt eine kurze Übersicht über die mathematischen Zusammenhänge zwischen den stationären stochastischen Prozessen und der Analyse ihrer Realisationen (Zeitreihen) dar. Bei den Prozessen wird unterschieden zwischen:

- a) streng stationären oder stationär im engeren Sinne und

b) schwach stationären oder stationär im weiteren Sinn oder auch KHINTCHINSchen Sinne.

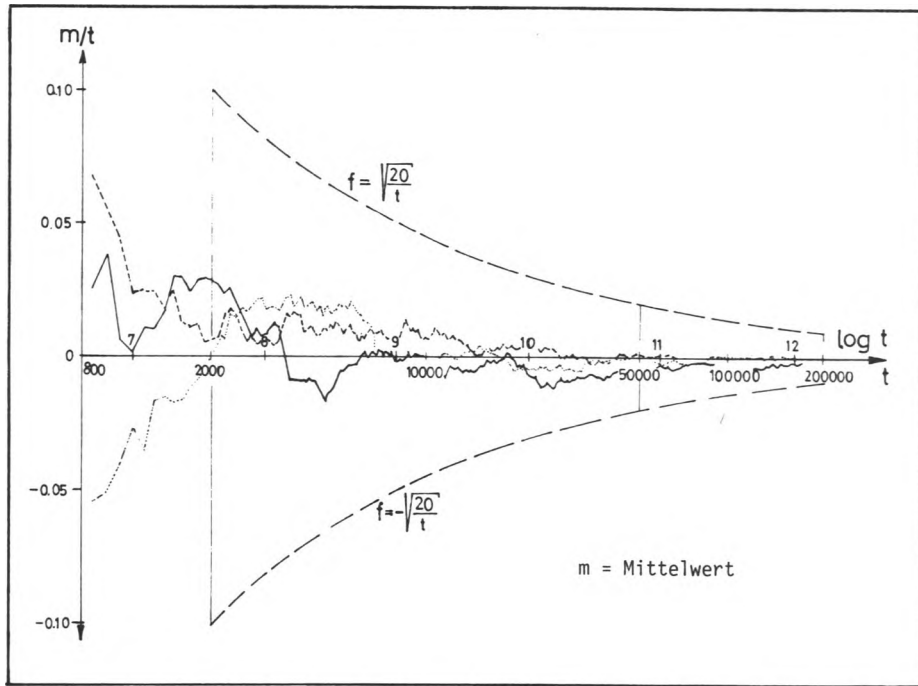


Abb. 3: Gesetz der großen Zahlen: 3 normalverteilte Zufallsvariable in Abhängigkeit der Zeit (log. Maßstab).

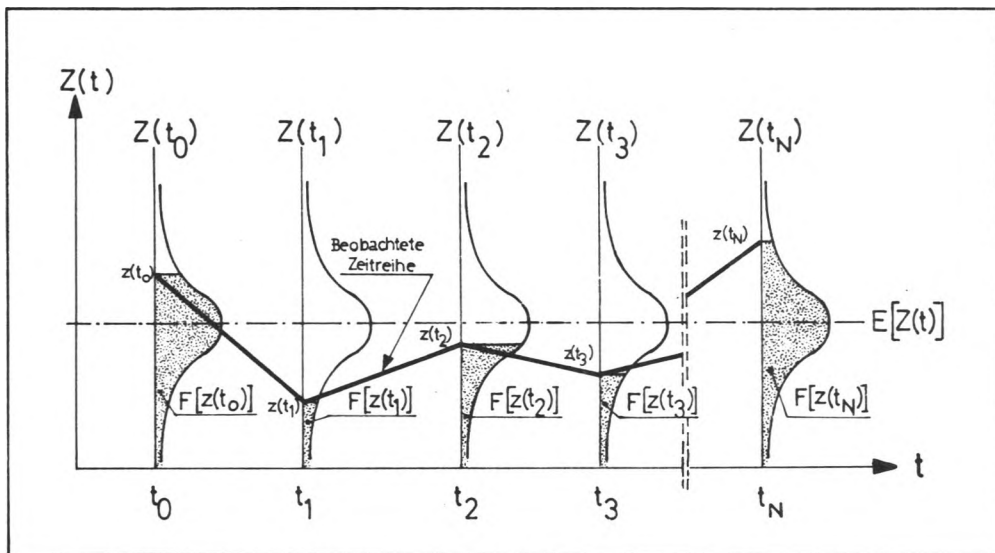


Abb. 4: Stationärer stochastischer Prozeß mit zeitinvarianter Verteilungsfunktion (n.KISIEL, 1968)

Streng stationäre Prozesse müssen Gl.(4.2.3.2) erfüllen und sind nur für die Theorie von Bedeutung. Praktische Anwendung finden nur die schwach stationären stochastischen Prozesse. Bei ihnen begnügt man sich mit wesentlich weniger und leicht zu erfüllenden Bedingungen - nämlich Gl.(4.2.3.2) für $N=0,1$ und alle t .

Für die ersten beiden Momente folgt dann:

a) der Erwartungswert

$$E [Z_1 (t)] = z_1 \quad \text{und} \quad (4.2.3.3)$$

b) die Autokovarianzfunktion, die nur eine Funktion der Zeitdifferenz und nicht von dem absoluten t_1 abhängig ist:

$$J = t_2 - t_1 \quad (4.2.3.4)$$

$$E [(Z_1(t_1) - \bar{z}_1)(Z_1(t_2) - \bar{z}_1)] = c_n(\tau) \quad (4.2.3.5)$$

Es kann angenommen werden, daß die real auftretenden Zeitreihen sehr häufig als normalverteilt anzusehen sind und der Mittelwert und die Kovarianzfunktion in diesen Fällen den einzelnen stochastischen Prozeß $Z_1 (t)$ vollständig definieren (JAGLOM, 1959:11). Unter den nicht sehr einschränkenden Bedingungen des Gesetzes der großen Zahlen lassen sich diese beiden Funktionen aus einer einzigen Realisation des Prozesses schätzen:

Mittelwert
$$\bar{z}_1 = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N Z_{1t} \quad (4.2.3.6)$$

Autokovarianz
$$c_n(\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^{N-\tau} (Z_{1t} - \bar{z}_1)(Z_{1t+\tau} - \bar{z}_1) \quad (4.2.3.7)$$

In der Literatur kommt häufig noch folgende Gleichung für die Autokovarianz vor:

$$c_n(\tau) = \frac{1}{N+1-\tau} \sum_{t=0}^{N-\tau} (Z_{1t} - \bar{z}_1)(Z_{1t+\tau} - \bar{z}_1) \quad (4.2.3.8)$$

Nach den Untersuchungen von SCHAERF (in BIRKENFELD, 1975) und BIRKENFELD (1975) soll bei kürzeren Zeitreihen grundsätzlich nur Gl. (4.2.3.7) angewandt werden. Der mittlere quadratische Fehler von Gl. (4.2.3.7) ist meistens kleiner als der von Gl. (4.2.3.8).

Die Autokovarianzfunktion zeigt an, bei welcher Zeitverschiebung die innere lineare Abhängigkeit der Reihe nicht mehr besteht ($c_{11}(\tau) \rightarrow 0$). Weiterhin erlaubt die Autokovarianz- bzw. Autokorrelationsfunktion die Einordnung des durch die vorliegende Reihe repräsentierten Prozesses in ein mathematisches System. Dies ist wichtig für die Entwicklung von mathematischen Modellen und bei Vorhersageproblemen. Es gibt folgende 3 Gruppen von Prozessen:

a) moving-average-Prozesse p-ter Ordnung (MA (p));
z.B. MA (2), Abb. 5a :

$$Z_{1t} = \xi_1 \cdot \epsilon_{t-1} + \xi_2 \cdot \epsilon_{t-2} \quad \begin{matrix} \sum \xi_i = \text{Konstante} \\ \epsilon = \text{Zufallsanteil} \end{matrix} \quad (4.2.3.9)$$

b) autoregressive Prozesse q-ter Ordnung (AR (q));
z.B. AR (2), Abb. 5b :

$$Z_{1t} = \psi_1 Z_{1t-1} + \psi_2 Z_{1t-2} + \epsilon_t \quad \psi_i = \text{Konstante} \quad (4.2.3.10)$$

Ein autoregressiver Prozeß 1. Ordnung wird auch als Markov-Prozeß bezeichnet.

c) gemischte Prozesse p, q-ter Ordnung (ARMA (p,q));
z.B. ARMA (2,2), Abb. 5c :

$$Z_{1t} = \xi_1 \epsilon_{t-1} + \xi_2 \epsilon_{t-2} + \psi_1 Z_{1t-1} + \psi_2 Z_{1t-2} + \epsilon_t \quad (4.2.3.11)$$

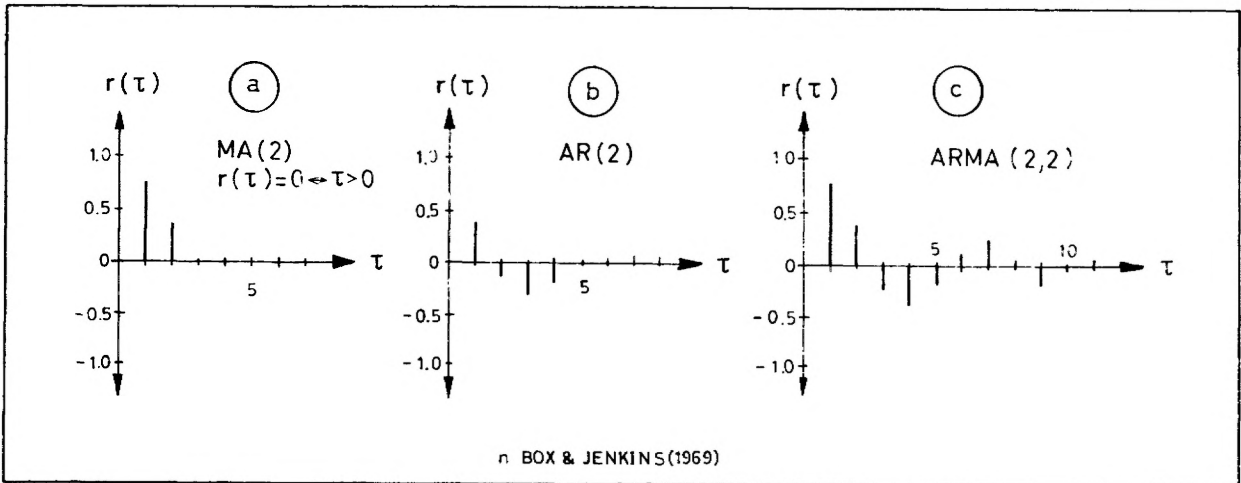


Abb. 5: Beispiele von Autokorrelationsfunktionen verschiedener Prozesse

Die Bestimmung von Prozessen aufgrund des Funktionsverlauf der Autokovarianz- bzw. Autokorrelationsfunktion wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Die Kovarianz- bzw. die Korrelationsfunktion beschreibt den Prozeß im Zeitbereich. Eindeutige Aussagen erhält man jedoch nur in den Fällen, in denen der Prozeß aus einer Schwingung gebildet wird. In allen anderen Fällen liefert der Graph der Kovarianz- bzw. Korrelationsfunktion keine eindeutigen Hinweise auf Perioden mehr, weil alle Schwingungen in den Kovarianz- bzw. Korrelationskoeffizienten anteilmäßig enthalten sind (KÖNIG & WOLTERS, 1972). Wird jedoch die Autokovarianzfunktion oder die Autokorrelationsfunktion in den Frequenzbereich transformiert, so ergibt sich ein klareres Bild der den Prozeß bildenden Schwingungen.

JAGLOM (1959) unterscheidet zwischen Prozessen und Folgen. Durchläuft der Parameter t das ganze Kontinuum der reellen Zahlen $\{t \in T, -\infty < t < \infty\}$, so liegt ein Prozeß vor; besteht dagegen t nur aus den ganzen Zahlen $\{t \in T, t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$, so liegt eine Folge vor. Im allgemeinen wird in der Literatur dieser Unterschied nicht gemacht und der Begriff "Prozeß" oder "diskreter Prozeß" auch für Folgen benutzt. Das ist auch zulässig, da keine prinzipiellen mathematischen Unterschiede bestehen. In diesem Kapitel ist es jedoch vorteilhaft, JAGLOM zu folgen, da für manche der Gleichungen verschiedene Formen existieren.

Mit Hilfe des FOURIER-STIELTJES - Integrales (JAGLOM, 1959:27)

$$z_{jt} = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\omega t} dU(\omega) \quad t = 0, \pm 1, \pm 2, \quad U = \text{stochastische Mengenfunktion} \quad (4.2.3.12)$$

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

kann jede beliebige stationäre stochastische Folge als Superposition einer Anzahl von Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen, zufälliger Amplitude und zufälliger Phase angesehen werden. Dabei ordnet die Funktion $U(\omega)$ jedem ω eine bestimmte Zufallsgröße zu (siehe auch KÖNIG & WOLTERS, 1972:38ff). KHINTCHIN (1934:608) zeigte, daß die Kovarianzfunktion eines stationären stochastischen Prozesses Z_t durch folgende Gleichung dargestellt werden kann:

$$c_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} dS_{11}(\omega) \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \quad (4.2.3.13)$$

Die analoge Form für die stationäre stochastische Folge z_t ist:

$$c_{11}(\tau) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\omega\tau} dS_{11}(\omega) \quad \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \quad (4.2.3.14)$$

$S_{\eta}(\omega)$ ist eine reelle, monoton zunehmende, beschränkte Funktion. Für diese gilt:

$$S_{\eta}(\omega) = \int_{-\infty}^{\omega} s_{\eta}(\omega) d\omega \quad (4.2.3.15)$$

$$s_{\eta}(\omega) d\omega = dS_{\eta}(\omega) \quad (4.2.3.16)$$

$$s_{\eta}(\omega) \geq 0 \quad (4.2.3.17)$$

$S_{11}(\omega)$ stellt die Spektralverteilungsfunktion und ihre Ableitung $s(\omega)$ die Spektraldichte des stochastischen Prozesses Z_t dar. Zwischen $U(\omega)$ und $S(\omega)$ besteht nun u.a. der folgende wichtige Zusammenhang:

$$S_{\eta}(\omega + \Delta\omega) - S_{\eta}(\omega) = E \left| U(\omega + \Delta\omega) - U(\omega) \right|^2 \quad (4.2.3.18)$$

Die Fouriertransformierte von Gl. (4.2.3.13) ist nach HERGLOTZ (in NAEVE 1969:117 ff)

$$s_{\eta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} c_{\eta}(\tau) \quad -\pi \leq \omega \leq \pi \quad (4.2.3.19)$$

Es besteht also die Möglichkeit, die gesuchte Spektraldichte einer stationären stochastischen Funktion aus ihrer Kovarianzfunktion zu bestimmen. Mit $\omega = 2\pi\lambda$ ergibt sich (LIGHTHILL, 1966:17):

$$s_{\eta}(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} e^{i2\pi\lambda\tau} c_{\eta}(\tau) \quad -\frac{1}{2} \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.20)$$

Die Autokovarianzfunktion ist eine gerade Funktion

$$c_{11}(-\tau) = c_{11}(\tau) \quad (4.2.3.21)$$

und daher liegen die Bedingungen einer Cosinusreihe vor:

$$s_{\eta}(\lambda) = c_{\eta}(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{\infty} \cos 2\pi\lambda\tau \cdot c_{\eta}(\tau) \quad -\frac{1}{2} \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.22)$$

Da die Frequenzen physikalisch nur im positiven Bereich interessieren und $s_{11}(\lambda)$ eine gerade Funktion ist, andererseits das Verhältnis zwischen Spektraldichte und Autokovarianz erhalten bleiben soll, er gibt sich:

$$s_{\eta}(\lambda) = 2 \left\{ c_{\eta}(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{\infty} \cos 2\pi\lambda\tau \cdot c_{\eta}(\tau) \right\} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.23)$$

In der praktischen Anwendung ist eine unendliche Summation nicht möglich, da die Reihe endlich ist. Bei $N+1$ Meßwerten können maximal N Kovarianzen berechnet werden. Insofern stellt

$$\tilde{s}_{\eta}(\lambda) = 2 \left\{ c_{\eta}(0) + 2 \sum_{\tau=1}^N \cos 2\pi\lambda\tau \cdot c_{\eta}(\tau) \right\} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.24)$$

eine inkonsistente Schätzfunktion für das Spektrum dar ähnlich wie bei der Periodogrammverfahren (Kap. 4.2.2). Um zu einer konsistenten Schätzfunktion zu gelangen, ist die Einführung einer Glättungsprozedur oder auch

Ausblendfunktion - wie PLATE (1974:83) sie nennt - erforderlich.

4.2.3.1 Geglättetes Spektrum

Die Glättung wird in jedem Frequenzintervall durch Gewichtung der Autokovarianzen erreicht:

$$\bar{s}_{11}(\lambda) = 2 \left\{ c_{11}(0) + 2 \sum_{\tau=1}^N \cos 2\pi\lambda\tau \cdot c_{11}(\tau) w(\tau) \right\} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.1.1)$$

Es hat sich allgemein eingebürgert, die Funktion $w(\tau)$ nach BLACKMANN & TUKEY (1959) als "lag window" zu bezeichnen. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei in der Literatur häufig genannte Gewichtsfunktionen angewandt, um zu sehen, welche dieser Funktionen für die Untersuchung von Grundwasserstandsganglinien am besten geeignet ist und ob signifikante Unterschiede im Spektrum zu erkennen sind.

Alle Gewichtsfunktionen müssen folgende 3 Bedingungen erfüllen:

- a) $w(\tau) = 1$ für $\tau = 0$
- b) $w(\tau) = w(-\tau)$ (Symmetriebedingung) (4.2.3.1.2)
- c) $w(\tau) = 0$ $|\tau| > M$

Dabei stellt $M < N$ die zeitliche Verschiebung dar ("lag"), die untersucht werden soll (BLACKMAN & TUKEY, 1959).

4.2.3.2 Die angewandten Gewichtsfunktionen und ihre Eigenschaften

Die drei verwendeten Gewichtsfunktionen sind (JENKINS & WATTS, 1968:244 ff):

nach BARTLETT: $w_B(\tau) = \begin{cases} 1 - \frac{|\tau|}{M} & |\tau| \leq M \\ 0 & |\tau| > M \end{cases} \quad (4.2.3.2.1)$

nach TUKEY: $w_T(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi|\tau|}{M} \right) & |\tau| \leq M \\ 0 & |\tau| > M \end{cases} \quad (4.2.3.2.2)$

nach PARZEN: $w_P(\tau) = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{|\tau|}{M}\right)^2 + 6\left(\frac{|\tau|}{M}\right)^3 & |\tau| \leq M \\ 2\left(1 - \frac{|\tau|}{M}\right)^3 & \frac{M}{2} < |\tau| \leq M \\ 0 & |\tau| > M \end{cases} \quad (4.2.3.2.3)$

Aus Abb. 6a ist zu ersehen, wie die Ausblend- oder Gewichtsfunktionen $w(\tau)$ die Kovarianzfunktionen $c_{11}(\tau)$ für $\tau = 0, \dots, M$ durch immer geringer werdende Faktoren "ausblendet". Die Auswirkung dieser Prozedur auf das Spektrum kann aus den jeweiligen Fouriertransformierten $W(\lambda)$ ("spectral-window") dieser Gewichtsfunktionen ersehen werden (Abb. 6b).

Das Ziel ist, die Nebenmaxima und -minima im Vergleich zu dem Hauptmaximum und den Abstand der ersten Nullstelle vom Koordinatenursprung gering zu halten. Beide Forderungen sind jedoch schwierig zu vereinen. Schwache Nebenmaxima bedingen eine Entfernung des Nullpunktes, haben jedoch zur Folge, daß der Spektraldichtewert $\bar{s}(\lambda)$ aus einem breiten Frequenzband gewonnen wird und dann wenig Aussagekraft hat. Andererseits folgen bei verringertem Abstand des ersten Nullpunktes verstärkte Nebenmaxima und -minima, jedoch eine bessere Aussagefähigkeit des Spektraldichtewertes $\bar{s}(\lambda)$, da dieser aus einem schmaleren Frequenzband stammt. NAEVE (1969:33) weist darauf hin, daß durch die Nebenextremwerte auch außerhalb des Intervalls liegende Frequenzen in den Schätzwert eingehen können und bezeichnet dies mit "Durchsickern" (in anglo-amerikanischer Literatur: leakage). Dadurch kann der Spektraldichtewert $\bar{s}(\lambda)$, der theoretisch immer nicht-negativ ist, sogar negativ werden. Dies ist gerade bei der Wahl der Gewichtsfunktionen im Hinblick auf die Durchführung von Kreuzspektralanalysen zu bedenken. Zwei Forderungen sind zu erfüllen:

1. Das geschätzte Spektrum soll das wahre gut approximieren. Ein Maß für die Übereinstimmung ist der Bias oder die Verzerrung, die möglichst klein sein sollte:

$$B(\lambda) = E[\bar{s}_n(\lambda)] - s_n(\lambda) \quad (4.2.3.2.4)$$

2. Die Varianz des geschätzten Spektraldichtewertes soll mit zunehmender Länge der Zeitreihe gegen Null gehen:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \left[\bar{s}_n(\lambda) - E[\bar{s}_n(\lambda)] \right]^2 \right\} = 0 \quad (4.2.3.2.5)$$

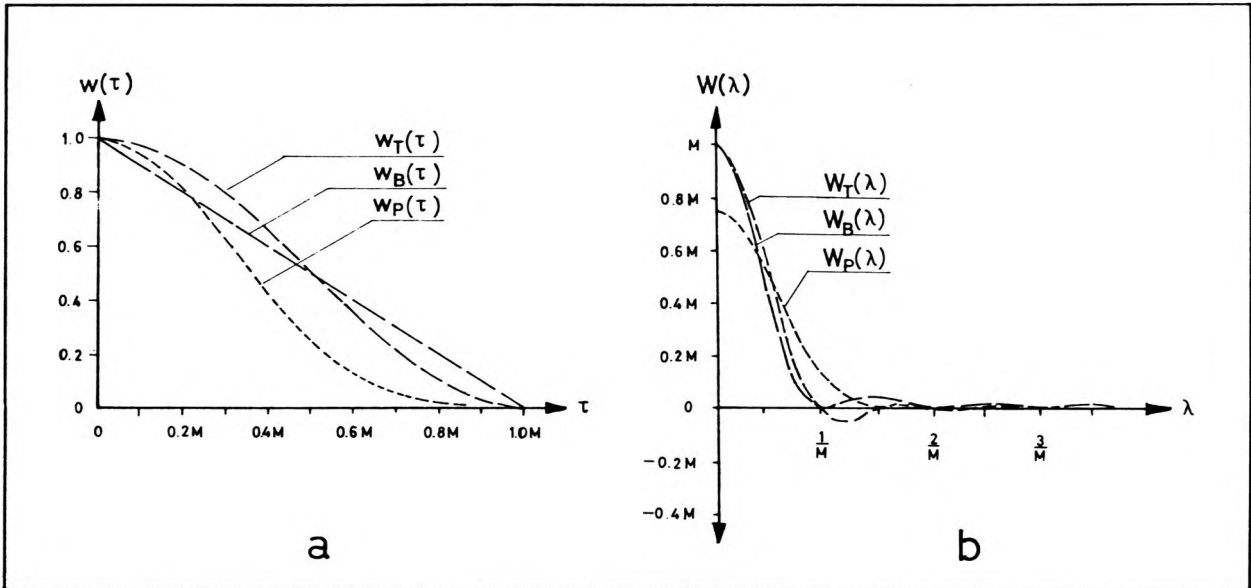


Abb. 6: Gewichtsfunktionen $w(\tau)$ und ihre entsprechenden Fouriertransformierten $W(\lambda)$ (nach JENKINS & WATTS, 1969).

Bias und Varianz sind abhängig vom Verhältnis M/N . Wird der Quotient M/N kleiner, so wird auch die Varianz kleiner, andererseits wird der Bias größer und die Auflösung des Spektrums schlechter. Die spektrale Masse aus den einzelnen benachbarten Frequenzintervallen wird von der eingesetzten Gewichtsfunktion schlechter auseinandergehalten. In diesem Zusammenhang sind auch deren Bandbreite b^* und Form wichtige Faktoren. Die Bandbreite b^* ist nach JENKINS & WATTS (1969:255 ff) :

$$b^* = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} w^2(\tau) d\tau} \quad (4.2.3.2.6)$$

Im allgemeinen wird mit der standardisierten Bandbreite b gerechnet, die auf $M = 1$ bezogen ist:

$$b^* = \frac{b}{M} \quad \begin{array}{l} \text{mit } b = 1,33 \quad \text{für } w_T \\ b = 1,5 \quad \text{für } w_B \\ b = 1,86 \quad \text{für } w_P \end{array} \quad (4.2.3.2.7)$$

b^* läßt sich nun in Abhängigkeit von M leicht bestimmen. Mit wachsendem M nimmt die Bandbreite b^* ab und die Gewichtsfunktion liefert zunehmend genauere Schätzwerte für das Spektrum. Wenn die Bandbreite kleiner ist als

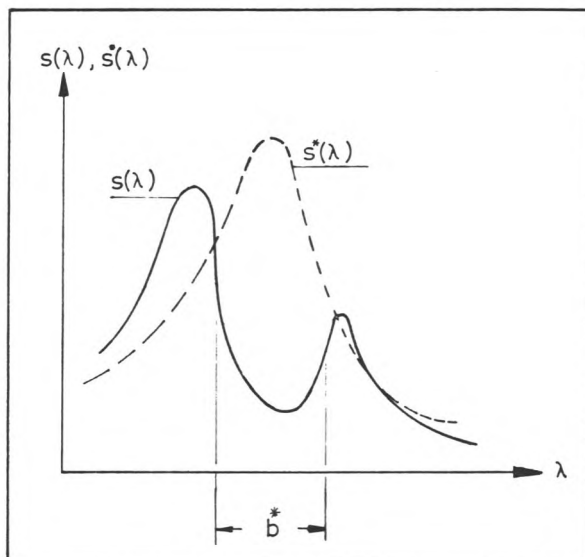


Abb. 7: Wirkung der Bandbreite einer Gewichtsfunktion auf das geschätzte Spektrum.

der Abstand zweier Spitzen im wahren Spektrum, so werden diese auch getrennt wiedergegeben, im anderen Fall erscheinen sie zu einer Spitze zusammengefaßt (Abb.7). Zwischen Bandbreite und Varianz besteht folgender Zusammenhang:

$$b^* \cdot \text{Varianz} = \text{konstant} \quad (4.2.3.2.8)$$

Daraus folgt, daß für geringer werdende Bandbreite die Varianz größer wird und die Schätzwerte für das Spektrum instabiler werden. Zwischen Erwartungstreue und Stabilität der Schätzung kann ein guter Kompromiß erzielt werden, wenn die von JENKINS & WATTS (1969:280 ff) vorgeschlagene Variation des Verschiebungsendpunktes (truncation-Punkt) durchgeführt wird. Nach den Untersuchungen von BIRKENFELD (1975) soll das Verhältnis $M/N \leq 0,3$ sein. Um eine zusätzliche genauere Darstellung des Spektrums zu erhalten, können die Frequenzintervalle verkleinert werden. Mit

$$\lambda = \frac{l}{2L} \quad \text{und} \quad l = 0, \dots, L$$

$$L = 2M \dots 3M \quad (4.2.3.2.9)$$

$$M \leq 0,3N$$

ergibt sich

$$s_n^*(\lambda) = 2 \left\{ \left(c_{11}(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{M-1} \cos\left(\pi \frac{l}{L} \tau\right) c_{11}(\tau) w(\tau) \right) \right\} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.2.10)$$

Geht man von der Kovarianzfunktion zur Korrelationsfunktion über, so ergibt sich gleichzeitig eine normierte Dichtefunktion (WETZEL, 1970:26), Die Korrelationskoeffizienten ergeben sich zu:

$$r_{11}(\tau) = \frac{c_{11}(\tau)}{c_{11}(0)} = \frac{c_{11}(\tau)}{\sigma_1^2} \quad (4.2.3.2.11)$$

Die der Berechnung zugrundeliegende Schätzfunktion ist nun mit Gl. (4.2.3.2.9)

$$s_n^*(\lambda) = 2 \left[1 + 2 \sum_{\tau=1}^{M-1} \cos\left(\pi \frac{l}{L} \tau\right) r_{11}(\tau) w(\tau) \right] \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.3.2.12)$$

4.2.4 Vertrauensgrenzen von ermittelten Spektraldichtewerten

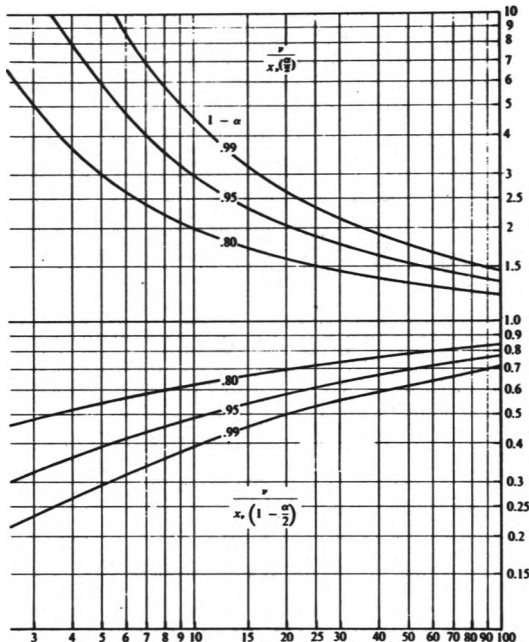
Wie schon im Kapitel 4.2.3 dargelegt wurde, gelten die grundlegenden Annahmen nur für schwach stationäre Prozesse, weil eine vollständige Beschreibung durch alle Wahrscheinlichkeitsverteilungen in der Praxis nicht möglich ist. Es ist daher angebracht, eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit zu erlangen, mit der der wahre Funktionswert der Spektraldichte und somit die genaue Periode innerhalb gewisser Konfidenzgrenzen liegt. Hierzu wird die χ^2 -Verteilung (Chi-Quadrat-Verteilung) benutzt, mit der die Varianzverteilung von Stichproben mit

gleicher Normalverteilung untersucht wird. Die Annahme der Normalverteilung war eine der Voraussetzungen bei den stochastischen Prozessen. Ein wichtiger Parameter bei der χ^2 -Verteilung ist die Zahl der Freiheitsgrade:

$$v = 2 \cdot b \cdot \frac{N}{M} \quad (4.2.4.1)$$

Die Abb. 8 gibt für verschiedene Konfidenzzahlen ($\alpha = 0.01; 0.05; 0.2$) die oberen und unteren Grenzen an, innerhalb derer der betrachtete Wert liegt. Die Wahrscheinlichkeitsaussage ist:

$$p \left[\frac{v s_{r_{11}}^*(\lambda)}{x_v(1-\alpha/2)} < s_{r_{11}}(\lambda) < \frac{v s_{r_{11}}^*(\lambda)}{x_v(\alpha/2)} \right] = 1 - \alpha \quad (4.2.4.2)$$



Es handelt sich hierbei um einen approximativen Ansatz, da die Kovarianz c_{11} bei $\tau = 0$ auch selber eine Zufallsvariable ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß bei $N \rightarrow \infty$ $c_{11}(0) \rightarrow \gamma^2$ ($\gamma^2 =$ theoretische Varianz) konvergiert. Aus Abb. 8 entnimmt man für die ermittelte Anzahl Freiheitsgrade in Abhängigkeit von $(1-\alpha)$ die Multiplikationsfaktoren

$$\frac{v}{x_v(1-\alpha/2)} \quad \text{und} \quad \frac{v}{x_v(\alpha/2)}$$

und multipliziert diese mit dem abzuschätzenden Spektralwert $s_{r_{11}}^*(\lambda)$. Der wahre Spektralwert $s_{r_{11}}(\lambda)$ liegt mit der gewählten Wahrscheinlichkeit innerhalb des Konfidenzintervalles.

Abb. 8: χ^2 -Verteilung: Wahrscheinlichkeitsgrenzen für verschiedene Konfidenzzahlen (aus JENKINS & WATTS, 1968:82)

4.2.5. Die Amplituden bestimmter Perioden in Zeitreihen

Das Spektrum einer Grundwasserganglinie zeigt durch seine Maxima die Schwingungen an, die in dieser Ganglinie vorherrschend vertreten sind. Es ist nun für die Abschätzung der jährlichen Grundwasserneubildungsrate erforderlich zu wissen, wie groß die Amplituden dieser Schwingung ist. Bei bekanntem Porenvolumen des Aquifers ist dann eine Ermittlung der aus den Niederschlägen herrührenden Grundwassermenge möglich. Die Berechnung der Amplitude einer bestimmten Schwingung aus einer Zeitreihe erfolgt wiederum mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (BLOOMFIELD, 1976:11 ff):

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos 2\pi \frac{0}{T} \\ \vdots \\ \cos 2\pi \frac{N}{T} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \sin 2\pi \frac{0}{T} \\ \vdots \\ \sin 2\pi \frac{N}{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \vdots \\ \epsilon_N \end{bmatrix}$$

$T =$ Dauer der Periode

$$(4.2.5.1)$$

$\epsilon_t =$ Zufallsanteil

Die Summe R aller Quadrate ist:

$$R = \sum_{t=0}^N \left[z_t - A \cos 2\pi \frac{t}{T} - B \sin 2\pi \frac{t}{T} \right]^2 \quad (4.2.5.2)$$

Durch partielle Ableitung und Nullsetzen (= notwendige Bedingung des Minimums)

$$\frac{\partial R}{\partial A} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial R}{\partial B} = 0 \quad (4.2.5.3)$$

ergibt sich:

$$A = \frac{1}{D} \left[\sum_{t=0}^N z_t \cos 2\pi \frac{t}{T} \sum_{t=0}^N (\sin 2\pi \frac{t}{T})^2 - \sum_{t=0}^N z_t \sin 2\pi \frac{t}{T} \sum_{t=0}^N \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right] \quad (4.2.5.4)$$

$$B = \frac{1}{D} \left[\sum_{t=0}^N z_t \sin 2\pi \frac{t}{T} \sum_{t=0}^N (\cos 2\pi \frac{t}{T})^2 - \sum_{t=0}^N z_t \cos 2\pi \frac{t}{T} \sum_{t=0}^N \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right] \quad (4.2.5.5)$$

$$\text{mit} \quad D = \sum_{t=0}^N (\cos 2\pi \frac{t}{T})^2 \sum_{t=0}^N (\sin 2\pi \frac{t}{T})^2 - \left[\sum_{t=0}^N \cos 2\pi \frac{t}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right]^2 \quad (4.2.5.5)$$

Die gesuchte Amplitude ist

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (4.2.5.6)$$

4.2.6 Beziehungen zwischen zwei stationären Zeitreihen (Kreuzspektralanalyse)

4.2.6.1 Allgemeines

Außer der Bestimmung der Systematik der einzelnen Zeitreihe durch Zerlegung in ihre zeitlichen und frequenziellen Bestandteile interessiert, ob und welche Abhängigkeiten zwischen zwei verschiedenen Zeitreihen bestehen. Bei diesen Zeitreihen kann es sich um zwei verschiedene Grundwasserstandsganglinien oder um eine Grundwasserstandsganglinie und eine Niederschlagsganglinie handeln. Aussagen über diese Beziehungen werden durch die Kreuzspektralanalyse ermöglicht. Die Kreuzspektralanalyse umfaßt das Amplituden-, das Gain-, das Kohärenz- und das Phasenspektrum. Zwischenstufen stellen das Ko- und das Quadratspektrum dar.

4.2.6.2 Kreuzkovarianzfunktion, Ko- und Quadratspektrum

Die Kovarianz zwischen zwei diskreten stationären stochastischen Prozessen $Z_{1,t}$ und $Z_{2,t}$ wird mit Kreuzkovarianz bezeichnet und durch eine zu Gl. (4.2.3.14) analoge Form dargestellt:

$$c_{12}(\tau) = \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\omega\tau} dS_{12}(\omega) \quad (4.2.6.2.1)$$

Die Fouriertransformierte der Kreuzkovarianzfunktion ist mit

$$s_{12}(\omega) d\omega = dS_{12}(\omega) \quad (4.2.6.2.2)$$

und $\omega = 2\pi\lambda$ analog zu Gl. (4.2.3.20)

$$S_{12}(\lambda) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi\lambda\tau} c_{12}(\tau) \quad (4.2.6.2.3)$$

Die Kovarianzfunktion $c_{12}(\tau)$ wird aus den die beiden Prozessen repräsentierenden Zeitreihen bestimmt:

$$c_{12}(\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N (z_{1t} - \bar{z}_1)(z_{2t+\tau} - \bar{z}_2) \quad 0 \leq \tau \leq N \quad (4.2.6.2.4)$$

$$c_{12}(-\tau) = \frac{1}{N+1} \sum_{t=0}^N (z_{1t+\tau} - \bar{z}_1)(z_{2t} - \bar{z}_2) \quad 0 \leq \tau \leq N \quad (4.2.6.2.5)$$

Die Kreuzkovarianzfunktion ist keine gerade Funktion und sie läßt sich wie jede allgemeine Funktion als Summe einer geraden und ungeraden Funktion darstellen (NAEVE, 1969:60) :

$$c_{12}(\tau) = \frac{1}{2} \left[(c_{12}(\tau) + c_{12}(-\tau)) \right] + \frac{1}{2} \left[(c_{12}(\tau) - c_{12}(-\tau)) \right] \quad (4.2.6.2.6)$$

bzw.

$$c_{12}(\tau) = k_{12}(\tau) + q_{12}(\tau) \quad (4.2.6.2.7)$$

mit $k_{12}(\tau) = \frac{1}{2} \left[c_{12}(\tau) + c_{12}(-\tau) \right] \quad (4.2.6.2.8)$

$$q_{12}(\tau) = \frac{1}{2} \left[c_{12}(\tau) - c_{12}(-\tau) \right] \quad (4.2.6.2.9)$$

Aus Gl. (4.2.6.2.3) folgt mit Gl. (4.2.6.2.8) und Gl. (4.2.6.2.9), daß das Kreuzspektrum eine komplexe Größe ist:

$$S_{12}(\lambda) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi\lambda\tau) k_{12}(\tau) - i \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sin(2\pi\lambda\tau) q_{12}(\tau) \quad -\frac{1}{2} \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.6.2.10)$$

Hierbei wird

$$K_{12}(\lambda) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi\lambda\tau) k_{12}(\tau) \quad (4.2.6.2.11)$$

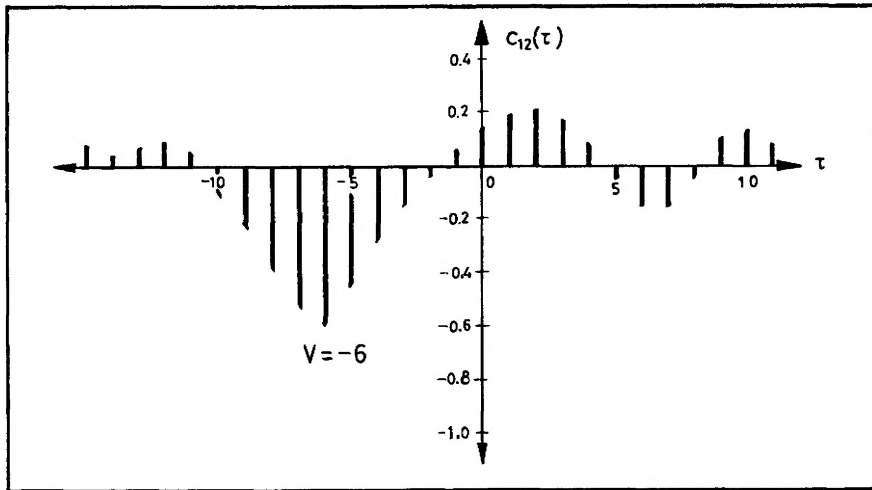
als das Kospektrum und

$$Q_{12}(\lambda) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \sin(2\pi\lambda\tau) q_{12}(\tau) \quad (4.2.6.2.12)$$

als das Quadratspektrum bezeichnet.

4.2.6.3 Glättung des Ko- und des Quadratspektrums

Wie bei dem einzelnen Autospektrum ist auch bei dem Ko- und dem Quadratspektrum die Ausschaltung der Inkonsistenz erforderlich. Es werden die gleichen Gewichtsfunktionen angewandt und es gelten sinngemäß die Ausführungen des Kapitel 4.2.3.2 . Außerdem ist noch zu berücksichtigen, daß die Kreuzkovarianzfunktion und ebenfalls die Kreuzkorrelationsfunktion im Gegensatz zur Autokovarianzfunktion bzw. Autokorrelationsfunktion allgemein ihr Maximum nicht bei $\tau = 0$ hat, sondern bei einem $\tau = V$ (Abb. 9). Dies muß bei der Schätzung der einzelnen



Spektren (Amplituden-, Gain-, Kohärenz- und Phasenspektrum) berücksichtigt werden, da die Verzerrung oder der Bias $B(\gamma)$ zwischen dem geschätzten und dem wahren Spektrum direkt von der Phasenverschiebung zwischen beiden Prozessen abhängt (JENKINS & WATTS, 1968:396ff; BIRKENFELD, 1973:54ff). Der Bias kann verkleinert werden, wenn durch eine Koordinatenverschiebung um V die Kreuzkovarianzfunktion ihr Maximum wieder bei $\tau = 0$ hat (alignment). Hieraus ergibt sich für die Gl. (4.2.6.8) und die Gl. (4.2.6.9)

Abb. 9: Beispiel für eine Kreuzkovarianzfunktion

$$k_{12}^V(\tau) = \frac{1}{2} [c_{12}(\tau + V) + c_{12}(-\tau + V)] \quad (4.2.6.3.1)$$

$$q_{12}^V(\tau) = \frac{1}{2} [c_{12}(\tau + V) - c_{12}(-\tau + V)] \quad (4.2.6.3.2)$$

Die endgültigen Schätzfunktionen für das Kospektrum und das Quadratspektrum sind mit Gl. (4.2.3.2.9)

$$K_{12}^*(\lambda) = 2 \left[k_{12}^V(0) + 2 \sum_{\tau=1}^{M-1} \cos(\pi \frac{\lambda}{L} \tau) \cdot k_{12}^V(\tau) \cdot w(\tau) \right] \quad (4.2.6.3.3)$$

$$0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2}$$

$$Q_{12}^*(\lambda) = 4 \sum_{\tau=1}^{M-1} \sin(\pi \frac{\lambda}{L} \tau) \cdot q_{12}^V(\tau) \cdot w(\tau) \quad (4.2.6.3.4)$$

4.2.6.4 Amplituden-, Gain-, Kohärenz- und Phasenspektrum

Die Schätzfunktion für das Amplitudenspektrum ist mit Gl. (4.2.3.2.9) :

$$C_{12}^*(\lambda) = \sqrt{K_{12}^{*2}(\lambda) + Q_{12}^{*2}(\lambda)} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.6.4.1)$$

Das Amplitudenspektrum ermöglicht eine Aussage über das Größenverhältnis der Amplituden beider beteiligten Prozesse. Dies ist i.a. bei der Beurteilung der Beziehungen zwischen zwei Prozessen nur von nachgeordneter Bedeutung. Das gilt auch für das Gainspektrum

$$G_{12}^*(\lambda) = \frac{C_{12}^*(\lambda)}{S_{12}^*(\lambda)} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.6.4.2)$$

das einen linearen Zusammenhang zwischen dem Amplitudenspektrum und dem Spektrum eines der beteiligten Prozesse angibt. In beiden Fällen sind jedoch unmittelbare Rückschlüsse auf die absolute Amplitudengröße nicht möglich.

Die beiden wichtigen Kriterien zur Begutachtung der Beziehung zwischen zwei Prozessen sind das Kohärenzspektrum

$$KOH_{12}^{\#2}(\lambda) = \frac{C_{12}^{\#2}(\lambda)}{S_{11}^*(\lambda) \cdot S_{22}^*(\lambda)} \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.6.4.3)$$

und das Phasenspektrum

$$\varphi_{12}^{\#2}(\lambda) = \arctan \left[- \frac{Q_{12}^*(\lambda)}{K_{12}^*(\lambda)} \right] \quad 0 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \quad (4.2.6.4.4)$$

Ist beim Phasenspektrum die Phase mit der Verschiebung (alignment) ermittelt worden, so ist die Verschiebung nach dem Schätzen durch Addition eines linearen Terms der Form $2 \pi \lambda v$ rückgängig zu machen (de-alignment). Dadurch wird wieder die ursprüngliche Phasenbeziehung zwischen den beiden Prozessen hergestellt. Bei der Betrachtung der Phasenbeziehungen ist die Mehrdeutigkeit der inversen trigonometrischen Funktionen zu berücksichtigen. Die Hauptwerte des Arctan liegen zwischen $+\frac{\pi}{2}$ und $-\frac{\pi}{2}$.

4.3 Schnelle Fouriertransformation (FFT)

Neben der Schätzung des Spektrums und des Kreuzspektrums aus der Fouriertransformierten der Autokovarianz- bzw. der Kreuzkovarianzfunktion ist auch die direkte Schätzung des Spektrums aus der stationären Zeitreihe ähnlich der Periodogrammanalyse möglich. Hierzu wird wegen seines weitaus geringeren Rechenaufwandes als bei der herkömmlichen Bestimmung der Fourierkoeffizienten der von COOLEY & TUKEY (1965) entwickelte Algorithmus angewandt. Dieser basiert auf der direkten Anwendung der Fouriertransformation auf die Daten und soll hier nur in seiner Grundgleichung dargestellt werden. Die komplexen Fourierkoeffizienten ergeben sich aus

$$A(\lambda) = \sum_{t=0}^N z_t e^{-i2\pi\lambda t} \quad (4.3.1)$$

Auch bei dieser Methode ist eine Glättungsprozedur erforderlich. Aufgrund der vergleichenden Untersuchung von EDGE & LIU (1970) ergibt sich eine wirtschaftliche Anwendung der FFT erst ab etwa 50 000 Daten. Bei kürzeren Reihen ist daher die Methode nach der Theorie der stochastischen Prozesse vorteilhafter, weil sie ein genaueres Spektrum liefert und gleichzeitig durch die Autokovarianz- bzw. Autokorrelationsfunktion eine Typisierung erlaubt. Bei der FFT-Methode ist diese Berechnung noch zusätzlich erforderlich.

5. EDV - PROGRAMM FOR DIE ZEITREIHENANALYSE

Aufgrund einer vergleichenden Darstellung wurde die auf der Theorie der stochastischen Prozesse aufbauende Methode zur Analyse der hier vorliegenden Zeitreihen als die am besten geeignete angesehen. Ein entsprechendes EDV - Programm, das auf den in Kapitel 4.2.3 bis 4.2.6.4 dargelegten mathematischen Grundlagen basiert, lag nicht vor und es wurde speziell für die gestellte Aufgabe das Programm "SPEKTRUM" ausgearbeitet (Programmiersprache: FORTRAN IV). Es ist im Anhang beigefügt, so daß die einzelnen Programmschritte zu ersehen sind. Das folgende Blockdiagramm zeigt den Ablauf und die Bereiche der Rechnung.

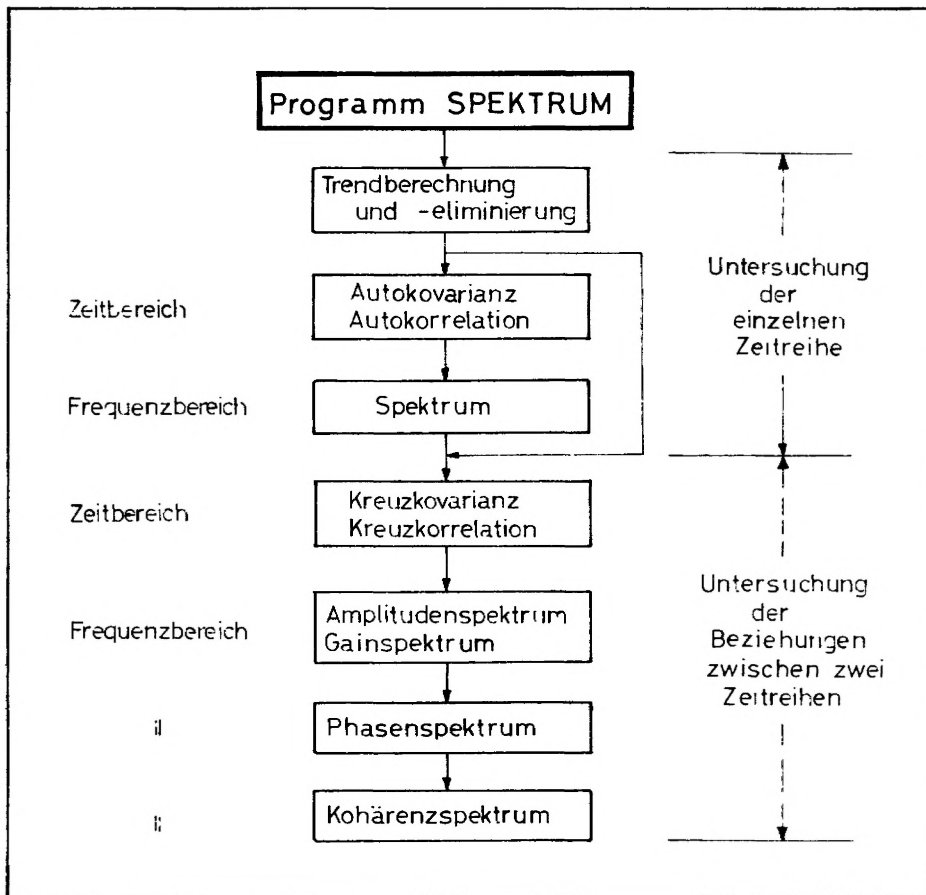


Abb. 10: Blockdiagramm des Programms "Spektrum"

Das Programm ist für bis zu 5 Zeitreihen mit maximal je 500 Speicherplätzen ausgelegt. Um gleichzeitig einen Überblick über den Funktionsverlauf zu haben, werden neben den Funktionswerten die Graphen der Funktionen ausgedruckt. Bei mehreren Graphen in einem Diagramm werden verschiedene Symbole benutzt. Durch das in den vorigen Kapiteln dargelegte Verfahren, die einzelnen Spektraldichten mit verschiedenen Zeitverschiebungen (truncation-Punkte) zu berechnen und zu vergleichen, bot es sich an, das Programm in interaktiver Form zu konzipieren.

Das Programm stellt eine erste Ausbaustufe dar. Im Rahmen zukünftiger Erweiterungen werden u.a. noch rechenzeitverkürzende Algorithmen eingebaut. Die Datenverarbeitung mittels dieses Programms erfolgte am Großrechenzentrum für die Wissenschaft in Berlin mit einer Rechanlage des Typs TR 440 hauptsächlich im Dialogverkehr (time-sharing- Betrieb). Auch bei dieser Betriebsweise bot ein interaktives Programm den Vorteil einer gewissen Variabilität, die es gestattet, sich teilweise der Auslastung der Rechanlage anzu-

passen um damit längere Wartezeiten zu vermeiden. Berechnungen, die größere Betriebsmittel erforderten, wurden im Abschnitts- (batch-) Betrieb während der Nachtzeit unter Umnummerierung der Dateien- bzw. Gerätezuordnungen durchgeführt.

6. ERGEBNISSE DER ZEITREIHENANALYSE

6.1 Trendanalyse

6.1.1 Allgemeines

Die Trendanalyse wurde nach den im Kapitel 4.1 dargelegten Ansätzen durchgeführt. Die Trendfunktion approximiert den durchschnittlichen Verlauf der Zeitreihe und läßt darüber hinaus für einen gewissen zukünftigen Zeitraum eine Extrapolation dieses Verlaufes zu. Daneben verdeutlicht die Trendfunktion auch größere Inhomogenitäten in der Zeitreihe.

Es ergab sich, daß es bei den Grundwasserstandsganglinien -häufiger als zuerst angenommen- erforderlich war, den Trend durch nicht-lineare Funktionen -Polynome 2. oder 3. Grades- zu approximieren. Erst dann stellten sich "stabile" Schätzungen für die Spektraldichtefunktionen ein. Unter "stabil" wird hier die Spektraldichtefunktion verstanden, die bei allen drei angewandten Gewichtsfunktionen die übereinstimmendsten Ergebnisse zeigt. Dies ist kein Kriterium im strengen Sinne, sondern wurde mehr als eine Entscheidungshilfe angesehen. Bei der hier durchgeführten Trendanalyse wurden generell Polynome 3. Grades auf ihre Aussagefähigkeit hin überprüft.

Aus den Graphen der einzelnen Funktionen ist ersichtlich, daß in einzelnen Fällen (abhängig von der gewünschten Genauigkeit) Polynome 1. oder 2. Grades genügen würden. Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß Anfangs- und Endwerte einer Reihe einen gewissen Einfluß auf die Trendfunktion haben. Dieser wird mit zunehmender Reihenlänge geringer (PLATE 1974:26 ff). Auch daraus resultiert, daß die längsten Reihen die genaueste Aussagefähigkeit besitzen.

Die Polynomkoeffizienten der Trendfunktionen der analysierten Grundwasserstandsganglinien aus den drei Gebieten sind in Taf. 2 , Fig. 2 , niedergelegt.

6.1.2 Klimatologische Zeitreihen

In allen drei Gebieten konnte bei den klimatologischen Reihen und folglich auch bei der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus potentieller Evapotranspiration) kein Trend nachgewiesen werden.

6.1.3 Gebiet A (Tegeler Forst-Frohnau-Hermsdorf)

Bezüglich des Trendverhaltens der Grundwasseroberfläche (Abb. 11) kann das Gebiet durch eine Linie, die etwa entlang der Eisenbahnstrecke verläuft (siehe Taf. 1), in zwei Teilgebiete unterteilt werden. Im nord-östlichen Teilgebiet enthalten die Grundwasserstandsganglinien Trendfunktionen, die überwiegend Beharrungszustand anzeigen. Mitunter deuten sich leicht zunehmende mittlere Grundwasserstände an (schwacher positiver Trend). Im Gegensatz hierzu zeigen die Meßstellen im süd-westlichen Teilgebiet einen negativen Trend. Es kann vermutet werden, daß sich die Grundwasserbeeinflussung durch das Wasserwerk Tegel bis zu dieser Linie bemerkbar macht. Nach dem Verlauf der Trendfunktionen der Pegel 0001 und 1141 zu urteilen, hat die Absenkung etwa Mitte der sechziger Jahre diese Pegel erreicht.

Die durchschnittliche Absenkung im süd-westlichen Teilgebiet kann bis 1972 mit ca. 2,5 cm/a und ab diesem Zeitpunkt für die nähere Zukunft mit ca. 4 cm/a angenommen werden. Hierbei wurde aufgrund der Länge der Zeitreihe und der örtlichen Lage etwa in der Mitte dieses Teilgebietes die Trendfunktion der Ganglinie 1141 als repräsentativ angenommen. Diese kann bis 1972 auch gut durch eine Gerade approximiert werden. Zum Vergleich sind bei den Ganglinien 0115 und 1142 auch die linearen Trendfunktionen eingezeichnet.

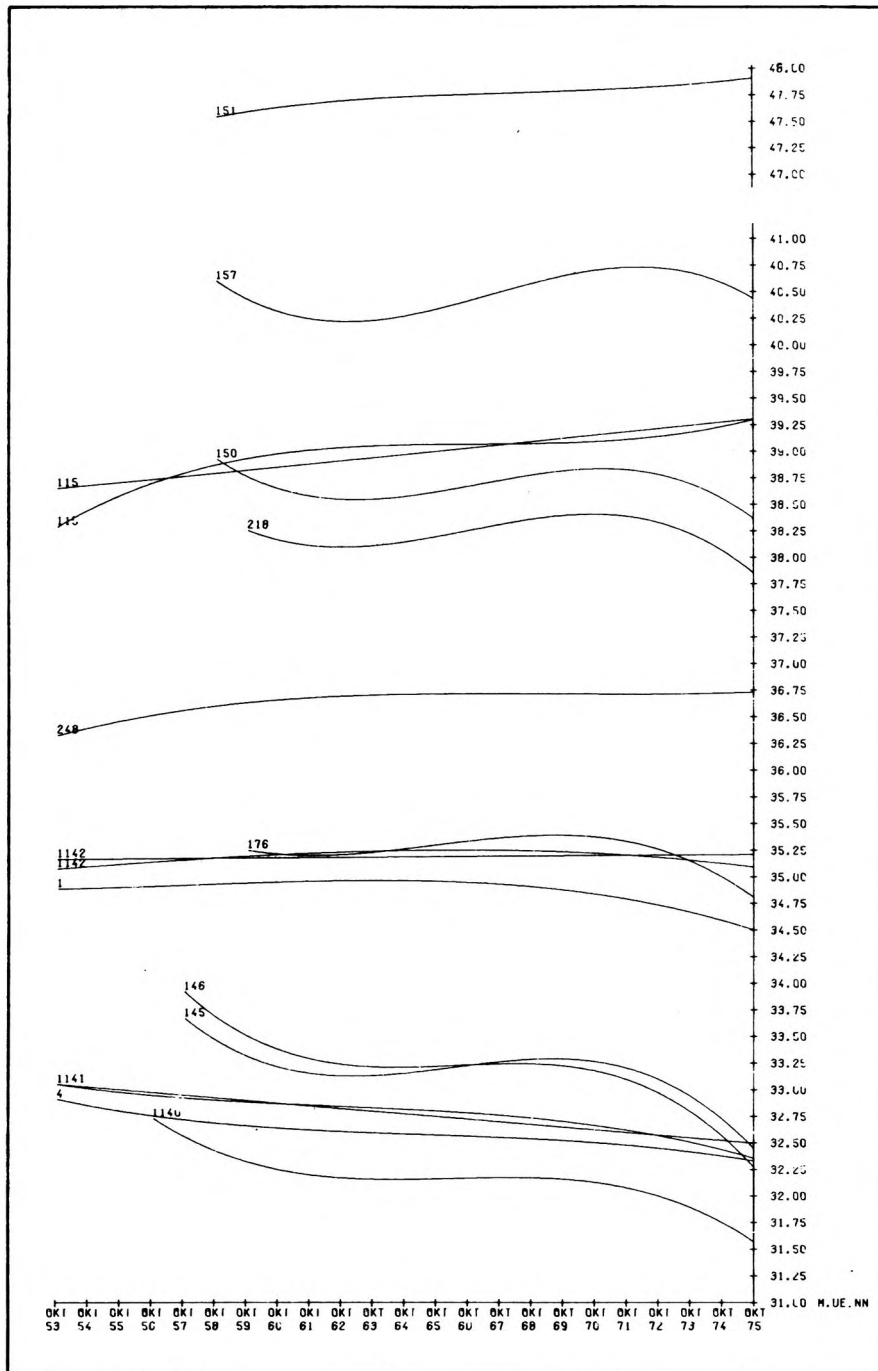


Abb. 11: Trendfunktionen der Grundwasserstandsganglinien des Gebietes A

6.1.4 Gebiet B (Neukölln)

Die Trendfunktionen (Abb. 12) der Grundwasserstandsganglinien (siehe Taf. 3) dieses Gebietes zeigen bis auf einige Ausnahmen ein einheitliches langfristiges Verhalten der mittleren Grundwasseroberfläche. Generell kann festgestellt werden, daß von 1945 bis ca. 1965 eine geringe Absenkung von etwa 3 cm/a stattfand. Ab 1965 trat ein Beharrungszustand der mittleren Grundwasseroberfläche bei i.M. 32.00 m.ü.NN ein. Neben anderen denkbaren Ursachen, auf die im Kap. 6.2.8 weiter eingegangen wird, kann dieser Beharrungszustand durch influente Strömungsverhältnisse von Spree, Landwehr-, Teltow- und Neuköllner Schifffahrtskanal hervorgerufen werden.

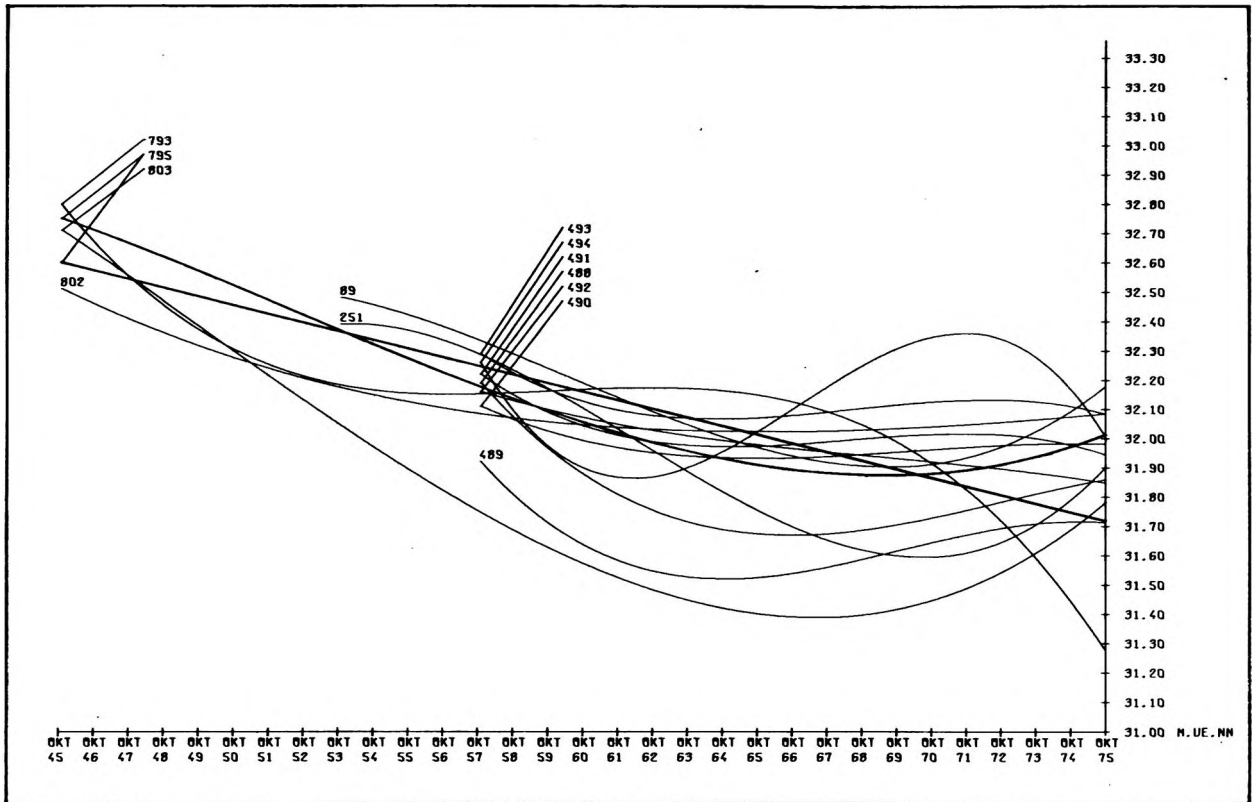


Abb. 12: Trendfunktionen der Grundwasserstandsganglinien des Gebietes B

Die Wasserstände dieser Oberflächengewässer werden durch Staustufen auf fast konstanter Höhe gehalten. Bei einem Schwankungsbereich von nur wenigen cm betragen die mittleren Wasserstände

| | |
|--|--------------|
| der Spree (Oberpegel obere Schleuse Landwehrkanal) | 32.30 m.ü.NN |
| des Landwehrkanals (Unterpegel obere Schleuse Landwehrkanal) | 32.10 " |
| des Teltowkanals (Oberpegel Schleuse Neukölln) | 32.30 " |

Einflüsse von Eigenwasserversorgungen können sich kaum bemerkbar machen, da in diesem Gebiet nur wenige registriert sind. Die einzig ins Gewicht fallende Eigenwasserversorgung gehört einer Brauerei. Die Fördermengen sind rückläufig. Diese betragen

| | | | | |
|----------|------|------|-----------------|---|
| im Jahre | 1963 | 1.06 | hm ³ | (Angaben über Entnahmemengen in früheren Jahren lagen nicht vor.) |
| | 1964 | 1.00 | " | |
| | 1965 | 1.11 | " | |
| | 1966 | 0.91 | " | |
| | 1967 | 0.98 | " | |
| | 1968 | 0.87 | " | |
| | 1969 | 0.73 | " | |
| | 1970 | 0.80 | " | |
| | 1971 | 0.91 | " | |
| | 1972 | 0.81 | " | |
| | 1973 | 0.81 | " | |
| | 1974 | 0.71 | " | |
| | 1975 | 0.73 | " | |

In der Nähe dieser Grundwasser-Entnahmestelle liegen die Meßstellen 0803 und 0489 . Eine örtliche Beeinflussung macht sich in den entsprechenden Trendfunktionen bemerkbar.

Als die das langzeitliche Verhalten der Grundwasseroberfläche am besten charakterisierende Trendfunktion wird die des Pegels 0795 angesehen. Die zum Vergleich eingezeichnete lineare Funktion hätte in diesem Fall eine relativ ungenaue Vorausschätzung zur Folge.

Die als Ausnahmen angesprochenen Trendfunktionen sind die der Pegel 0494 und 0793, deren Grundwasserstandsganglinien (Taf. 3) größere Grundwasser-Absenkungen aufzeigen. So bewirkt die im Zeitraum 1960 bis 1962

durchgeführte Grundwasserabsenkung im Bereich der Meßstelle 494 ein Minimum in der Trendfunktion. Das gleiche geschieht zur Zeit im Bereich des Pegels 793. Die ab 1972 einsetzende Grundwasserabsenkung auf dem Gelände des Gaswerks Ederstraße macht sich als stark abfallender Verlauf der Trendfunktion bemerkbar.

6.1.5 Gebiet C (Lichtenrade)

Auch die Trendfunktionen (Abb. 13) der Grundwasserstandsganglinien dieses Gebietes (Taf. 4) zeigen bis auf wenige Ausnahmen ein recht einheitliches Verhalten. Als repräsentativ für das durchschnittliche Trendverhalten der Grundwasseroberfläche dieses Gebietes können die Trendfunktionen der Ganglinien 0085 und 0086 gelten. Auch hier ist zum Vergleich für die Ganglinie 0085 die lineare Trendfunktion eingezeichnet, die eine durchschnittliche Absenkung von ca. 2 cm/a ergibt. Es zeigt sich deutlich, daß die lineare Trendfunktion eine

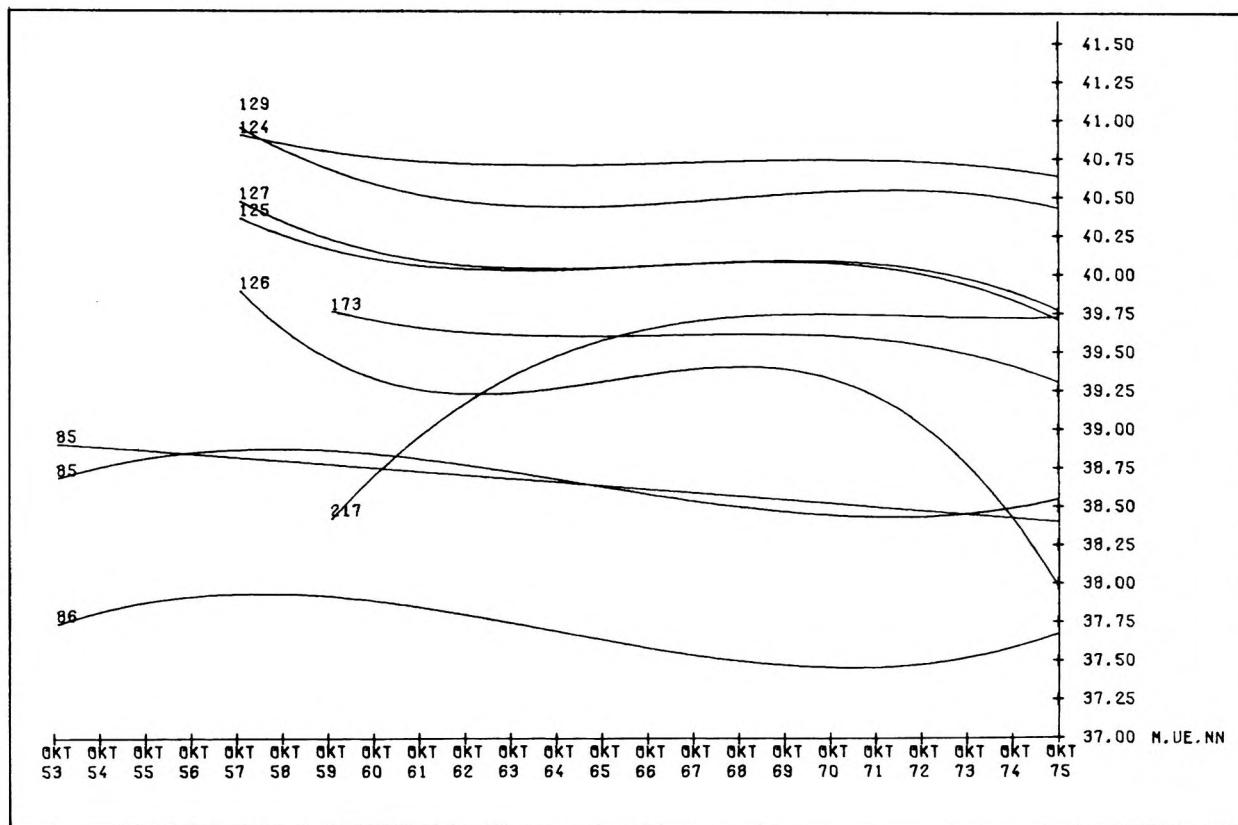


Abb. 13: Trendfunktionen der Grundwasserstandsganglinien des Gebietes C.

relativ ungenaue Prognostizierung zur Folge hätte, da nach der kubischen Funktion und damit einer genaueren Approximation des langfristigen Verhaltens zum Ende des Wasserwirtschaftsjahres 1975 die mittlere Grundwasseroberfläche fast den gleichen Höhenstand wie am Anfang der Reihe hat. In diesem Gebiet ist keine Absenkung nachweisbar.

Die Ganglinien 0126 und 0217 enthalten Inhomogenitäten, die durch die folgenden Umstände hervorgerufen wurden. Im Bereich der Meßstelle 0126 wirkte sich eine Grundwasserentnahme aus, die in der Zeit von Okt. 1974 bis April 1975 ca. 0.587 hm^3 und von Aug. 1975 bis Dez. 1975 ca. 0.112 hm^3 umfaßte. Dies verdeutlicht auch die Trendfunktion durch einen fallenden Funktionsverlauf.

Die Inhomogenität in der Ganglinie des Pegels 0217 wurde dadurch verursacht, daß die Messung der Grundwasseroberfläche in verschiedenen Pegelrohren vorgenommen wurde, die in unterschiedlichen Bodenschichten

endeten. Die erste Bohrung wurde im September 1959 niedergebracht, hatte eine Verrohrung von ca. 4.80 m und endete im Geschiebemergel (genaue Angaben liegen nicht vor). Die zweite Bohrung wurde im Sept. 1963 mit einer Rohrlänge von 21.15 m abgeteuft und die dritte im Aug. 1968 mit einer Rohrlänge von 30.80 m. Die während des Bestehens der ersten Bohrung gemessenen Wasserstände zeigen ein vollkommen anderes Verhalten der Grundwasseroberfläche an als die in den nachfolgenden Rohren gemessenen Wasserstände. Eine Übereinstimmung dieser Grundwasserstandsganglinie mit denen der übrigen Meßstellen dieses Gebietes beginnt mit der zweiten Bohrung ungefähr Ende des Wasserwirtschaftsjahres 1963 (siehe Taf. 4). Die Ganglinie ist als inhomogen zu bezeichnen. Diese Inhomogenität teilt sich der Trendfunktion mit. Die Trendfunktion zeigt erst in den letzten Jahren eine gewisse Übereinstimmung mit den übrigen Trendfunktionen aus diesem Gebiet.

6.2 Spektralanalyse

6.2.1 Allgemeines

Die theoretischen Grundlagen und die Methodik der hier durchgeführten Zeitreihenanalyse sind in Kap. 4.2.3 dargelegt worden. Der zentrale Begriff ist der der "Periode". Unter Periode ist hier die zeitliche Größe zu verstehen, die einer Schwankung in einer allgemeinen Form zugeordnet werden kann. Bestimmt werden diese Perioden mit der Spektraldichtefunktion. Dabei deuten die Maxima dieser Funktion auf die Perioden (Schwingungen), die den größten Beitrag zur Varianzverteilung des betrachteten Prozesses liefern und daher als die bestimmenden anzusehen sind. Häufigkeit und Amplitude der Perioden haben also einen direkten Einfluß auf diese Funktion.

6.2.2 Klimatologische Zeitreihen aus den drei Gebieten

Aufgrund der Erörterungen in Kap. 3.2 war zu ersehen, daß die entsprechenden klimatologischen Zeitreihen ein weitgehend übereinstimmendes Klimaverhalten der drei Gebiete anzeigen. Die Spektralanalyse bestätigt dies. Es ergibt sich folgendes Bild:

| | Perioden in Monaten | |
|--|--|---------------|
| | Hauptperiode | Nebenperioden |
| Reihe 5001, 5101, 5201 (Niederschläge) | 12 | 48—60, 6 |
| " 5002, 5102, 5202 (14Uhr-Temperatur-Monatsmittel) | 12 | |
| " 5003, 5103, 5203 (Monatsmittel-Temperatur) | 12 | |
| " 5004, 5104, 5204 (relative Luftfeuchtigkeit) | 12 | |
| " 5005, 5105, 5205 (pot. Evapotranspiration nach HAUDE) | 12 | |
| " 5006, 5106, 5206 (pot. Evapotranspiration nach THORNTHWAITE) | 12 | |
| " 5010, 5110, 5210 (klimatische Wasserbilanz — HAUDE) | 12 | 40—60 |
| " 5011, 5111, 5211 (klimatische Wasserbilanz — THORNTHWAITE) | 12 | 40— ~100 |
| " 5300 (Monatsmittel des Luftdruckes) | Eine Periode ist nicht zu erkennen. Die Spektraldichtefunktion läßt die Deutung eines "weißen Rauschen" - Prozesses zu. | |

Ein Ergebnis aus Kap. 3.2 war, daß bei Wasserhaushaltsbetrachtungen für einen längeren Zeitraum eine gute Übereinstimmung zwischen den potentiellen Evapotranspirationen, berechnet jeweils nach HAUDE und nach THORNTHWAITE, besteht. Daher wird für die weitere Untersuchung im wesentlichen nur noch die klimatische Wasserbilanz nach HAUDE herangezogen.

Für die Reihen (5010, 5110, 5210) wurde die Amplitudenhöhe der nachgewiesenen Jahresperiode berechnet. Diese ergab sich für alle drei Gebiete übereinstimmend zu ca. 40 mm. Der Rechenansatz zur Berechnung der Amplitude wurde schon im Kap. 4.2.5 dargelegt. Die ermittelte Amplitudenhöhe stellt jeweils einen Durchschnittswert für die einzelne Reihe dar.

Weil keine signifikanten Unterschiede bestehen, sind nur die Werte der Spektraldichtefunktionen und die entsprechenden Graphen von Reihen aus Gebiet A (5001, 5002, 5004, 5005, 5010, 5300) dargestellt (Abb. 14,15).

AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 5300

TRUNC -P = 40 ANZAHL FREQUENZEN= 120

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P | |
|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| | | * | + | 0 | |
| 0.0 | LINEAR | 2.37 | 2.19 | 2.63 | \ 0 |
| 0.004 | 240.0 | 2.45 | 2.30 | 2.65 | \ 0 |
| 0.008 | 120.0 | 2.64 | 2.59 | 2.72 | \ 0 |
| 0.013 | 80.0 | 2.91 | 2.91 | 2.79 | \ 0 |
| 0.017 | 60.0 | 3.09 | 3.11 | 2.83 | \ 0* |
| 0.021 | 48.0 | 3.12 | 3.11 | 2.80 | \ 0* |
| 0.025 | 40.0 | 2.97 | 2.92 | 2.68 | \ 0 |
| 0.029 | 34.3 | 2.68 | 2.61 | 2.49 | \ 0 |
| 0.033 | 30.0 | 2.29 | 2.26 | 2.24 | \ 0 |
| 0.037 | 26.7 | 1.87 | 1.92 | 1.98 | \ 0 |
| 0.042 | 24.0 | 1.51 | 1.61 | 1.74 | \ 0 |
| 0.046 | 21.8 | 1.27 | 1.37 | 1.61 | \ 0 |
| 0.050 | 20.0 | 1.19 | 1.25 | 1.57 | \ 0 |
| 0.054 | 18.5 | 1.31 | 1.31 | 1.64 | \ 0 |
| 0.058 | 17.1 | 1.61 | 1.58 | 1.79 | \ 0 |
| 0.063 | 16.0 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | \ 0 |
| 0.067 | 15.0 | 2.40 | 2.44 | 2.21 | \ 0 |
| 0.071 | 14.1 | 2.68 | 2.76 | 2.38 | \ 0 |
| 0.075 | 13.3 | 2.79 | 2.85 | 2.48 | \ 0 |
| 0.079 | 12.6 | 2.72 | 2.70 | 2.50 | \ 0 |
| 0.083 | 12.0 | 2.53 | 2.43 | 2.46 | \ 0 |
| 0.088 | 11.4 | 2.32 | 2.16 | 2.38 | \ 0 |
| 0.092 | 10.9 | 2.17 | 2.02 | 2.30 | \ 0 |
| 0.096 | 10.4 | 2.12 | 2.03 | 2.23 | \ 0 |
| 0.100 | 10.0 | 2.14 | 2.14 | 2.17 | \ 0 |
| 0.104 | 9.6 | 2.18 | 2.23 | 2.12 | \ 0 |
| 0.108 | 9.2 | 2.17 | 2.24 | 2.06 | \ 0 |
| 0.112 | 8.9 | 2.09 | 2.13 | 1.98 | \ 0* |
| 0.117 | 8.6 | 1.94 | 1.94 | 1.88 | \ 0 |
| 0.121 | 8.3 | 1.76 | 1.74 | 1.75 | \ 0 |
| 0.125 | 8.0 | 1.58 | 1.58 | 1.62 | \ 0 |
| 0.129 | 7.7 | 1.43 | 1.48 | 1.50 | \ 0 |
| 0.133 | 7.5 | 1.31 | 1.42 | 1.40 | \ 0 |
| 0.138 | 7.3 | 1.23 | 1.36 | 1.34 | \ 0 |
| 0.142 | 7.1 | 1.18 | 1.30 | 1.32 | \ 0 |
| 0.146 | 6.9 | 1.20 | 1.24 | 1.35 | \ 0 |
| 0.150 | 6.7 | 1.28 | 1.31 | 1.42 | \ 0 |
| 0.154 | 6.5 | 1.44 | 1.45 | 1.54 | \ 0 |
| 0.158 | 6.3 | 1.65 | 1.68 | 1.68 | \ 0 |
| 0.162 | 6.2 | 1.88 | 1.93 | 1.84 | \ 0 |
| 0.167 | 6.0 | 2.07 | 2.12 | 1.99 | \ 0* |

AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 5010

TRUNC -P = 40 ANZAHL FREQUENZEN= 120

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 | |
| 0.0 | LINEAR | 0.83 | 0.89 | 1.27 | \ 0 |
| 0.004 | 240.0 | 0.96 | 1.03 | 1.32 | \ 0 |
| 0.008 | 120.0 | 1.30 | 1.39 | 1.45 | \ 0 |
| 0.013 | 80.0 | 1.71 | 1.87 | 1.62 | \ 0 |
| 0.017 | 60.0 | 2.03 | 2.29 | 1.77 | \ 0* |
| 0.021 | 48.0 | 2.16 | 2.47 | 1.86 | \ 0* |
| 0.025 | 40.0 | 2.09 | 2.34 | 1.88 | \ 0* |
| 0.029 | 34.3 | 1.92 | 2.00 | 1.83 | \ 0* |
| 0.033 | 30.0 | 1.75 | 1.69 | 1.75 | \ 0 |
| 0.037 | 26.7 | 1.62 | 1.61 | 1.65 | \ 0 |
| 0.042 | 24.0 | 1.51 | 1.80 | 1.59 | \ 0 |
| 0.046 | 21.8 | 1.35 | 2.02 | 1.62 | \ 0* |
| 0.050 | 20.0 | 1.17 | 2.02 | 1.86 | \ 0* |
| 0.054 | 18.5 | 1.17 | 1.78 | 2.42 | \ 0 |
| 0.058 | 17.1 | 1.72 | 1.67 | 3.40 | \ 0 |
| 0.063 | 16.0 | 3.18 | 2.37 | 4.84 | \ ++0 |
| 0.067 | 15.0 | 5.67 | 4.39 | 6.66 | \ ++0 |
| 0.071 | 14.1 | 8.91 | 7.67 | 8.62 | \ ++0 |
| 0.075 | 13.3 | 12.18 | 11.40 | 10.38 | \ ++0 |
| 0.079 | 12.6 | 14.56 | 14.30 | 11.57 | \ ++0 |
| 0.083 | 12.0 | 15.33 | 15.24 | 11.94 | \ ++0 |
| 0.088 | 11.4 | 14.23 | 13.86 | 11.38 | \ ++0 |
| 0.092 | 10.9 | 11.58 | 10.70 | 10.01 | \ ++0 |
| 0.096 | 10.4 | 8.21 | 6.95 | 8.14 | \ ++0 |
| 0.100 | 10.0 | 4.97 | 3.80 | 6.12 | \ ++0 |
| 0.104 | 9.6 | 2.55 | 1.91 | 4.29 | \ ++0 |
| 0.108 | 9.2 | 1.18 | 1.27 | 2.87 | \ ++0 |
| 0.112 | 8.9 | 0.71 | 1.34 | 1.92 | \ ++0 |
| 0.117 | 8.6 | 0.76 | 1.54 | 1.38 | \ ++0 |
| 0.121 | 8.3 | 0.97 | 1.57 | 1.15 | \ ++0 |
| 0.125 | 8.0 | 1.11 | 1.43 | 1.08 | \ ++0 |
| 0.129 | 7.7 | 1.15 | 1.29 | 1.10 | \ ++0 |
| 0.133 | 7.5 | 1.14 | 1.26 | 1.15 | \ ++0 |
| 0.138 | 7.3 | 1.14 | 1.33 | 1.21 | \ ++0 |
| 0.142 | 7.1 | 1.21 | 1.43 | 1.29 | \ ++0 |
| 0.146 | 6.9 | 1.32 | 1.47 | 1.39 | \ ++0 |
| 0.150 | 6.7 | 1.46 | 1.50 | 1.50 | \ ++0 |
| 0.154 | 6.5 | 1.62 | 1.58 | 1.60 | \ ++0 |
| 0.158 | 6.3 | 1.76 | 1.73 | 1.69 | \ ++0 |
| 0.162 | 6.2 | 1.86 | 1.90 | 1.73 | \ ++0 |
| 0.167 | 6.0 | 1.90 | 1.98 | 1.74 | \ ++0 |

AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 5002

TRUNC -P = 40 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 13.6
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 15.3
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 18.9

RANDBREITE TUKEY = 0.033
 RANDBREITE BARTLETT = 0.037
 RANDBREITE PARZEN = 0.046

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P | |
|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| | | * | + | 0 | |
| 0.0 | LINEAR | 0.29 | 0.82 | 0.41 | \ 0 |
| 0.004 | 240.0 | 0.32 | 0.74 | 0.42 | \ 0 |
| 0.008 | 120.0 | 0.40 | 0.61 | 0.44 | \ 0 |
| 0.013 | 80.0 | 0.46 | 0.62 | 0.45 | \ 0 |
| 0.017 | 60.0 | 0.46 | 0.81 | 0.45 | \ 0 |
| 0.021 | 48.0 | 0.40 | 1.04 | 0.44 | \ 0* |
| 0.025 | 40.0 | 0.32 | 1.04 | 0.43 | \ 0* |
| 0.029 | 34.3 | 0.32 | 0.81 | 0.44 | \ 0* |
| 0.033 | 30.0 | 0.46 | 0.62 | 0.46 | \ 0 |
| 0.037 | 26.7 | 0.65 | 0.83 | 0.50 | \ 0 |
| 0.042 | 24.0 | 0.72 | 1.46 | 0.59 | \ 0 |
| 0.046 | 21.8 | 0.48 | 2.07 | 0.86 | \ 0 |
| 0.050 | 20.0 | 0.04 | 2.09 | 1.53 | \ 0 |
| 0.054 | 18.5 | -0.05 | 1.47 | 2.92 | \ 0 |
| 0.058 | 17.1 | 1.16 | 1.12 | 5.33 | \ 0 |
| 0.063 | 16.0 | 4.43 | 2.48 | 8.89 | \ 0 |
| 0.067 | 15.0 | 10.74 | 7.53 | 13.40 | \ 0 |
| 0.071 | 14.1 | 18.79 | 15.62 | 18.30 | \ 0 |
| 0.075 | 13.3 | 27.06 | 25.02 | 22.77 | \ 0 |
| 0.079 | 12.6 | 33.25 | 32.55 | 25.89 | \ 0 |
| 0.083 | 12.0 | 35.46 | 35.30 | 26.95 | \ 0 |
| 0.088 | 11.4 | 32.95 | 32.15 | 25.70 | \ 0 |
| 0.092 | 10.9 | 26.53 | 24.39 | 22.43 | \ 0 |
| 0.096 | 10.4 | 18.14 | 14.96 | 17.86 | \ 0 |
| 0.100 | 10.0 | 10.07 | 6.97 | 12.90 | \ 0 |
| 0.104 | 9.6 | 4.04 | 2.23 | 8.39 | \ 0 |
| 0.108 | 9.2 | 0.43 | 0.71 | 4.87 | \ 0 |
| 0.112 | 8.9 | -0.43 | 1.07 | 2.51 | \ 0 |
| 0.117 | 8.6 | -0.26 | 1.72 | 1.16 | \ 0 |
| 0.121 | 8.3 | 0.22 | 1.78 | 0.53 | \ 0 |
| 0.125 | 8.0 | 0.46 | 1.23 | 0.29 | \ 0 |
| 0.129 | 7.7 | 0.39 | 0.56 | 0.22 | \ 0 |
| 0.133 | 7.5 | 0.19 | 0.31 | 0.20 | \ 0 |
| 0.138 | 7.3 | 0.06 | 0.42 | 0.20 | \ 0 |
| 0.142 | 7.1 | 0.08 | 0.66 | 0.22 | \ 0 |
| 0.146 | 6.9 | 0.19 | 0.75 | 0.25 | \ 0 |
| 0.150 | 6.7 | 0.28 | 0.62 | 0.29 | \ 0 |
| 0.154 | 6.5 | 0.33 | 0.44 | 0.33 | \ 0 |
| 0.158 | 6.3 | 0.33 | 0.38 | 0.35 | \ 0 |
| 0.162 | 6.2 | 0.33 | 0.48 | 0.35 | \ 0 |
| 0.167 | 6.0 | 0.34 | 0.62 | 0.33 | \ 0 |

Abb. 15: Spektren von klimatologischen Reihen

Es bedeutet:
 TRUNC.-P=truncation-Punkt
 FREQ=Frequenz
 PERI=Periode in Monaten
 SP.T=Spektrum (TUKEY-window)
 SP.B= " (BARTLETT-window)
 SP.P= " (PARZEN-window)

Es ist zu ersehen, daß neben der Jahresperiode eine langjährige Periode mit $T \sim 5$ a deutlich in den Niederschlägen und daher natürlich auch in der klimatischen Wasserbilanz nachzuweisen ist. In letzterer dominiert eindeutig die Jahresperiode, die hauptsächlich durch die potentielle Evapotranspiration hervorgerufen wird und folglich konzentriert sich dort auch die Masse der Varianz.

Während die Perioden mit $T = 1$ a und $T = 0.5$ a kausal durch den Jahresrhythmus erfaßt sind, gibt es meteorologische Vorgänge, die mit Perioden $T > 1$ a ablaufen. Spektralanalytische Untersuchungen langer meteorologischer Zeitreihen hat SCHÖNWIESE (1969, 1970, 1971) durchgeführt und zum Vergleich sei sein Ergebnis für Schwingungen mit $T > 1$ a aufgeführt (SCHÖNWIESE, 1969:46):

Varianzmaxima der analysierten Gesamtreihen für $T > 1$ a. Die Zahlen geben die Periodenintervalle der Varianzmaxima an.

| Reihe | | Periode in Jahren | | |
|----------------------------|-------------|-------------------|-----------|------------|
| Temperatur Hohenpeißenberg | 1781 — 1967 | 2,1 — 2,4 | 3,0 — 3,7 | (8 — 17) |
| Niederschlag Frankfurt/M | 1837 — 1967 | 1,9 — 2,3 | 4,2 — 6,2 | — |
| Luftdruck Hohenpeißenberg | 1879 — 1965 | 2,1 — 2,8 | 3,3 — 5,6 | — |

Eine gute Übereinstimmung besteht zwischen den Niederschlagsreihen von Berlin und Frankfurt (M) bei den langen Perioden mit $T \sim 5$ a. Bei den anderen Reihen konnten die entsprechenden langjährigen Perioden hier nicht nachgewiesen werden. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die hier vorliegenden Reihen wesentlich kürzer sind.

Obwohl bei der Reihe 5300 (Luftdruck) keine Periodizitäten in den Luftdruckschwankungen nachgewiesen werden konnten, ist jedoch damit zu rechnen, daß kurzfristige Luftdruckschwankungen Einflüsse auf den Grundwasserstand ausüben und damit auch in die gemessenen Grundwasserstände eingehen. Dies gilt sowohl für den gespannten als auch für den ungespannten Aquifer, wie einzelne Untersuchungen von JACOB (1940), VAN EIMERN (1950), MEISSNER (1953) und SCHENK (1973) gezeigt haben.

6.2.3 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes A (Tegeler Forst - Frohnau - Hermsdorf)

Die folgende Tabelle enthält neben den Ergebnissen der Spektralanalyse auch die Tiefe der Grundwasseroberfläche unter Flur und die Amplituden der Jahresschwingung. Die Amplituden wurden für die Ganglinien ermittelt, bei denen das Spektrum durch eine Spitze (peak) auf das Vorhandensein einer Jahresschwingung hinweist.

| Ganglinie Nr. | Periode in Monaten | | Tiefe der Grundwasseroberfläche unter Flur in m (Mittelwert) | Amplitude der Jahresschwingung in m |
|---------------|--------------------|-------------------|---|--|
| | Hauptperiode | Nebenperiode | | |
| 0001 | 80-100 | — | ca. 14.30 | |
| 0004 | 60-70 | 12 (sehr schwach) | ca. 7.50 | 0.06 |
| 0115 | 100 | — | ca. 14.40 | |
| 0145 | 60-70 | — | ca. 8.00 | |
| 0146 | 70 | — | ca. 16.60 | |
| 0150 | 60 | 12 — 20 | ca. 6.70 | 0.06 |
| 0151 | 60 | 12 | ca. 2.70 | 0.19 |
| 0157 | 60 | 12 — 20 | ca. 7.20 | 0.06 |
| 0176 | 60 | — | ca. 13.30 | |
| 0218 | 60 | — | ca. 12.80 | |
| 0248 | 80 | — | ca. 7.20 | |
| 1140 | 60 | 12 (sehr schwach) | ca. 7.60 | 0.05 |
| 1141 | 80 | — | ca. 4.50 | |
| 1142 | 60-80 | 12 | ca. 4.00 | 0.11 |

Tab. 1: Ergebnis der Spektralanalyse von Grundwasserstandsganglinien aus dem Gebiet A

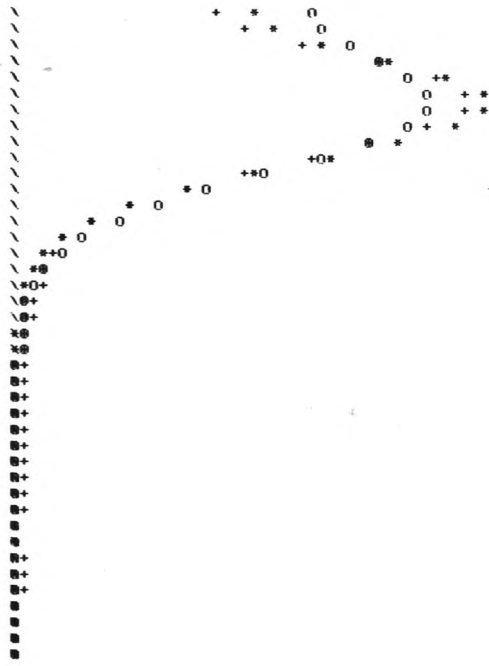
AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 1

TRUNC.-P. = 80 ANZAHL FREQUENZEN= 240

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 8.8
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 9.9
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 12.2

BANDBREITTE TUKEY = 0.017
 BANDBREITTE BARTLETT = 0.019
 BANDBREITTE PARZEN = 0.023

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 25.01 | 21.66 | 31.97 |
| 0.002 | 480.0 | 27.05 | 24.17 | 32.85 |
| 0.004 | 240.0 | 32.45 | 30.63 | 35.23 |
| 0.006 | 160.0 | 39.43 | 38.48 | 38.36 |
| 0.008 | 120.0 | 45.76 | 44.86 | 41.28 |
| 0.010 | 96.0 | 49.56 | 47.88 | 43.06 |
| 0.013 | 80.0 | 49.88 | 47.13 | 43.07 |
| 0.015 | 68.6 | 46.74 | 43.37 | 41.09 |
| 0.017 | 60.0 | 40.95 | 37.77 | 37.32 |
| 0.019 | 53.3 | 33.64 | 31.31 | 32.26 |
| 0.021 | 48.0 | 25.96 | 24.63 | 26.56 |
| 0.023 | 43.6 | 18.80 | 18.21 | 20.84 |
| 0.025 | 40.0 | 12.77 | 12.61 | 15.62 |
| 0.027 | 36.9 | 8.18 | 8.36 | 11.23 |
| 0.029 | 34.3 | 5.06 | 5.71 | 7.80 |
| 0.031 | 32.0 | 3.19 | 4.42 | 5.29 |
| 0.033 | 30.0 | 2.20 | 3.88 | 3.58 |
| 0.035 | 28.2 | 1.70 | 3.45 | 2.48 |
| 0.037 | 26.7 | 1.39 | 2.81 | 1.81 |
| 0.040 | 25.3 | 1.11 | 2.07 | 1.40 |
| 0.042 | 24.0 | 0.89 | 1.53 | 1.17 |
| 0.044 | 22.9 | 0.77 | 1.38 | 1.05 |
| 0.046 | 21.8 | 0.78 | 1.54 | 0.99 |
| 0.048 | 20.9 | 0.88 | 1.74 | 0.97 |
| 0.050 | 20.0 | 0.97 | 1.75 | 0.96 |
| 0.052 | 19.2 | 1.00 | 1.56 | 0.95 |
| 0.054 | 18.5 | 0.93 | 1.30 | 0.91 |
| 0.056 | 17.8 | 0.82 | 1.13 | 0.86 |
| 0.058 | 17.1 | 0.72 | 1.09 | 0.81 |
| 0.060 | 16.6 | 0.67 | 1.11 | 0.77 |
| 0.063 | 16.0 | 0.67 | 1.09 | 0.75 |
| 0.065 | 15.5 | 0.71 | 1.02 | 0.75 |
| 0.067 | 15.0 | 0.76 | 0.97 | 0.77 |
| 0.069 | 14.5 | 0.80 | 0.99 | 0.78 |
| 0.071 | 14.1 | 0.83 | 1.07 | 0.79 |
| 0.073 | 13.7 | 0.84 | 1.13 | 0.78 |
| 0.075 | 13.3 | 0.81 | 1.09 | 0.75 |
| 0.077 | 13.0 | 0.75 | 0.94 | 0.70 |
| 0.079 | 12.6 | 0.66 | 0.77 | 0.63 |
| 0.081 | 12.3 | 0.55 | 0.66 | 0.56 |
| 0.083 | 12.0 | 0.45 | 0.62 | 0.47 |



AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 4

TRUNC.-P. = 60 ANZAHL FREQUENZEN= 150

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 11.7
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 13.2
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 16.3

BANDBREITTE TUKEY = 0.022
 BANDBREITTE BARTLETT = 0.025
 BANDBREITTE PARZEN = 0.031

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 13.78 | 10.82 | 19.37 |
| 0.003 | 300.0 | 15.83 | 13.92 | 20.44 |
| 0.007 | 150.0 | 22.20 | 21.44 | 23.17 |
| 0.010 | 100.0 | 29.29 | 29.23 | 26.35 |
| 0.013 | 75.0 | 33.86 | 33.45 | 28.57 |
| 0.017 | 60.0 | 34.19 | 32.69 | 28.86 |
| 0.020 | 50.0 | 30.56 | 28.17 | 27.00 |
| 0.023 | 42.9 | 24.64 | 22.25 | 23.45 |
| 0.027 | 37.5 | 18.34 | 16.81 | 19.06 |
| 0.030 | 33.3 | 12.96 | 12.50 | 14.66 |
| 0.033 | 30.0 | 8.94 | 9.21 | 10.83 |
| 0.037 | 27.3 | 6.18 | 6.72 | 7.85 |
| 0.040 | 25.0 | 4.42 | 5.01 | 5.71 |
| 0.043 | 23.1 | 3.40 | 4.06 | 4.30 |
| 0.047 | 21.4 | 2.91 | 3.66 | 3.43 |
| 0.050 | 20.0 | 2.71 | 3.46 | 2.92 |
| 0.053 | 18.8 | 2.58 | 3.20 | 2.59 |
| 0.057 | 17.6 | 2.37 | 2.87 | 2.33 |
| 0.060 | 16.7 | 2.07 | 2.51 | 2.10 |
| 0.063 | 15.8 | 1.72 | 2.17 | 1.89 |
| 0.067 | 15.0 | 1.44 | 1.86 | 1.74 |
| 0.070 | 14.3 | 1.34 | 1.63 | 1.69 |
| 0.073 | 13.6 | 1.49 | 1.64 | 1.76 |
| 0.077 | 13.0 | 1.85 | 1.96 | 1.92 |
| 0.080 | 12.5 | 2.28 | 2.45 | 2.09 |
| 0.083 | 12.0 | 2.56 | 2.80 | 2.17 |
| 0.087 | 11.5 | 2.52 | 2.75 | 2.12 |
| 0.090 | 11.1 | 2.16 | 2.28 | 1.91 |
| 0.093 | 10.7 | 1.60 | 1.63 | 1.59 |
| 0.097 | 10.3 | 1.05 | 1.08 | 1.25 |
| 0.100 | 10.0 | 0.69 | 0.79 | 0.95 |

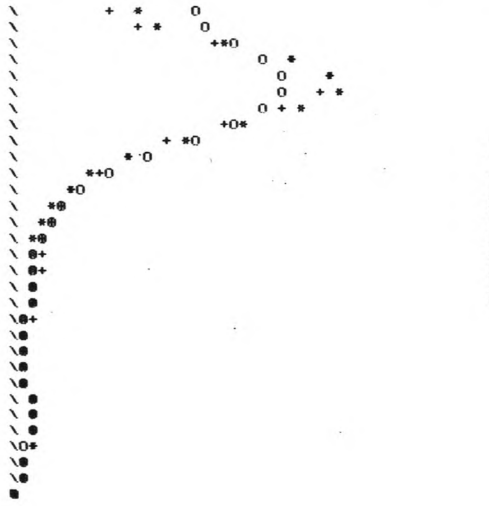


Abb. 16: Spektren der Grundwasserstandsganglinien 0001 und 0004

Es bedeutet:
 TRUNC.-P.=truncation-Punkt
 FREQ=Frequenz
 PERI=Periode in Monaten
 SP.T=Spektrum (TUKEY-window)
 SP.B= " (BARTLETT-window)
 SP.P= " (PARZEN-window)

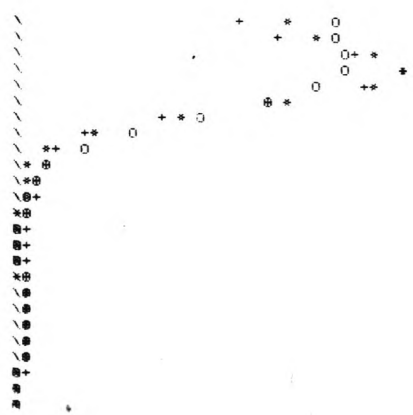
AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 048

TRUNC -P. = 55 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 12.8
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 14.4
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 17.8

BANDBREITE TUKEY = 0.024
 BANDBREITE BARTLETT = 0.027
 BANDBREITE PARZEN = 0.034

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 28.83 | 24.00 | 33.03 |
| 0.004 | 240.0 | 31.52 | 27.79 | 33.66 |
| 0.008 | 120.0 | 37.17 | 35.63 | 34.77 |
| 0.013 | 80.0 | 40.47 | 40.14 | 34.61 |
| 0.017 | 60.0 | 37.53 | 36.64 | 31.76 |
| 0.021 | 48.0 | 28.67 | 26.60 | 26.15 |
| 0.025 | 40.0 | 17.68 | 15.49 | 19.05 |
| 0.029 | 34.3 | 8.70 | 7.81 | 12.25 |
| 0.033 | 30.0 | 3.58 | 4.37 | 7.05 |
| 0.037 | 26.7 | 1.65 | 3.30 | 3.80 |
| 0.042 | 24.0 | 1.23 | 2.74 | 2.10 |
| 0.046 | 21.8 | 1.08 | 2.10 | 1.33 |
| 0.050 | 20.0 | 0.87 | 1.61 | 1.01 |
| 0.054 | 18.5 | 0.72 | 1.42 | 0.89 |
| 0.058 | 17.1 | 0.72 | 1.37 | 0.88 |
| 0.063 | 16.0 | 0.82 | 1.33 | 0.94 |
| 0.067 | 15.0 | 0.96 | 1.33 | 1.04 |
| 0.071 | 14.1 | 1.11 | 1.41 | 1.13 |
| 0.075 | 13.5 | 1.25 | 1.53 | 1.20 |
| 0.079 | 12.6 | 1.33 | 1.57 | 1.21 |
| 0.083 | 12.0 | 1.28 | 1.49 | 1.15 |
| 0.088 | 11.4 | 1.09 | 1.28 | 1.02 |
| 0.092 | 10.9 | 0.84 | 1.01 | 0.83 |
| 0.096 | 10.4 | 0.58 | 0.75 | 0.64 |
| 0.100 | 10.0 | 0.39 | 0.56 | 0.47 |



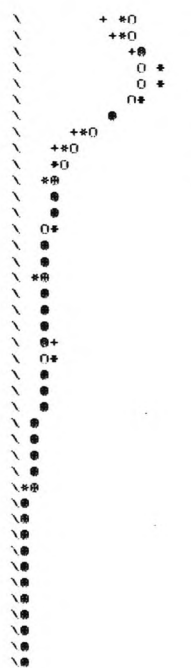
AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 1142

TRUNC -P. = 45 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 15.6
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 17.6
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 21.8

BANDBREITE TUKEY = 0.030
 BANDBREITE BARTLETT = 0.033
 BANDBREITE PARZEN = 0.041

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 11.07 | 9.09 | 12.75 |
| 0.004 | 240.0 | 11.83 | 10.26 | 12.91 |
| 0.008 | 120.0 | 13.62 | 12.98 | 13.26 |
| 0.013 | 80.0 | 15.22 | 15.36 | 13.43 |
| 0.017 | 60.0 | 15.46 | 15.74 | 13.08 |
| 0.021 | 48.0 | 13.90 | 13.71 | 12.04 |
| 0.025 | 40.0 | 11.00 | 10.20 | 10.43 |
| 0.029 | 34.3 | 7.81 | 6.81 | 8.57 |
| 0.033 | 30.0 | 5.35 | 4.68 | 6.85 |
| 0.037 | 26.7 | 4.08 | 4.04 | 5.54 |
| 0.042 | 24.0 | 3.83 | 4.30 | 4.71 |
| 0.046 | 21.8 | 4.05 | 4.68 | 4.25 |
| 0.050 | 20.0 | 4.21 | 4.70 | 4.01 |
| 0.054 | 18.5 | 4.06 | 4.32 | 3.82 |
| 0.058 | 17.1 | 3.65 | 3.76 | 3.63 |
| 0.063 | 16.0 | 3.23 | 3.29 | 3.46 |
| 0.067 | 15.0 | 2.99 | 3.05 | 3.35 |
| 0.071 | 14.1 | 3.03 | 3.09 | 3.36 |
| 0.075 | 13.5 | 3.30 | 3.35 | 3.45 |
| 0.079 | 12.6 | 3.66 | 3.72 | 3.59 |
| 0.083 | 12.0 | 3.94 | 4.02 | 3.71 |
| 0.088 | 11.4 | 4.05 | 4.10 | 3.74 |
| 0.092 | 10.9 | 3.93 | 3.92 | 3.66 |
| 0.096 | 10.4 | 3.64 | 3.57 | 3.49 |
| 0.100 | 10.0 | 3.27 | 3.18 | 3.24 |
| 0.104 | 9.6 | 2.91 | 2.87 | 2.96 |
| 0.108 | 9.2 | 2.59 | 2.64 | 2.68 |
| 0.112 | 8.9 | 2.34 | 2.44 | 2.43 |
| 0.117 | 8.6 | 2.14 | 2.24 | 2.22 |
| 0.121 | 8.3 | 1.97 | 2.05 | 2.04 |
| 0.125 | 8.0 | 1.83 | 1.91 | 1.89 |
| 0.129 | 7.7 | 1.71 | 1.81 | 1.76 |
| 0.133 | 7.5 | 1.62 | 1.75 | 1.67 |
| 0.138 | 7.3 | 1.55 | 1.67 | 1.60 |
| 0.142 | 7.1 | 1.50 | 1.59 | 1.57 |
| 0.146 | 6.9 | 1.49 | 1.55 | 1.57 |
| 0.150 | 6.7 | 1.53 | 1.57 | 1.60 |
| 0.154 | 6.5 | 1.61 | 1.65 | 1.64 |
| 0.158 | 6.3 | 1.72 | 1.77 | 1.70 |
| 0.162 | 6.2 | 1.82 | 1.86 | 1.74 |
| 0.167 | 6.0 | 1.86 | 1.89 | 1.75 |



AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 151

TRUNC -P. = 50 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 10.9
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 12.2
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 15.1

BANDBREITE TUKEY = 0.027
 BANDBREITE BARTLETT = 0.030
 BANDBREITE PARZEN = 0.037

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 7.85 | 6.44 | 10.99 |
| 0.004 | 240.0 | 9.32 | 8.18 | 11.55 |
| 0.008 | 120.0 | 12.87 | 12.35 | 12.89 |
| 0.013 | 80.0 | 16.45 | 16.41 | 14.24 |
| 0.017 | 60.0 | 18.05 | 18.01 | 14.76 |
| 0.021 | 48.0 | 16.78 | 16.31 | 13.98 |
| 0.025 | 40.0 | 13.21 | 12.30 | 11.99 |
| 0.029 | 34.3 | 8.83 | 7.92 | 9.34 |
| 0.033 | 30.0 | 5.13 | 4.70 | 6.70 |
| 0.037 | 26.7 | 2.88 | 3.11 | 4.59 |
| 0.042 | 24.0 | 2.02 | 2.71 | 3.20 |
| 0.046 | 21.8 | 1.96 | 2.80 | 2.46 |
| 0.050 | 20.0 | 2.04 | 2.90 | 2.18 |
| 0.054 | 18.5 | 1.92 | 2.79 | 2.23 |
| 0.058 | 17.1 | 1.80 | 2.50 | 2.68 |
| 0.063 | 16.0 | 2.24 | 2.46 | 3.64 |
| 0.067 | 15.0 | 3.86 | 3.40 | 5.21 |
| 0.071 | 14.1 | 6.76 | 5.89 | 7.22 |
| 0.075 | 13.5 | 10.27 | 9.51 | 9.25 |
| 0.079 | 12.6 | 13.06 | 12.75 | 10.72 |
| 0.083 | 12.0 | 13.91 | 13.82 | 11.13 |
| 0.088 | 11.4 | 12.43 | 12.03 | 10.35 |
| 0.092 | 10.9 | 9.28 | 8.39 | 8.63 |
| 0.096 | 10.4 | 5.79 | 4.79 | 6.48 |
| 0.100 | 10.0 | 3.13 | 2.64 | 4.46 |
| 0.104 | 9.6 | 1.71 | 1.89 | 2.92 |
| 0.108 | 9.2 | 1.23 | 1.96 | 1.94 |
| 0.112 | 8.9 | 1.13 | 1.77 | 1.42 |

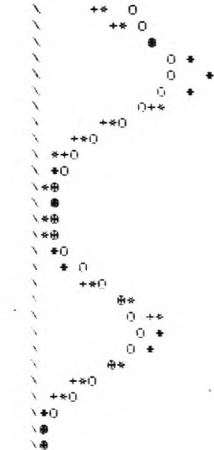


Abb. 17: Spektren der Grundwasserstands-ganglinien 0151, 0248 und 1142.

(Abkürzungen siehe vorige Seite)

Die Abb. 16 und 17 verdeutlichen das frequenzielle Verhalten dieses Grundwasserkörpers.

Die ermittelte Amplitude stellt —wie schon vorher gesagt— jeweils einen Durchschnittswert für die einzelne Ganglinie dar. Es sind hauptsächlich zwei Perioden zu erkennen:

1) die mehrjährigen Schwingungen mit einer Dauer von etwa 60-80 Monaten. Diese Perioden liefern bei allen Ganglinien den größten Beitrag zur Varianzverteilung und sind als die den Prozeß bestimmenden anzusehen. Das übereinstimmende langjährige Verhalten der Grundwasseroberfläche, das von den Tiefenlagen der Filter in den Pegelrohren und somit vom Charakter des Aquifers unabhängig ist (s. Taf. 5 u. 6), läßt auf einen einheitlichen Aquifer schließen. Unterschiedlicher Flurabstand der Grundwasseroberfläche und sich ändernde Spannungsverhältnisse lassen keinen Einfluß erkennen.

Eine genauere Eingrenzung der langjährigen Schwingungen ist aufgrund der relativ kurzen Zeitreihen nicht möglich. Unter diesem Gesichtspunkt muß auch das Auftreten der ca. 100-Monats-Perioden gesehen werden. Die Sicherheit der Aussage kann über die Chi-Quadrat Verteilung nach Kap. 4.2.4 abgeschätzt werden. So ergibt sich z.B. bei der Reihe 151 für die 60-Monats-Periode mit $s_{r_m}^* = 18.01$ (BARTLETT-window) bei einer Wahrscheinlichkeit von 80% ($\alpha = 0.2$) ein Konfidenzintervall von etwa 11.0 bis 30.0. Aus dem gleichen Grund ist auch die Berechnung der Amplituden bei den langjährigen Schwingungen mit größeren Ungenauigkeiten behaftet.

2) Die Jahresperiode ist nur bei einzelnen Ganglinien nachweisbar. Außerdem deutet sich eine Abhängigkeit der Amplitude vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche an. Für die weitere Untersuchung ist es unerläßlich, neben den geologischen auch die örtlichen Bedingungen zu berücksichtigen.

Die größte durchschnittliche Amplitude findet sich in der Ganglinie 0151 und beträgt 19 cm bei einem Flurabstand der Grundwasseroberfläche von ca. 2,70 m. Diese Ganglinie (Taf. 2) hat die ausgeprägteste Morphologie aller Ganglinien des Gebietes und zeigt nachweisbar auch die beste Übereinstimmung mit der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5010, s. Kap. 6.2.4). Wie aus dem Bohrprofil (Taf. 6) zu erkennen ist, befindet sich der Filter unter einer ca. 6 m dicken Geschiebemergel- und -lehmschicht und der Schwankungsbereich der im Pegelrohr registrierten Grundwasserstandshöhen liegt über dieser Schicht. Es handelt sich daher um den Druckwasserspiegel eines örtlich gespannten Aquifers. Aufgrund der Geologie dieses Gebietes kann angenommen werden, daß die abdeckende Grundmoränenschicht nicht über einer größeren Fläche durchgehend vorhanden ist und daher das Nährgebiet nicht weit entfernt liegen kann (s. Kap. 2). Außerdem läßt die deutliche Jahresperiode darauf schließen, daß im Nährgebiet nur ein geringer Flurabstand zur Grundwasseroberfläche herrschen kann. Die Schwankungen des Grundwasserspiegels im Nährgebiet werden im Bereich des gespannten Aquifers ohne größere Veränderung der Amplitude und der Phase zur Meßstelle weitergeleitet.

Bei der Ganglinie 1142 wurde —bei einem Flurabstand von ca. 4 m — eine durchschnittliche Amplitude von ca. 11 cm ermittelt. Der Pegel 1142 liegt in einem relativ ebenen Gelände im Randbereich zwischen dem Tegeler Forst und der aufgelockerten Bebauung von Hermsdorf. Das Bohrprofil (Taf. 6) zeigt, daß Grob- und Feinsande bis zu Tage anstehen. Da bei beiden aufgeführten Pegeln keine äußeren Umstände zu erkennen sind, die auf eine Beeinflussung des Grundwasserverhaltens aus anderen Gründen als dem natürlichen Versickerungsvorgang schließen lassen, kann aus der Amplitude des Jahrganges die jährliche Versickerungsrate errechnet werden. Dies gilt auch für den Pegel 1140. Dagegen muß beim Pegel 0004 eine Beeinflussung vom Tegeler Fließ her in Betracht gezogen werden. Die Entfernung zum Tegeler Fließ beträgt 370 m. Das Tegeler Fließ zeigt einen ausgesprochenen Jahresgang. Die mittlere monatliche Höhe seines Wasserspiegels liegt durchschnittlich ca. 50 cm über den gemessenen Grundwasserständen des Pegels 0004. Wenn angenommen wird, daß das Flußbett nicht abgedichtet ist und influente Verhältnisse vorliegen, dann beeinflusst der Jahresgang des Oberflächengewässers in seiner Umgebung den Grundwasserstand. Die Amplitude der Ganglinie kann somit auch durch das Tegeler Fließ hervorgerufen bzw. beeinflusst sein und wird aus diesem Grund nicht zu einer Abschätzung der Grundwasserneubildung herangezogen. Das bedeutet nicht, daß im Areal dieses Pegels keine jährlichen Niederschläge dem Grundwasser zusickern können.

Bei den Ganglinien 0150 und 0157 treten schwache Perioden von ca. 12 bis 20 Monaten Dauer auf. Die für die Jahresperiode errechneten Amplituden von durchschnittlich ca. 6 cm sind gering. Sowohl die sich überlagernden schwachen Perioden verschiedener Längen als auch der Spannungszustand des Aquifers (s. Taf. 5 u. 6) deuten auf schwache Einflüsse entfernter Nährgebiete hin.

Bei der Ganglinie 1141 ist bei einem Flurabstand von nur ca. 4.50 m keine Jahresperiode nachzuweisen. In diesem Fall gibt der Flurabstand allein die Verhältnisse nicht richtig wieder, sondern es ist die Lage des Pegels zu berücksichtigen. Dieser liegt am Hang einer kleinen Erhebung — des Ehrenfortenberges mit

69 m ü. NN — in einer morphologischen Depression, so daß in wenigen Metern Entfernung der Flurabstand erheblich größer ist und daher das Fehlen der Jahresschwingung zu erklären ist.

Trägt man die Amplituden derjenigen Jahresschwingungen, die allein durch den versickernden Niederschlag hervorgerufen werden, in Abhängigkeit des Flurabstands der Grundwasseroberfläche auf, so ergibt sich für die hier anstehenden relativ einheitlichen Lockersedimente — überwiegend Feinsand — das folgende Diagramm. Die wenigen hier zur Verfügung stehenden Angaben lassen nur eine lineare Abhängigkeit erkennen.

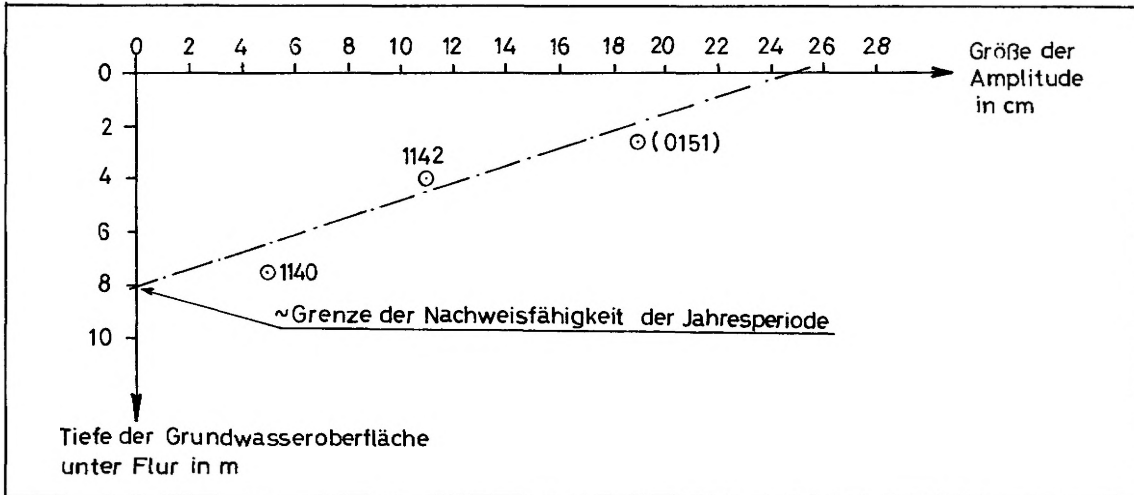


Abb. 18: Abhängigkeit der Amplituden der Jahresperiode vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche

6.2.4 Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet A (Kreuzspektrum)

Die Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen werden im wesentlichen durch das quadratische Kohärenz- und das Phasenspektrum dargestellt, wobei ersteres eine Korrelation und letzteres eine Phasenverschiebung zwischen gleichen Perioden der zwei betrachteten Prozesse angibt. Die Phase ist die Zeitdifferenz, die zwischen dem Eintreffen des Ereignisses und der Reaktion des Systems verstreicht. Im vorliegenden Fall des Grundwassersystems kann sie sich aus einem Anteil infolge vertikaler und horizontaler Fließbewegung zusammensetzen. Zwischen den einzelnen Pegeln konnten keine Phasenverschiebungen aufgrund des als horizontal angesehenen Fließens des Grundwasserstromes nachgewiesen werden, so daß auftretende Phasen allein der Zeit entsprechen, die das versickernde Wasser von der Gelände- bis zur Grundwasseroberfläche benötigt.

Bei der Jahresperiode bestehen folgende Zusammenhänge:

| Reihe / Reihe | Kohärenz | Phase | die der Phase entsprechende Zeitverschiebung | |
|---------------|----------|-------|--|-----------|
| 5010 / 0151 | 0.90 | 65° | ca. 2 Monate | (Abb. 19) |
| 5010 / 1142 | 0.40 | 173° | ca. 5 - 6 Monate | (Abb. 20) |

Die hohe Kohärenz zwischen den Jahresperioden der Ganglinien 5010 und 0151 beweist sowohl die große Übereinstimmung mit der klimatischen Wasserbilanz und derum ausgeprägten Jahresgang als auch, daß das Nährgebiet in nächster Umgebung liegen muß und nur ein geringer Flurabstand zur Grundwasseroberfläche vorhanden sein kann.

Für die Untersuchung der Beziehungen zwischen den langjährigen Perioden wurden die Reihen mit einer 60 bis 80- Monatsperiode herangezogen. Es wurde festgestellt, daß die Kohärenzen im Gegensatz zum Phasenspektrum kaum Unterschiede zwischen der 60- und der 80- Monatsperiode aufwiesen. Die am besten übereinstimmenden Phasen ergaben sich bei einem Vergleich mit der Reihe der klimatischen Wasserbilanz (5010) im Gegensatz zur Niederschlagsreihe (5001). Es hat den Anschein, als ob durch den insgesamt glatteren Verlauf der Reihe 5010 bessere Phasenschätzungen folgten, andererseits lagen die Kohärenzen niedriger als bei

KREUZSPEKTREN AUS DEN REIHEN 5010 UND 151

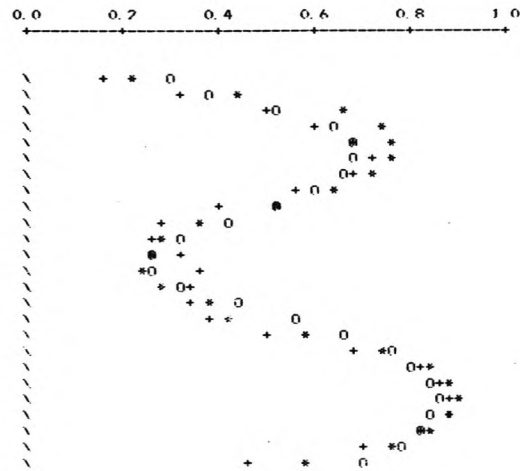
TRUNC -P = 50 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 11.8
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 13.3
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 16.5

BANDBREITE TUKEY = 0.029
 BANDBREITE BARTLETT = 0.033
 BANDBREITE PARZEN = 0.040

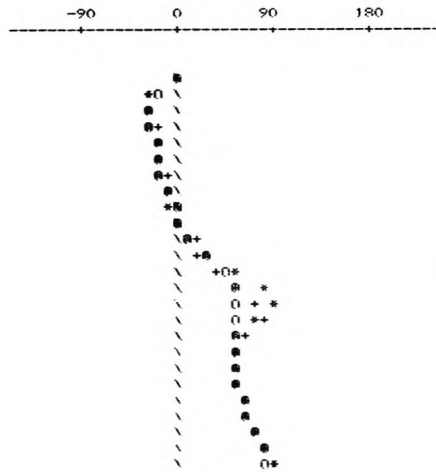
KOHÄRENZSPEKTRUM

| FREQ | PERI | K T | K B | K P |
|-------|-------|------|------|------|
| 0 0 | UNEND | 0.24 | 0.17 | 0.31 |
| 0 004 | 240 0 | 0.45 | 0.34 | 0.39 |
| 0 008 | 120 0 | 0.66 | 0.51 | 0.54 |
| 0 013 | 80 0 | 0.74 | 0.61 | 0.64 |
| 0 017 | 60 0 | 0.77 | 0.69 | 0.69 |
| 0 021 | 48 0 | 0.76 | 0.73 | 0.70 |
| 0 025 | 40 0 | 0.73 | 0.69 | 0.67 |
| 0 029 | 34 3 | 0.65 | 0.57 | 0.61 |
| 0 033 | 30 0 | 0.52 | 0.41 | 0.53 |
| 0 037 | 26 7 | 0.37 | 0.29 | 0.43 |
| 0 042 | 24 0 | 0.28 | 0.28 | 0.33 |
| 0 046 | 21 8 | 0.26 | 0.33 | 0.26 |
| 0 050 | 20 0 | 0.25 | 0.36 | 0.27 |
| 0 054 | 18 5 | 0.28 | 0.35 | 0.34 |
| 0 058 | 17 1 | 0.38 | 0.35 | 0.45 |
| 0 063 | 16 0 | 0.43 | 0.40 | 0.57 |
| 0 067 | 15 0 | 0.59 | 0.50 | 0.68 |
| 0 071 | 14 1 | 0.75 | 0.70 | 0.76 |
| 0 075 | 13 3 | 0.84 | 0.82 | 0.82 |
| 0 079 | 12 6 | 0.89 | 0.88 | 0.85 |
| 0 083 | 12 0 | 0.90 | 0.90 | 0.86 |
| 0 088 | 11 4 | 0.89 | 0.88 | 0.86 |
| 0 092 | 10 9 | 0.85 | 0.83 | 0.83 |
| 0 096 | 10 4 | 0.76 | 0.70 | 0.79 |
| 0 100 | 10 0 | 0.59 | 0.48 | 0.71 |



PHASENSPEKTRUM

| FREQ | PERI | GRADT | GRADB | GRADP |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 0 | UNEND | 0 0 | 0 0 | 0 0 |
| 0 004 | 240 0 | -34 0 | -30 4 | -20 8 |
| 0 008 | 120 0 | -35 5 | -29 2 | -28 7 |
| 0 013 | 80 0 | -31 0 | -25 8 | -28 9 |
| 0 017 | 60 0 | -26 5 | -23 3 | -26 2 |
| 0 021 | 48 0 | -22 5 | -21 0 | -22 4 |
| 0 025 | 40 0 | -19 0 | -17 8 | -18 2 |
| 0 029 | 34 3 | -15 5 | -12 9 | -13 6 |
| 0 033 | 30 0 | -11 1 | -4 8 | -8 0 |
| 0 037 | 26 7 | -2 7 | 6 9 | -0 3 |
| 0 042 | 24 0 | 13 5 | 18 2 | 11 7 |
| 0 046 | 21 8 | 37 9 | 27 0 | 29 3 |
| 0 050 | 20 0 | 55 3 | 38 0 | 43 0 |
| 0 054 | 18 5 | 84 4 | 55 2 | 57 7 |
| 0 058 | 17 1 | 98 3 | 73 1 | 57 8 |
| 0 063 | 16 0 | 75 0 | 86 6 | 55 5 |
| 0 067 | 15 0 | 41 2 | 67 1 | 54 7 |
| 0 071 | 14 1 | 56 7 | 57 7 | 55 9 |
| 0 075 | 13 3 | 52 8 | 57 6 | 58 5 |
| 0 079 | 12 6 | 60 9 | 60 7 | 62 0 |
| 0 083 | 12 0 | 65 1 | 65 0 | 66 1 |
| 0 088 | 11 4 | 68 8 | 70 1 | 70 7 |
| 0 092 | 10 9 | 75 4 | 76 0 | 75 7 |
| 0 096 | 10 4 | 62 2 | 84 1 | 81 3 |
| 0 100 | 10 0 | 92 3 | 98 0 | 87 8 |



Es bedeutet:

- TRUNC.-P=truncation-Punkt
- FREQ=Frequenz
- PERI=Periode in Monaten
- K.T=Kohärenz (TUKEY-window)
- K.B= " (BARTLETT-window)
- K.P= " (PARZEN-window)
- GRADT=Phase (TUKEY-window)
- GRADB= " (BARTLETT-window)
- GRADP= " (PARZEN-window)

Abb. 19: Kohärenz- und Phasenspektrum der Reihen 5010 / 0151 (Gebiet A)

einem Vergleich mit der Reihe 5001.

Für die Reihen mit mehrjähriger Periode ergeben sich folgende Zusammenhänge (auf die 60-Monats-Periode bezogen):

| Reihe | / Reihe | Kohärenz | Phase |
|-------|---------|----------|------------------|
| 5010 | / 0004 | 0.41 | 104 ⁰ |
| " | / 0145 | 0.43 | 131 ⁰ |
| " | / 0146 | 0.50 | 118 ⁰ |
| " | / 0150 | 0.40 | 105 ⁰ |
| " | / 0151 | 0.69 | -23 ⁰ |
| " | / 0157 | 0.36 | 128 ⁰ |
| " | / 0176 | 0.56 | 118 ⁰ |
| " | / 0218 | 0.34 | 120 ⁰ |
| " | / 1140 | 0.74 | 162 ⁰ |
| " | / 1141 | 0.25 | 130 ⁰ |
| " | / 1142 | 0.40 | -10 ⁰ |

(Abb. 19)

(Abb. 20)

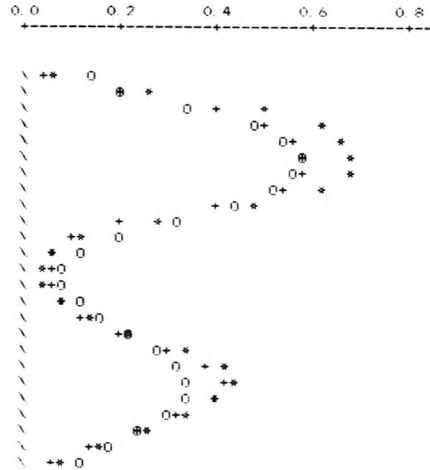
STATISTIKEN AUS DEN REIHEN 5010 UND 1142

TRUNC.-P = 50 ANZAHL FREQUENZEN = 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 12.7
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 14.2
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 17.6
 BANDBREITE TUKEY = 0.031
 BANDBREITE BARTLETT = 0.035
 BANDBREITE PARZEN = 0.043

KOHÄRENZSPEKTRUM

| FREQ | PERI | K T | K B | K P |
|-------|-------|------|------|------|
| 0.0 | UNEND | 0.08 | 0.04 | 0.15 |
| 0.004 | 240.0 | 0.24 | 0.20 | 0.22 |
| 0.008 | 120.0 | 0.50 | 0.41 | 0.36 |
| 0.013 | 80.0 | 0.62 | 0.51 | 0.48 |
| 0.017 | 60.0 | 0.67 | 0.56 | 0.54 |
| 0.021 | 48.0 | 0.69 | 0.59 | 0.59 |
| 0.025 | 40.0 | 0.68 | 0.59 | 0.58 |
| 0.029 | 34.3 | 0.63 | 0.55 | 0.53 |
| 0.033 | 30.0 | 0.50 | 0.41 | 0.44 |
| 0.037 | 26.7 | 0.39 | 0.32 | 0.33 |
| 0.042 | 24.0 | 0.13 | 0.11 | 0.21 |
| 0.046 | 21.8 | 0.06 | 0.08 | 0.13 |
| 0.050 | 20.0 | 0.04 | 0.07 | 0.09 |
| 0.054 | 18.5 | 0.05 | 0.07 | 0.09 |
| 0.058 | 17.1 | 0.08 | 0.08 | 0.12 |
| 0.063 | 16.0 | 0.14 | 0.13 | 0.17 |
| 0.067 | 15.0 | 0.24 | 0.21 | 0.23 |
| 0.071 | 14.1 | 0.35 | 0.30 | 0.29 |
| 0.075 | 13.3 | 0.42 | 0.39 | 0.34 |
| 0.079 | 12.6 | 0.44 | 0.43 | 0.36 |
| 0.083 | 12.0 | 0.42 | 0.40 | 0.35 |
| 0.088 | 11.4 | 0.35 | 0.34 | 0.31 |
| 0.092 | 10.9 | 0.27 | 0.24 | 0.26 |
| 0.096 | 10.4 | 0.17 | 0.14 | 0.20 |
| 0.100 | 10.0 | 0.09 | 0.06 | 0.14 |



Es bedeutet:

TRUNC.-P=truncation-Punkt
 FREQ=Frequenz
 PERI=Periode in Monaten
 K.T=Kohärenz (TUKEY-window)
 K.B= " (BARTLETT-window)
 K.P= " (PARZEN-window)
 GRADT=Phase (TUKEY-window)
 GRADB= " (BARTLETT-window)
 GRADP= " (PARZEN-window)

PHASENSPEKTRUM

| FREQ | PERI | GRADT | GRADB | GRADP |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0 | UNEND | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 0.004 | 240.0 | -41.8 | -43.0 | -21.3 |
| 0.008 | 120.0 | -36.7 | -34.5 | -25.2 |
| 0.013 | 80.0 | -25.1 | -21.9 | -20.0 |
| 0.017 | 60.0 | -12.9 | -9.8 | -11.3 |
| 0.021 | 48.0 | -1.1 | 1.6 | -1.4 |
| 0.025 | 40.0 | 10.3 | 12.8 | 9.1 |
| 0.029 | 34.3 | 21.5 | 24.2 | 19.9 |
| 0.033 | 30.0 | 33.1 | 36.8 | 31.1 |
| 0.037 | 26.7 | 45.9 | 51.1 | 43.2 |
| 0.042 | 24.0 | 61.0 | 65.5 | 57.2 |
| 0.046 | 21.8 | 78.4 | 78.0 | 74.5 |
| 0.050 | 20.0 | 98.6 | 91.4 | 95.4 |
| 0.054 | 18.5 | 122.6 | 109.7 | 114.6 |
| 0.058 | 17.1 | 140.3 | 133.8 | 127.9 |
| 0.063 | 16.0 | 146.4 | 149.5 | 136.8 |
| 0.067 | 15.0 | 149.0 | 152.1 | 144.1 |
| 0.071 | 14.1 | 153.0 | 153.7 | 151.4 |
| 0.075 | 13.3 | 158.7 | 158.4 | 159.0 |
| 0.079 | 12.6 | 165.9 | 165.3 | 167.0 |
| 0.083 | 12.0 | 174.0 | 173.5 | 175.6 |
| 0.088 | 11.4 | 183.1 | 182.7 | 184.9 |
| 0.092 | 10.9 | 193.6 | 193.5 | 195.0 |
| 0.096 | 10.4 | 206.8 | 208.1 | 206.6 |
| 0.100 | 10.0 | 228.2 | 235.1 | 220.7 |

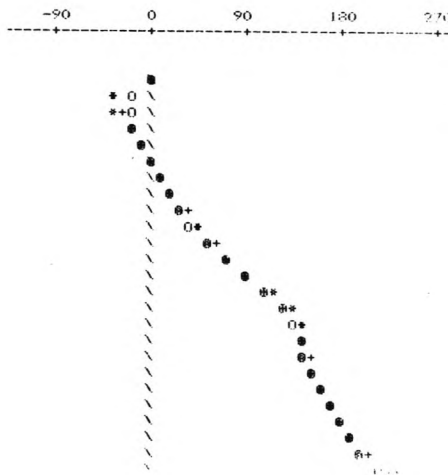


Abb. 20: Kohärenz- und Phasenspektrum der Reihen 5010 / 1142 (Gebiet A)

Bedingt sowohl durch die Komplexität von Kohärenz- und Phasenspektrum als auch durch die relativ kurzen Zeitreihen muß bei den ermittelten Werten mit größeren Toleranzen gerechnet werden als beim (Auto-) Spektrum. Es ist zu vermuten, daß daneben auch Einflüsse numerischer Natur eine größere Rolle spielen. Darauf weisen die Werte der Reihe 1140 hin, die zu hoch erscheinen. Die Reihe 1140 hat die niedrigste Varianz aller Reihen dieses Gebietes mit 0.02 m^2 . Aus diesem Grunde werden die Werte dieser Reihe nicht in die weitere Betrachtung einbezogen.

Die Reihen 0151 und 1142 repräsentieren das Verhalten eines Grundwasserspiegels mit geringem Flurabstand. Beide Reihen zeigen mit die höchsten Kohärenzen. Die Phase von $\sim 0^0$ bei diesen beiden Pegeln deutet darauf hin, daß bei den langjährigen Perioden eine relativ schnelle Reaktion auf das langjährige Niederschlagsverhalten erfolgt. Die Reaktionszeit wird i.a. der der Jahresperiode entsprechen.

Für die übrigen Grundwasserstandsganglinien, die von tiefergelegenen Grundwasserspiegeln stammen, ergeben sich entsprechend den Phasen Zeitdifferenzen von ca. 17 - 22 Monaten. Dies kommt einer durchschnittlichen

Sickergeschwindigkeit von ca. $1,5 \text{ bis } 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ gleich.

6.2.5 Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet A

Den langjährigen Gleichgewichtszustand zwischen den natürlichen Zu- und Abflüssen des Grundwassers stellt der Mittelwert der stationären Grundwasserstandsganglinie dar. Unter Zufluß ist hier der aus Niederschlägen her-rührende, im wesentlichen vertikal dem Grundwasser zusickernde Anteil zu sehen. Dieser verursacht eine Änderung der Lage der Grundwasseroberfläche, die gemessen wird und die Ausgangszeitreihe dieser Untersuchung bildet. Die diesem Zufluß gegenüberstehende Größe ist der unterirdische Grundwasserabfluß, der i.a. als gleichmäßig ange-nommen wird (BURRE, 1960). Selten wird es über längere Zeiten zu einem Gleichgewichtszustand kommen, d.h., daß der Zufluß gleich dem Grundwasserabfluß ist. Meistens herrscht ein dauernder Wechsel in Form sich überlagernder Jahres- und Mehrjahres-Schwingungen vor, die in einer allgemeinen Form durch sinusoidale Größen approximiert werden können.

Die Grundwasserneubildung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

1. dem Anteil aus den jährlichen Niederschlägen, der in den Arealen dem Aquifer zufließt, in denen in den Grundwasserstandsganglinien eine Jahresperiode nachzuweisen ist und
2. dem Anteil aus Niederschlägen, der durch die mehrjährigen Perioden in allgemeiner Form abgebildet wird.

Für die Ermittlung der Grundwasserneubildung wird als Bezugsgröße die klimatische Wasserbilanz herangezogen. Es wird allgemein angenommen, daß im Winterhalbjahr die Übereinstimmung mit den wahren Verhältnissen groß ist. Im Sommerhalbjahr steht häufig der wahren Evapotranspiration eine zu hohe potentielle gegenüber. Hieraus folgt, daß in der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5010) eine nicht dem natürlichen Vorgang entsprechende, zu große Amplitude erzeugt wird. Diese verursacht das durchschnittliche monatliche Defizit von 4.29 mm in der klimatischen Wasserbilanz (Taf. 4). Um nun den natürlichen Verhältnissen näherzukommen, wird die Amplitude um 4 mm reduziert und mit einer korrigierten Amplitude von 36 mm gerechnet. Diese ist mit den Amplituden der Jahresperioden der Grundwasserstandsganglinien zu korrelieren. Einer Amplitude von 36 mm (Reihe 5010) steht eine solche von ca. 25 cm (=100 %) in Feinsand und Geländehöhe gegenüber (Abb. 18). Dies ergibt ein Porenvolumen von ca. 14 % (DAVIS & DEWIEEST, 1967:394 geben für Feinsand die effektive Porösität mit 10 % an).

Im einzelnen errechnen sich folgende Niederschlagsmengen, die jährlich dem Aquifer zusickern:

| | |
|---|-----------------|
| im Bereich des Pegels 0151 bzw. seinem Nährgebiet | 76% = 104 mm , |
| im Bereich des Pegels 1142 | 44% = 60 mm und |
| im Bereich des Pegels 1140 | 20% = 27 mm . |

Bei der mehrjährigen Periode ist die Ermittlung der Grundwasserneubildung auf dem direkten Weg über die Amplituden aus dem schon im Kap. 6.2.3 genannten Grund zu ungenau. Daher wird eine Eichung zwischen einander entsprechenden Schwankungen der klimatischen Wasserbilanz und den Grundwasserstandsganglinien durchgeführt. Hierzu ist am besten der positive Teil der fast sinusförmigen Schwingung der Grundwasserstandsganglinien geeignet. Die bei allen Grundwasserstandsganglinien dieses Gebietes vorhandene Schwingung liegt im Zeitraum der Jahre 1961 bis 1966. Eine ebenso ausgeprägte Schwingung ist in der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5010) oder in der Niederschlagsreihe (Reihe 5001, Taf. 4, Fig. 1) nicht zu erkennen. Werden jedoch bei der Reihe 5010 die Differenzen zum langzeitlichen Mittelwert gebildet und diese z.B. nach der Methode der gleitenden Durch-schnitte ausgeglichen, so treten deutlich die mehrjährigen Schwankungen hervor, die mit den Bewegungen der Grund-wasseroberfläche übereinstimmen und in einem ursächlichen Zusammenhang stehen (s. Abb. 21). In der klimati-schen Wasserbilanz beginnt die betrachtete Schwankung Anfang 1960. Die Zeitdifferenz stimmt mit der errechneten durchschnittlichen Phase von 17 bis 22 Monaten, wie sie für die tieferliegende Grundwasseroberfläche gilt, überein. Die klimatische Wasserbilanz beinhaltet in dem betrachteten positiven, über dem langjährigen Mittelwert liegenden Teil dieser Schwingung mit einer Amplitude von rd. 16 mm eine Niederschlagsmenge von ca. 280 mm. Diese Wassermenge fließt dem tiefer anstehenden Grundwasser in einem Zeitraum von etwa 2.5 Jahren zu und ruft eine Amplitude von ca. 40 cm hervor. Diese Amplitude stellt einen Mittelwert aus den entsprechenden Amplituden aller Grundwasserstandsganglinien des Gebietes A dar. Das Verhältnis der beiden Amplituden ergibt ein Porenvolumen von ca. 7 %. Es ist anzunehmen, daß der langzeitliche Schwankungsvorgang des tieferen Aquifers in einer teil-weise noch mit Wasser gesättigten Bodenzone abläuft.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß in dem Gebiet A eine Grundwasserneubildung infolge des lang-zeitlichen Niederschlagsverhalten immer angesetzt werden kann. Dagegen ist eine Versickerung aus dem jährlichen Niederschlag nur partiell vorhanden. Für das Fehlen dieses Anteiles ist entweder die Überlagerung durch Grund-

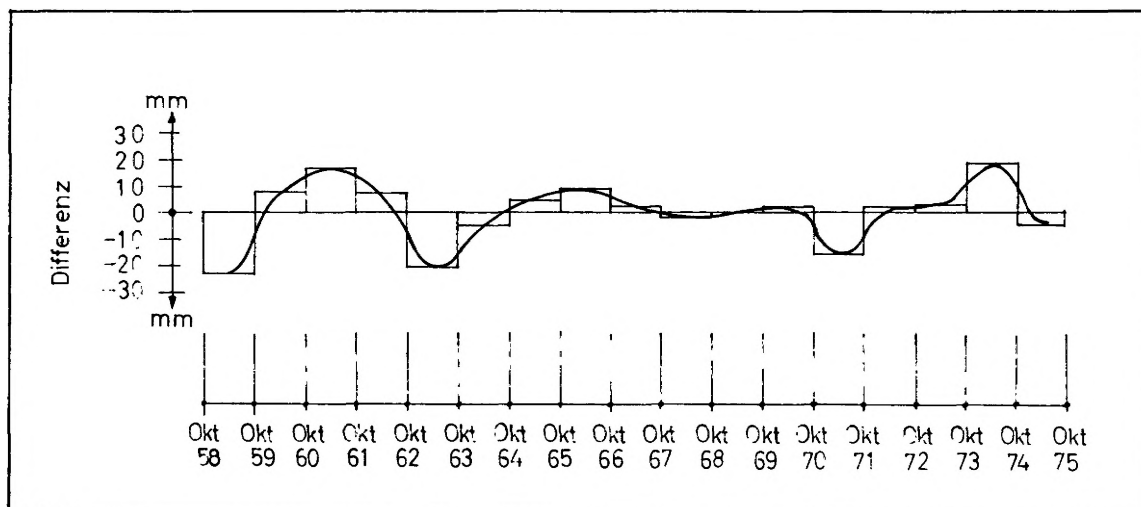


Abb. 21: Differenzen zum Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz

moränenmaterial oder trotz bis zu Tage anstehender Sande der zu große Flurabstand der Grundwasseroberfläche verantwortlich. Dieser Umstand bewirkt, daß die hangenden Schichten die Funktion eines Puffers haben, in dem der Niederschlagsanfall aufzufangen, gespeichert und durch Verdunstung wieder abgegeben wird.

6.2.6 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes B (Neukölln)

Die meisten Grundwasserstandsganglinien aus diesem Gebiet (Taf. 3) zeigen vom äußeren Bild her einen wenig ausgeprägten Schwingungsverlauf. Die Grundwasserstände oszillieren vielfach nur gering um den Mittelwert. Das beweisen auch die Varianzen dieser Reihen, die nur kleine Werte erreichen: von 0.009 m^2 (Reihe 0488) bis 0.02 m^2 (Reihe 0803). In vielen Fällen sind die Ganglinien außerdem durch größere Grundwasserabsenkungen gestört. Die Spektren solcher mit Inhomogenitäten belasteten Reihen sind je nach Größe und zeitlicher Ausdehnung der Inhomogenität verfälscht und können zu einer nicht dem natürlichen Vorgang entsprechenden Interpretation verleiten. Aus diesem Grund werden Reihen mit erkennbaren Inhomogenitäten nicht in die weitere Untersuchung einbezogen und nur die nachfolgend aufgeführten zu einer Auswertung verwendet.

| Ganglinie Nr. | Periode in Monaten | | Tiefe der Grundwasseroberfläche unter Flur in m (Mittelwert) | Amplitude der Jahres-schwingung in m |
|----------------|--------------------|--------------|--|--------------------------------------|
| | Hauptperiode | Nebenperiode | | |
| 0089 | 80 | -- | ca. 20.80 | |
| 0251 | 100 | -- | ca. 19.30 | |
| 0488 | 90 | 12,18 | ca. 5.50 | 0.03 |
| 0793(bis 1970) | 80 | 12 | ca. 3.50 | 0.05 |
| 0795 " " | 100 | 12 | ca. 6.50 | 0.05 |
| 0802 | 70 | 12 | ca. 4.0 | 0.05 |
| 0803 | 110 | 12 | ca. 16.30 | 0.05 |

Tab. 2: Ergebnis der Spektralanalyse von Grundwasserstandsganglinien aus dem Gebiet B

Aus Tab. 2 ist zu ersehen, daß auch in diesem Gebiet zwei Periodenbereiche vorherrschen:

- 1) der Bereich der Mehrjahres-Perioden mit ca. 70 - 110 Monaten Dauer und
- 2) der Bereich der 12 - 18 Monats-Perioden

Die Längen der mehrjährigen Schwingungen variieren in diesem Gebiet stärker. Dies ist, wie gesagt, auf die ge-

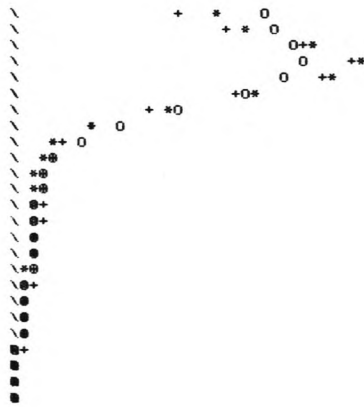
AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 29

TRUNC. -P = 40 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 11 7
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 13 2
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 16 3

BANDBREITE TUKEY = 0.022
 BANDBREITE BARTLETT = 0.025
 BANDBREITE PARZEN = 0.031

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 21.29 | 17.86 | 26.11 |
| 0.004 | 240.0 | 24.59 | 22.07 | 27.22 |
| 0.008 | 120.0 | 31.55 | 30.65 | 29.51 |
| 0.013 | 80.0 | 36.01 | 35.60 | 30.66 |
| 0.017 | 60.0 | 33.87 | 32.53 | 28.86 |
| 0.021 | 48.0 | 25.94 | 23.78 | 24.03 |
| 0.025 | 40.0 | 16.34 | 14.71 | 17.66 |
| 0.029 | 34.3 | 8.85 | 8.63 | 11.65 |
| 0.033 | 30.0 | 4.72 | 5.55 | 7.25 |
| 0.037 | 26.7 | 3.14 | 4.18 | 4.67 |
| 0.042 | 24.0 | 2.83 | 3.68 | 3.46 |
| 0.046 | 21.8 | 2.92 | 3.64 | 3.00 |
| 0.050 | 20.0 | 2.94 | 3.60 | 2.87 |
| 0.054 | 18.5 | 2.75 | 3.23 | 2.66 |
| 0.058 | 17.1 | 2.39 | 2.67 | 2.45 |
| 0.063 | 16.0 | 2.07 | 2.30 | 2.22 |
| 0.067 | 15.0 | 1.91 | 2.20 | 2.01 |
| 0.071 | 14.1 | 1.83 | 2.14 | 1.83 |
| 0.075 | 13.3 | 1.69 | 1.94 | 1.64 |
| 0.079 | 12.6 | 1.45 | 1.64 | 1.43 |
| 0.083 | 12.0 | 1.18 | 1.37 | 1.20 |
| 0.088 | 11.4 | 0.93 | 1.14 | 0.99 |
| 0.092 | 10.9 | 0.74 | 0.95 | 0.80 |
| 0.096 | 10.4 | 0.60 | 0.79 | 0.66 |
| 0.100 | 10.0 | 0.51 | 0.68 | 0.56 |



AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 488

TRUNC. -P = 71 ANZAHL FREQUENZEN= 150

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 8 1
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 9 1
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 11 3

BANDBREITE TUKEY = 0.019
 BANDBREITE BARTLETT = 0.021
 BANDBREITE PARZEN = 0.026

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 15.03 | 10.51 | 22.13 |
| 0.003 | 300.0 | 19.46 | 16.46 | 23.58 |
| 0.007 | 150.0 | 29.03 | 28.87 | 26.70 |
| 0.010 | 100.0 | 35.83 | 36.77 | 28.77 |
| 0.013 | 75.0 | 34.38 | 33.82 | 27.58 |
| 0.017 | 60.0 | 25.49 | 22.98 | 22.92 |
| 0.020 | 50.0 | 14.54 | 11.98 | 16.45 |
| 0.023 | 42.9 | 6.54 | 5.85 | 10.37 |
| 0.027 | 37.5 | 2.96 | 4.17 | 6.07 |
| 0.030 | 33.3 | 2.23 | 4.00 | 3.73 |
| 0.033 | 30.0 | 2.28 | 3.54 | 2.79 |
| 0.037 | 27.3 | 2.28 | 2.94 | 2.65 |
| 0.040 | 25.0 | 2.48 | 2.91 | 2.98 |
| 0.043 | 23.1 | 3.27 | 3.61 | 3.61 |
| 0.047 | 21.4 | 4.48 | 4.69 | 4.38 |
| 0.050 | 20.0 | 5.58 | 5.69 | 5.02 |
| 0.053 | 18.8 | 6.06 | 6.15 | 5.30 |
| 0.057 | 17.6 | 5.71 | 5.79 | 5.09 |
| 0.060 | 16.7 | 4.70 | 4.74 | 4.50 |
| 0.063 | 15.8 | 3.48 | 3.51 | 3.79 |
| 0.067 | 15.0 | 2.58 | 2.67 | 3.26 |
| 0.070 | 14.3 | 2.40 | 2.48 | 3.09 |
| 0.073 | 13.6 | 2.97 | 2.97 | 3.29 |
| 0.077 | 13.0 | 3.89 | 3.87 | 3.67 |
| 0.080 | 12.5 | 4.59 | 4.63 | 3.91 |
| 0.083 | 12.0 | 4.55 | 4.66 | 3.80 |
| 0.087 | 11.5 | 3.71 | 3.74 | 3.28 |
| 0.090 | 11.1 | 2.43 | 2.34 | 2.50 |
| 0.093 | 10.7 | 1.28 | 1.22 | 1.72 |
| 0.097 | 10.3 | 0.64 | 0.78 | 1.12 |
| 0.100 | 10.0 | 0.50 | 0.80 | 0.79 |

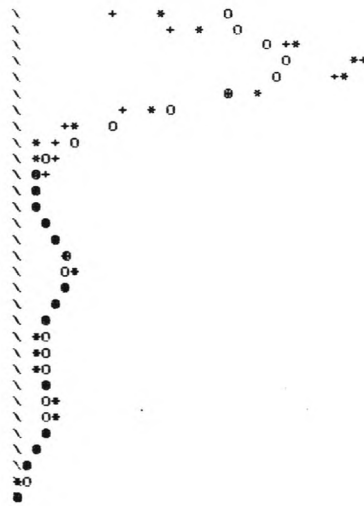


Abb. 22: Spektren der Grundwasserstandsganglinien 0089 und 0488 (Abkürzungen siehe Abb. 16)

ringe Varianz der Reihen zurückzuführen. Eine Abhängigkeit von der örtlichen Lage und den geologischen Gegebenheiten ist nicht zu erkennen (Taf. 7 und 8).

Bei den 12- bzw. 18- Monats-Perioden bestehen bei den einzelnen Pegeln folgende Situationen: Bei den Pegeln 0089 und 0251 ist neben der mehrjährigen Periode von 80 - 100 Monaten Dauer keine Jahresperiode nachzuweisen. Die beiden Pegel liegen am Rande des Flughafens Tempelhof noch auf der Teltow-Hochfläche. Aus den Bohrprofilen (Taf. 7) ist zu ersehen, daß die Grundmoränenabdeckung (Geschiebelehm) und der große Flurabstand des Grundwassers bewirken, daß keine Anteile aus jährlichem Niederschlag in den Arealen dieser Pegel dem Grundwasser zusickern. Beim Pegel 0803 (Taf. 8) liegen ähnliche Verhältnisse vor. Bei einer ca. 5 m dicken Geschiebemergelschicht und eines Flurabstandes der Grundwasseroberfläche von rd. 15 m kann das Auftreten einer Jahresperiode nur auf die Einwirkungen der Eigenwasserversorgung einer nahegelegenen Brauerei zurückgeführt werden (s. Kap. 6.1.4). Dies erklärt auch die ca. 18-Monatsschwingung. Auch beim Pegel 0488, der auf der Niederterrasse liegt, spricht das gleichzeitige Vorhandensein von 12- und 18-Monatsschwingungen für Oberlagerungen aus künstlicher Beeinflussung.

Die übrigen Pegel, die ebenfalls falls alle auf der Niederterrasse liegen, haben Jahresperioden mit allerdings sehr geringen durchschnittlichen Amplituden von bis zu 5 cm. Die Oberdeckung des Aquifers in diesem Gebiet besteht größtenteils aus Auffüllungen verschiedenen Materials und einer fast vollständigen Versiegelung der Oberfläche durch dichte Bebauung und Verkehrsflächen. Da der Flurabstand des Grundwassers nur ca. 3 bis 7 m

GRUNDSPEKTRUM DER GANGLINIE 803

TRUNC. -P = 91 ANZAHL FREIHEITSGRADE = 220
 ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 10.6
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 11.9
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 14.7
 BANDBREITE TUKEY = 0.015
 BANDBREITE BARTLETT = 0.016
 BANDBREITE PARZEN = 0.020

| FREQ | PERI | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEND | 13.91 | 9.98 | 20.89 |
| 0.002 | 440.0 | 17.21 | 14.52 | 22.08 |
| 0.005 | 220.0 | 25.03 | 24.88 | 25.01 |
| 0.007 | 146.7 | 32.64 | 33.90 | 28.09 |
| 0.009 | 110.0 | 35.88 | 36.16 | 29.71 |
| 0.011 | 88.0 | 33.64 | 31.61 | 29.06 |
| 0.014 | 73.3 | 27.90 | 24.40 | 26.35 |
| 0.016 | 62.9 | 21.69 | 18.79 | 22.47 |
| 0.018 | 55.0 | 16.92 | 15.96 | 18.35 |
| 0.020 | 48.9 | 13.61 | 14.29 | 14.59 |
| 0.023 | 44.0 | 10.84 | 11.89 | 11.36 |
| 0.025 | 40.0 | 7.99 | 8.52 | 8.64 |
| 0.027 | 36.7 | 5.32 | 5.41 | 6.47 |
| 0.030 | 33.8 | 3.50 | 3.73 | 4.91 |
| 0.032 | 31.4 | 2.87 | 3.55 | 3.99 |
| 0.034 | 29.3 | 3.14 | 4.06 | 3.62 |
| 0.036 | 27.5 | 3.66 | 4.46 | 3.56 |
| 0.039 | 25.9 | 3.89 | 4.45 | 3.59 |
| 0.041 | 24.4 | 3.72 | 4.11 | 3.56 |
| 0.043 | 23.2 | 3.35 | 3.64 | 3.49 |
| 0.045 | 22.0 | 3.11 | 3.27 | 3.42 |
| 0.048 | 21.0 | 3.16 | 3.22 | 3.43 |
| 0.050 | 20.0 | 3.48 | 3.54 | 3.48 |
| 0.052 | 19.1 | 3.80 | 4.01 | 3.49 |
| 0.055 | 18.3 | 3.84 | 4.18 | 3.37 |
| 0.057 | 17.6 | 3.44 | 3.76 | 3.06 |
| 0.059 | 16.9 | 2.70 | 2.86 | 2.60 |
| 0.061 | 16.3 | 1.89 | 1.94 | 2.08 |
| 0.064 | 15.7 | 1.26 | 1.43 | 1.61 |
| 0.066 | 15.2 | 0.93 | 1.33 | 1.30 |
| 0.068 | 14.7 | 0.83 | 1.40 | 1.19 |
| 0.070 | 14.2 | 0.90 | 1.41 | 1.32 |
| 0.073 | 13.8 | 1.18 | 1.45 | 1.73 |
| 0.075 | 13.3 | 1.85 | 1.84 | 2.42 |
| 0.077 | 12.9 | 3.01 | 2.83 | 3.33 |
| 0.080 | 12.6 | 4.50 | 4.29 | 4.32 |
| 0.082 | 12.2 | 5.92 | 5.75 | 5.18 |
| 0.084 | 11.9 | 6.77 | 6.62 | 5.69 |
| 0.086 | 11.6 | 6.76 | 6.56 | 5.73 |
| 0.089 | 11.3 | 5.94 | 5.65 | 5.30 |
| 0.091 | 11.0 | 4.66 | 4.33 | 4.54 |
| 0.093 | 10.7 | 3.37 | 3.11 | 3.67 |
| 0.095 | 10.5 | 2.40 | 2.32 | 2.88 |
| 0.098 | 10.2 | 1.84 | 1.94 | 2.27 |
| 0.100 | 10.0 | 1.61 | 1.81 | 1.87 |
| 0.102 | 9.8 | 1.53 | 1.74 | 1.62 |
| 0.105 | 9.6 | 1.47 | 1.63 | 1.46 |
| 0.107 | 9.4 | 1.37 | 1.50 | 1.33 |
| 0.109 | 9.2 | 1.22 | 1.35 | 1.21 |



beträgt, ist die Abdichtung für das Fehlen einer Jahresperiode mit größeren Amplituden als den vorhandenen verantwortlich.

Abb.: 23: Spektrum der Grundwasserstandsganglinie 0803 (Abkürzungen siehe Abb. 16)

6.2.7 Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet B (Kreuzspektrum)

Die niedrigen Varianzen der einzelnen Grundwasserstandsganglinien, auf die schon im vorhergehenden Kapitel hingewiesen wurden, und auch die sehr niedrigen Kreuzkorrelationen aus der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5110) mit den Grundwasserstandsganglinien von maximal 0.2 lassen erwarten, daß kaum Zusammenhänge bestehen. Nur für zwei Fälle im Bereich der mehrjährigen Perioden konnte dies nachgewiesen werden. Es ergab sich (auf die 90-Monatsperiode und das BARTLETT-window — K.B; GRADB — bezogen):

| Reihe / Reihe | Kohärenz | Phase | die der Phase entsprechende Zeitverschiebung |
|---------------|----------|-------|--|
| 5110 / 0089 | 0.32 | 123° | ca. 30 Monate (Abb. 24) |
| 5110 / 0251 | 0.22 | 130° | ca. 30 " (Abb. 25) |

Die Ergebnisse der Kreuzspektralanalyse (Kohärenz- und Phasenspektrum) lassen Beziehungen zwischen der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5110) und den Grundwasserstandsganglinien nur bei den Mehrjahres-Perioden in den Arealen um die Pegel 0089 und 0251 erkennen. Die Kohärenzen zeigen einen niedrigen Grad der Übereinstimmung zwischen diesen Perioden an. Hieraus folgt, daß die Grundwasserstandsganglinien und die klimatische Wasserbilanz (Reihe 5110) nur eine geringe Kongruenz aufweisen. Neben dem großen Flurabstand der Grundwasser-oberfläche von rd. 20 m ist dies auf die den Aquifer überdeckende Geschiebemergelschicht zurückzuführen. Bei dieser kann davon ausgegangen werden, daß sie nicht durchgehend vorhanden ist.

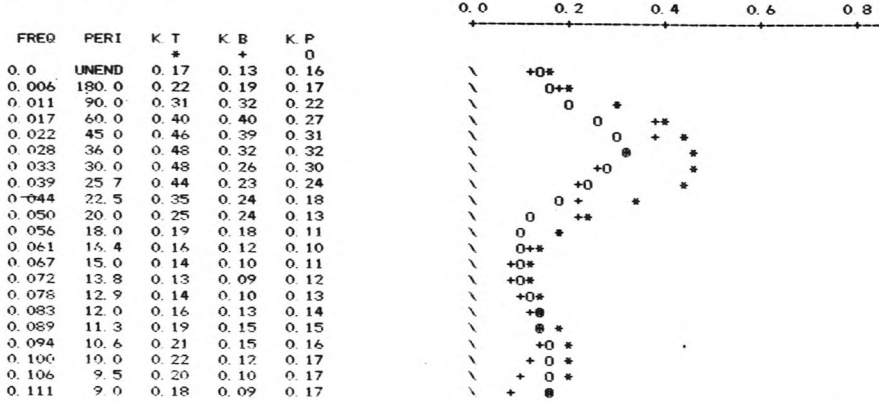
KREUZSPEKTREN AUS DEN REIHEN 5110 UND 0089

TRUNC -P. = 30 ANZAHL FREQUENZEN= 90

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 26.1
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 29.3
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 36.3

BANDBREITE TUKEY = 0.049
 BANDBREITE BARTLETT = 0.056
 BANDBREITE PARZEN = 0.069

KOHÄRENZSPEKTRUM



PHASENSPEKTRUM

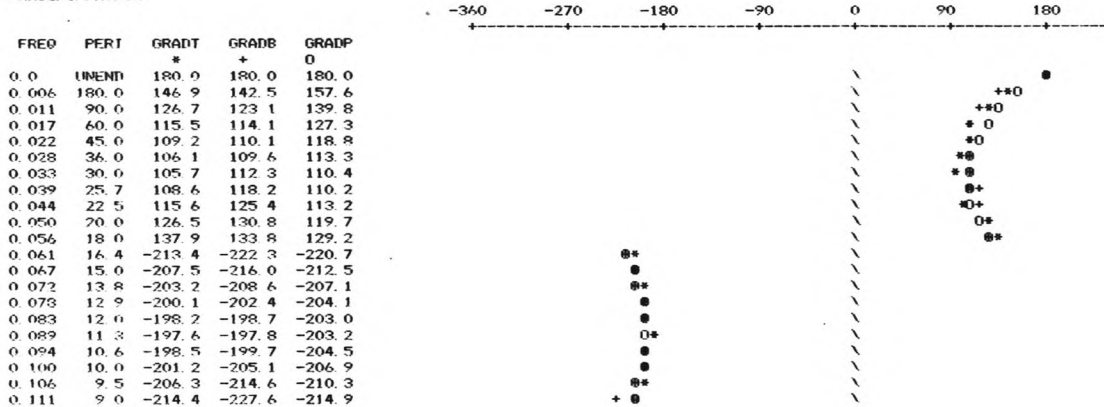


Abb. 24: Kohärenz- und Phasenspektrum der Reihen 5110 / 0089 (Gebiet B)
 (Abkürzungen siehe Abb. 20)

6.2.8 Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet B

Zur Abschätzung der Grundwasserneubildungsrate in den Arealen der beiden Pegel wird analog wie im Kap. 6.2.5 vorgegangen. Es läßt sich bei der Ganglinie 0089 und der im gleichen Zeitraum liegenden mehrjährigen Schwingung eine relativ schwache Amplitude von etwa 13 cm erkennen. Im Vergleich mit dem Gebiet A ergibt sich hier eine Wassermenge von ca. 90 mm, die in 2 bis 2,5 Jahren dem Aquifer zusickert.

Die Amplitude der Jahresperiode in den Ganglinien wurde zu max. 5 cm berechnet, ist also sehr gering. Das Kreuzspektrum ließ auch keine Beziehungen zur klimatischen Wasserbilanz erkennen. Unter der Annahme, daß diese Amplituden durch Niederschläge hervorgerufen werden, können hierfür nur versickernde Niederschlagsanteile in Grünflächen in Frage kommen. Die Grünflächen in diesem Gebiet machen nicht mehr als ca. 15% der Fläche dieses Gebietes aus.

Festzuhalten bleibt für das Gebiet B, daß durch die Versiegelung der Erdoberfläche eine Grundwasserneubildung durch Niederschläge weitgehend unterbunden wird. Eine Erneuerung findet hauptsächlich durch den aus südlicher Richtung dem Spreetal zufließenden Grundwasserstrom (Taf. 1) und durch infiltrierendes Wasser aus den Oberflächengewässern statt (Kap. 6.1.4).

KREUZSPEKTREN AUS DEN REIHEN 5110 UND 251

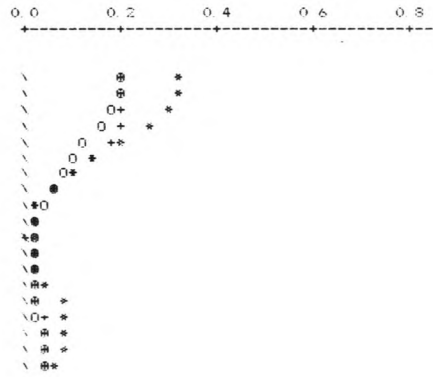
TRUNC -P = 30 ANZAHL FREQUENZEN= 90

ANZAHL FREIHEITSGRAD TUKEY = 41.4
 ANZAHL FREIHEITSGRAD BARTLETT = 46.6
 ANZAHL FREIHEITSGRAD PARZEN = 57.6

BANDBREITE TUKEY = 0.078
 BANDBREITE BARTLETT = 0.088
 BANDBREITE PARZEN = 0.109

KOHÄRENZSPEKTRUM

| FREQ | PERI | K T | K B | K P |
|-------|-------|------|------|------|
| 0.0 | UNEND | 0.33 | 0.22 | 0.21 |
| 0.006 | 130.0 | 0.33 | 0.22 | 0.21 |
| 0.011 | 90.0 | 0.31 | 0.22 | 0.19 |
| 0.017 | 60.0 | 0.27 | 0.21 | 0.16 |
| 0.023 | 45.0 | 0.22 | 0.19 | 0.13 |
| 0.028 | 36.0 | 0.16 | 0.16 | 0.11 |
| 0.033 | 30.0 | 0.11 | 0.11 | 0.08 |
| 0.039 | 25.7 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 0.044 | 22.5 | 0.04 | 0.03 | 0.05 |
| 0.050 | 20.0 | 0.03 | 0.02 | 0.04 |
| 0.056 | 18.0 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| 0.061 | 16.4 | 0.03 | 0.02 | 0.03 |
| 0.067 | 15.0 | 0.04 | 0.03 | 0.03 |
| 0.072 | 13.8 | 0.06 | 0.03 | 0.03 |
| 0.078 | 12.9 | 0.08 | 0.04 | 0.03 |
| 0.083 | 12.0 | 0.09 | 0.04 | 0.04 |
| 0.089 | 11.3 | 0.09 | 0.05 | 0.04 |
| 0.094 | 10.6 | 0.08 | 0.05 | 0.05 |
| 0.100 | 10.0 | 0.07 | 0.05 | 0.05 |



PHASENSPEKTRUM

| FREQ | PERI | GRADT | GRADB | GRADP |
|-------|-------|--------|--------|--------|
| 0.0 | UNEND | 180.0 | 180.0 | 180.0 |
| 0.006 | 130.0 | 155.4 | 155.1 | 155.3 |
| 0.011 | 90.0 | 130.8 | 130.2 | 130.5 |
| 0.017 | 60.0 | 106.0 | 105.3 | 105.6 |
| 0.023 | 45.0 | 81.0 | 80.4 | 80.5 |
| 0.028 | 36.0 | 55.5 | 55.2 | 55.1 |
| 0.033 | 30.0 | 29.3 | 29.5 | 29.3 |
| 0.039 | 25.7 | 1.6 | 2.4 | 2.9 |
| 0.044 | 22.5 | -28.5 | -27.4 | -24.1 |
| 0.050 | 20.0 | -61.7 | -61.7 | -52.0 |
| 0.056 | 18.0 | -97.2 | -98.5 | -80.5 |
| 0.061 | 16.4 | -131.5 | -131.4 | -109.4 |
| 0.067 | 15.0 | -161.0 | -157.6 | -138.3 |
| 0.072 | 13.8 | -185.8 | -179.6 | -166.5 |
| 0.078 | 12.9 | -207.5 | -200.1 | -193.6 |
| 0.083 | 12.0 | -227.8 | -220.3 | -219.4 |
| 0.089 | 11.3 | -247.6 | -240.4 | -244.1 |
| 0.094 | 10.6 | -267.5 | -240.5 | -268.0 |
| 0.100 | 10.0 | -287.5 | -280.4 | -291.2 |

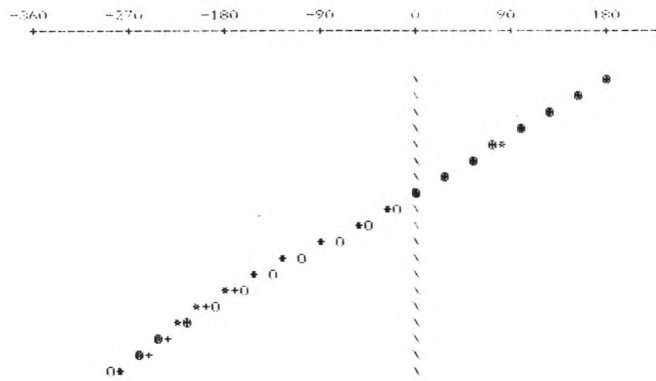


Abb. 25: Kohärenz- und Phasenspektrum der Reihen 5110 / 0251 (Gebiet B)
 (Abkürzungen siehe Abb. 20)

6.2.9 Grundwasserstandsganglinien des Gebietes C (Lichtenrade)

Die Analyse der Grundwasserstandsganglinien ergab fast identische Spektraldichtefunktionen. Läßt man die Ganglinie 0083 wegen ihrer geringen Länge und die Ganglinien 0126 und 0217 wegen ihrer Inhomogenitäten außer acht (s. Kap. 6.1.5), so ergeben die restlichen Ganglinien folgendes Bild:

| Ganglinie Nr. | Periode in Monaten | | Tiefe der Grundwasser- oberfläche unter Flur in m (Mittelwert) | Amplitude der Jahres- schwungung in m |
|---------------|--------------------|--------------|--|---|
| | Hauptperiode | Nebenperiode | | |
| 0085 | 60 - 80 | 12 (schwach) | ca. 5.70 | 0.15 |
| 0086 | 60 - 80 | 12 (") | ca. 7.60 | 0.13 |
| 0124 | 70 | 12 | ca. 4.30 | 0.18 |
| 0125 | 60 | 12 | ca. 4.00 | 0.21 |
| 0127 | 70 | 12 | ca. 5.80 | 0.20 |
| 0129 | 70 | 12 | ca. 3.00 | 0.20 |
| 0173 | 60 | 12 | ca. 3.80 | 0.19 |

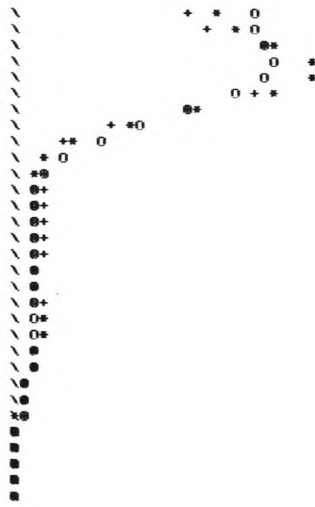
Tab. 3: Ergebnis der Spektralanalyse von Grundwasserstandsganglinien aus dem Gebiet C

AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 85

TRUNC -P. = 50 ANZAHL FREQUENZEN= 120
 ANZAHL FREIHEITSGRADU TUKEY = 14.1
 ANZAHL FREIHEITSGRADU BARTLETT = 15.8
 ANZAHL FREIHEITSGRADU PARZEN = 19.6

BANDBREITE TUKEY = 0.027
 BANDBREITE BARTLETT = 0.030
 BANDBREITE PARZEN = 0.037

| FREQ | PERJ | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEVD | 21.74 | 18.24 | 25.33 |
| 0.004 | | 23.41 | 20.74 | 25.83 |
| 0.008 | | 27.87 | 26.40 | 26.89 |
| 0.013 | | 31.44 | 31.02 | 27.44 |
| 0.017 | | 31.47 | 31.07 | 26.45 |
| 0.021 | | 27.13 | 25.99 | 23.50 |
| 0.025 | | 19.85 | 18.14 | 19.00 |
| 0.029 | | 12.22 | 10.78 | 13.94 |
| 0.033 | | 6.40 | 5.98 | 9.37 |
| 0.037 | | 3.17 | 3.85 | 5.98 |
| 0.042 | | 2.07 | 3.29 | 3.91 |
| 0.046 | | 2.09 | 3.24 | 2.92 |
| 0.050 | | 2.40 | 3.22 | 2.58 |
| 0.054 | | 2.62 | 3.20 | 2.56 |
| 0.058 | | 2.69 | 3.18 | 2.63 |
| 0.063 | | 2.69 | 3.10 | 2.72 |
| 0.067 | | 2.72 | 2.97 | 2.80 |
| 0.071 | | 2.81 | 2.91 | 2.88 |
| 0.075 | | 2.96 | 3.03 | 2.92 |
| 0.079 | | 3.08 | 3.23 | 2.89 |
| 0.083 | | 3.02 | 3.24 | 2.76 |
| 0.088 | | 2.72 | 2.89 | 2.51 |
| 0.092 | | 2.23 | 2.29 | 2.16 |
| 0.096 | | 1.70 | 1.71 | 1.76 |
| 0.100 | | 1.25 | 1.35 | 1.38 |
| 0.104 | | 0.92 | 1.15 | 1.05 |
| 0.108 | | 0.69 | 0.96 | 0.78 |
| 0.112 | | 0.49 | 0.72 | 0.57 |
| 0.117 | | 0.32 | 0.48 | 0.41 |
| 0.121 | | 0.20 | 0.35 | 0.31 |
| 0.125 | | 0.17 | 0.35 | 0.26 |



AUTOSPEKTRUM DER GANGLINIE 129

TRUNC -P. = 47 ANZAHL FREQUENZEN= 120
 ANZAHL FREIHEITSGRADU TUKEY = 12.3
 ANZAHL FREIHEITSGRADU BARTLETT = 13.8
 ANZAHL FREIHEITSGRADU PARZEN = 17.1

BANDBREITE TUKEY = 0.028
 BANDBREITE BARTLETT = 0.032
 BANDBREITE PARZEN = 0.040

| FREQ | PERJ | SP. T | SP. B | SP. P |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | * | + | 0 |
| 0.0 | UNEVD | 14.96 | 12.11 | 18.04 |
| 0.004 | | 16.38 | 14.13 | 18.43 |
| 0.008 | | 19.73 | 18.78 | 19.30 |
| 0.013 | | 22.85 | 22.89 | 19.95 |
| 0.017 | | 23.62 | 23.69 | 19.63 |
| 0.021 | | 21.23 | 20.57 | 17.97 |
| 0.025 | | 16.40 | 15.07 | 15.12 |
| 0.029 | | 10.85 | 9.56 | 11.66 |
| 0.033 | | 6.22 | 5.65 | 8.31 |
| 0.037 | | 3.32 | 3.65 | 5.62 |
| 0.042 | | 2.09 | 2.98 | 3.83 |
| 0.046 | | 1.88 | 2.89 | 2.86 |
| 0.050 | | 2.05 | 2.95 | 2.51 |
| 0.054 | | 2.25 | 3.01 | 2.58 |
| 0.058 | | 2.49 | 3.05 | 2.96 |
| 0.063 | | 2.99 | 3.23 | 3.61 |
| 0.067 | | 3.98 | 3.81 | 4.49 |
| 0.071 | | 5.45 | 5.03 | 5.49 |
| 0.075 | | 7.06 | 6.70 | 6.40 |
| 0.079 | | 8.24 | 8.14 | 6.97 |
| 0.083 | | 8.49 | 8.55 | 7.02 |
| 0.088 | | 7.62 | 7.56 | 6.49 |
| 0.092 | | 5.93 | 5.58 | 5.52 |
| 0.096 | | 4.00 | 3.52 | 4.32 |
| 0.100 | | 2.43 | 2.13 | 3.17 |
| 0.104 | | 1.49 | 1.59 | 2.24 |
| 0.108 | | 1.10 | 1.53 | 1.60 |
| 0.112 | | 1.00 | 1.48 | 1.20 |
| 0.117 | | 0.93 | 1.26 | 0.97 |
| 0.121 | | 0.81 | 0.97 | 0.83 |
| 0.125 | | 0.67 | 0.80 | 0.73 |
| 0.129 | | 0.57 | 0.77 | 0.66 |
| 0.133 | | 0.55 | 0.79 | 0.62 |
| 0.138 | | 0.56 | 0.76 | 0.61 |

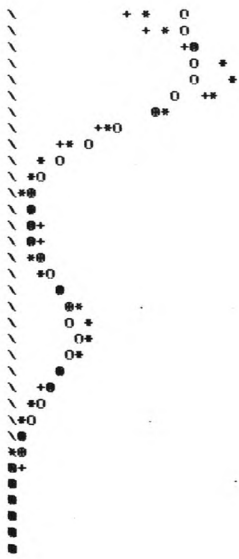


Abb. 26: Spektren der Grundwasserstandsganglinien 0085 und 0129 (Abkürzungen siehe Abb. 16)

Die Abb. 26 vermittelt einen Eindruck vom frequenziellen Verhalten der Grundwasser- oberfläche dieses Gebietes. Alle Spektren zeigen eine vorherrschende Mehrjahres- Periode von 60 - 80 Monaten Dauer und eine relativ ausgeprägte Jahresperiode. Die Amplituden der Jahresperiode der Ganglinien 0085 und 0086 — sie stammen von näher zum Spreetal gelegenen Pegeln — sind nicht so groß wie die entsprechenden Amplituden der Ganglinien aus dem südlichen Teil des Gebietes C (Taf. 1). Insgesamt gesehen verhält sich aufgrund der doch weitgehend übereinstimmenden Spektren die Grundwasser- oberfläche im Gebiet C einheitlich. Die Bohrprofile der Meßstellen dieses auf der Teltow-Hochfläche liegenden Gebietes (Taf. 9,10) lassen eine generelle lithologische Abfolge erkennen: Fein- bis Mittelsande werden von einer bis zu 20 m mächtigen Deckschicht aus Grundmoränenmaterial überlagert, die nach dem heutigen Erkenntnisstand im betrachteten Gebiet als durchgehend vorhanden angenommen werden kann. Im Gegensatz zum nördlichen Gebiet A, in dem die Grundmoränenabdeckung sehr gestört ist, bildet sie hier eine den Aquifer abdeckende Schicht.

Der Schwankungsbereich der Grundwasser- oberfläche liegt — bis auf den Pegel 0125 — bei allen anderen Pegeln in der Geschiebemergel- bzw. -lehmschicht, so daß angenommen werden kann, daß in diesem Gebiet fast durchweg ein gespannter Aquifer vorliegt. Diese Folgerung wird unterstützt durch die häufig gemachte Beobachtung, daß beim Abteufen von Pegelrohren und dem Erbohren des Aquifers das Wasser im Rohr ansteigt (freundl. mündl. Mitteilung von Herrn Schneemann, Sen. f. Bau- und Wohnungswesen). Die aufgezeichneten Ganglinien spiegeln daher die Bewegungen der freien Grundwasser- oberfläche im Nährgebiet wider. Die Reaktion der Grundwasser- oberfläche auf die Niederschlagsereignisse werden — ähnlich wie bei dem Pegel 0151 im Gebiet A — innerhalb des gespannten Aquifers ohne Veränderung zu den Meßstellen geleitet

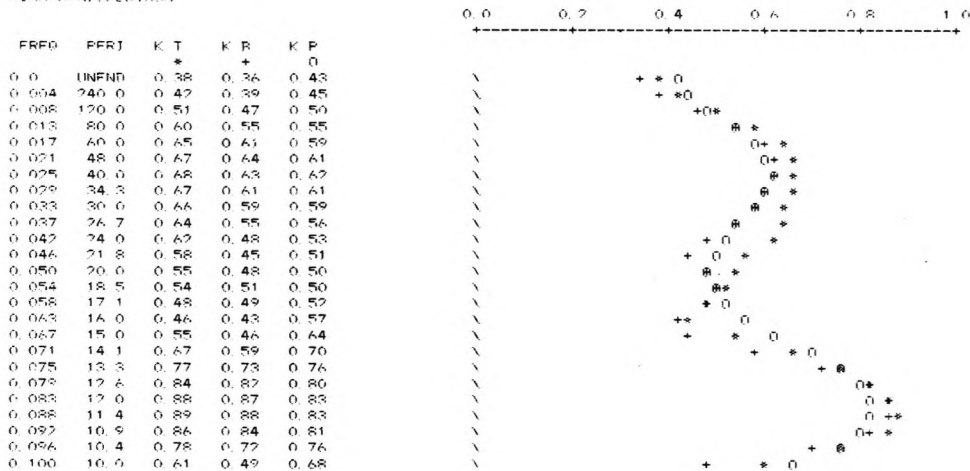
KOHÄRENZSPEKTREN AUF DEN REIHEN 5210 UND 0129

TRUNC = 50 ANZAHL FREQUENZEN= 120

ANZAHL FREIHEITSGRADE TUKEY = 12 8
 ANZAHL FREIHEITSGRADE BARTLETT = 14 4
 ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = 17 8

BANDBREITE TUKEY = 0.030
 BANDBREITE BARTLETT = 0.033
 BANDBREITE PARZEN = 0.041

KOHÄRENZSPEKTNUM



PHASENSPEKTNUM

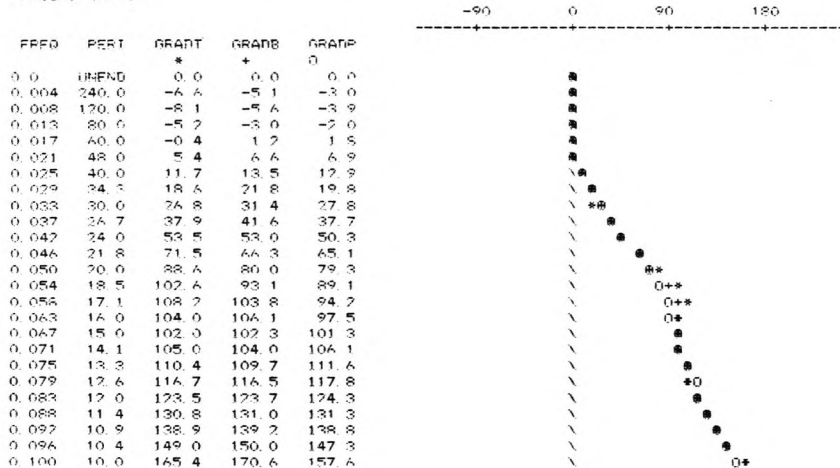


Abb. 27: Kohärenz- und Phasenspektrum der Reihen 5210 / 0129 (Gebiet C)
 (Abkürzungen siehe Abb. 20)

und dort registriert. Die Lage des Nährgebietes wird südlich des Gebietes C in Richtung Osdorf- Mahlow- Waßmannsdorf zu vermuten sein. In dieser Gegend — im Anstieg zur Teltow-Hochfläche — stehen sandige Lockersedimente bis zu Tage an (GELLERT & SCHOLZ, 1970).

6.2.10 Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Gebiet C (Kreuzspektrum)

Die Kreuzspektralanalyse weist auf eine gute Übereinstimmung zwischen der klimatischen Wasserbilanz (Reihe 5210) und den einzelnen Grundwasserstandsganglinien hin. Die Abb. 27 gibt — stellvertretend für alle anderen

Spektren — einen Eindruck von dem Funktionsverlauf der Kohärenz- und Phasenspektren. Bei der Jahresperiode bestehen folgende Kohärenzen und Phasen:

| Reihe / Reihe | Kohärenz | Phase | die der Phase entsprechende Zeitverschiebung |
|---------------|----------|------------------|--|
| 5210 / 0085 | 0.70 | 136 ⁰ | |
| " / 0086 | 0.70 | 188 ⁰ | |
| " / 0124 | 0.86 | 104 ⁰ | |
| " / 0125 | 0.86 | 151 ⁰ | Mittelwert: ca. 4 - 5 Monate |
| " / 0127 | 0.89 | 159 ⁰ | |
| " / 0129 | 0.87 | 123 ⁰ | |
| " / 0173 | 0.91 | 100 ⁰ | |

Für die Mehrjahres- Periode können die Ergebnisse der Kohärenz- und der Phasenspektren in einer Aussage zusammengefaßt werden, weil die jeweiligen Funktionswerte eine gute Übereinstimmung zeigen. Auf die 60- Monatsperiode bezogen liegen die Kohärenzen zwischen 0.5 (Reihen 5210 / 0124) und 0.6 (Reihen 5210 / 0085) und die Phasen bei $\approx 0^0$. Eine zeitliche Verzögerung der Reaktion der Grundwasseroberfläche ist bei den mehrjährigen Perioden nicht vorhanden bzw. wird sich nur im Rahmen weniger Monate halten.

6.2.11 Ermittlung der Grundwasserneubildung im Gebiet C

Bei dem hier betrachteten Aquifer ist eine Grundwasserneubildung durch gleichmäßig über dem Gebiet versickernde Niederschlagsanteile weitgehend auszuschließen (vergl. Kap. 6.2.8). Der Niederschlag in diesem weiträumig bebauten Gebiet (Gartenstadt) sammelt sich — soweit er nicht durch Dach- und befestigte Flächen dem Kanalnetz zugeleitet wird — als flurnahes freies Grundwasser über der Geschiebemergelschicht und tritt z.B. bei Baugruben in geringer Tiefe in Erscheinung. Dieses Grundwasser nimmt durch seine flurnaher Lage viel stärker am Austauschprozeß zwischen Luft- und Bodenfeuchte teil, so daß nur ein geringer Rest an günstigen Stellen (Auskeilen der wasserstauenden Schicht, Störungen e.t.c.) dem tieferliegenden Aquifer zusickert.

Die in diesem Gebiet gemessenen Grundwasserhöhen stellen die Druckzustände des durch die Geschiebemergelschicht überlagerten Aquifers dar.

Im Süden von Berlin, in dem auch das Nährgebiet angenommen wird, liegen ausgedehnte Rieselfelder. Angaben über Zeiten und Mengen der Beschickung mit Abwasser sind nicht zu erhalten, da die Rieselfelder außerhalb von Berlin (W) liegen. Z.Zt. ist es so, daß die Hauptmenge des Abwassers im Umkreis der Klärwerke Stahnsdorf und Waßmannsdorf verrieselt wird (freundl. mündl. Mitteilung von Herrn Fräger, Berliner Entwässerungswerke). Das Gebiet Lichtenrade wird von diesen Beeinflussungen weniger tangiert, so daß die Grundwasserstandsganglinien vorwiegend die Reaktionen des Aquifers im Nährgebiet infolge des klimatischen Geschehens anzeigen. Detaillierte Unterlagen über den geologischen Aufbau des Nährgebietes sind ebenfalls nicht zu erlangen und daher ist eine genauere Abschätzung der Grundwasserneubildung im Nährgebiet nicht möglich.

6.3 Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen

Untersuchungen langer Grundwasserstandsganglinien und klimatologischer Beobachtungsreihen zur Erforschung von Gesetzmäßigkeiten im Grundwasserverhalten wurden schon häufiger durchgeführt. Zum Vergleich sei auf folgende Arbeiten verwiesen.

GRAHMANN (1943) untersuchte 22-jährige Grundwasserstandsganglinien, die von Pegeln aus pleistozänen Sanden und Kiesen Sachsens stammen. Er kam u.a. zu der Auffassung, daß bei einem Flurabstand der Grundwasseroberfläche von 4 m und mehr eine Jahresperiode nicht mehr zu erkennen ist.

UBELL (1961) untersuchte den Grundwassergang in Flachlandgebieten der ungarischen Tiefebene und stellte fest, daß " unter den klimatischen Verhältnissen der ungarischen Tiefebene Grundwasserstandsänderungen als Folgen einsickernden Niederschlagswassers nur bis 7 bis 10 m Grundwasserspiegeltiefe möglich sind. Falls der Grundwasserspiegel tiefer liegt, verursacht die vertikale Feuchtigkeitsbewegung lediglich Änderungen im Wasserhaushalt der Deckschicht; der Grundwasserspiegel bleibt dagegen auch über größere Zeiträume hin unverändert."

DENNER (1965) analysierte die Beziehungen zwischen Grundwasser und Niederschlägen mit Hilfe statistischer Ansätze bei 100-jährigen Reihen und kommt zu dem Ergebnis, daß zwischen den Grundwasserstands- und Niederschlags-

schwankungen ein Gleichlauf weitgehend vorhanden ist. Ein zeitlich gleichmäßiger Rhythmus in mehrjährigen Schwankungen ist jedoch nicht nachzuweisen.

BÜTOW (1975) untersuchte mittels Periodogrammanalyse Grundwasserstandsganglinien von einzelnen Pegeln in Berlin (W) und errechnete beim Pegel 1614, dessen Grundwasseroberfläche ca. 13 m unter Flur ansteht, bei der Jahresperiode eine Amplitude von ca. 23 cm, die er auf infiltrierenden Niederschlag zurückführt. Bei anstehendem Fein- bis Mittelsand steht diese Aussage im Gegensatz zu den in Kap. 6.2.3 ermittelten Ergebnissen. Es ist für die Jahresperiode und die große Amplitude auch eine andere Erklärung denkbar: der Pegel steht nur rd. 1500 m von den Brunnengalerien Schildhorn und Rupenhorn des Wasserwerks Tiefwerder entfernt und daher könnte der Pegel im Absenkungstrichter dieser Brunnengalerien stehen. Da die Grundwasserentnahme jahreszeitlich schwankt, kann eine künstlich erzeugte Jahresperiode mit großer Amplitude die Grundwasserstandsganglinie dieses Pegels geprägt haben.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurden Grundwasserstandsganglinien und klimatologische Datenreihen aus drei Gebieten von Berlin (West) analysiert. Die einzelne Grundwasserstandsganglinie wurde in eine die Instationarität darstellende Funktion und in Periodizitäten aufgespalten. Die Trendfunktionen zeigen dabei die langfristige Bewegungsrichtung der Grundwasseroberfläche an. Es konnte nachgewiesen werden, daß im Gebiet A (Tegeler Forst-Frohnau- Hermsdorf) im nord-östlichen Teil keine und im süd-westlichen Teil eine geringe Absenkungstendenz von ca. 2,5 cm/a bis 4 cm/a vorhanden ist.

Eine Grundwasserabsenkung von ca. 3 cm/a im Gebiet B (Neukölln) war bis etwa 1965 vorhanden. Danach trat ein Beharrungszustand ein, der auf Infiltration aus den Oberflächengewässern zurückgeführt werden kann.

Durch die Spektralanalyse werden die in den Grundwasserstandsganglinien vorhandenen Schwingungen verdeutlicht und quantifiziert. Es ergaben sich zwei Periodenbereiche. Vorherrschend in den Grundwasserstandsganglinien sind lange Perioden von etwa 60 - 80 Monaten Dauer. Diese werden überlagert von Jahresperioden. Für letztere deutet sich (im Gebiet A) eine Abhängigkeit vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche an. Ab etwa ≥ 8 m Flurabstand dürfte eine Jahresschwingung im Feinsand nicht mehr nachzuweisen sein, d.h., daß die hangenden Schichten den gesamten durchschnittlichen jährlichen Anteil aus versickernden Niederschlägen auffangen. Der Nachweis über den Grad der Korrelation zwischen den Perioden von Grundwasserstandsganglinien und klimatischer Wasserbilanz wird mit Hilfe der Kreuzspektralanalyse (Kohärenz- und Phasenspektrum) geführt. Das Kohärenzspektrum weist sowohl für die Mehrjahres- als auch für die Jahresperiode eine relativ hohe Übereinstimmung nach. Während für die Jahresperiode der Zusammenhang ohne weiteres erkennbar ist, ergibt er sich für die Mehrjahresperiode aus den über oder unter dem langzeitlichen Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz liegenden Differenzen.

Das Phasenspektrum zeigt die Zeitdifferenz zwischen gleichen Perioden in der klimatischen Wasserbilanz und den Grundwasserstandsganglinien. Sie beträgt im Gebiet A für die Jahresperiode und abhängig vom Flurabstand ca. 2 - 6 Monate und für die Mehrjahres-Periode ca. 17 - 22 Monate.

Die Anteile der Grundwasserneubildung wurden mit Hilfe sinusoidaler Größen und der ermittelten durchschnittlichen Amplitude der Jahresschwingung bzw. über eine Eichung bei den Mehrjahresschwingungen ermittelt. Dabei ergibt sich für das Gebiet A ein Betrag von maximal 104 mm/a im Bereich der Jahresperiode und des geringsten Flurabstandes. Ca. 280 mm sickerten im Zeitraum 1961 - 1963 im gesamten Gebiet dem tieferen Aquifer zu. Im Gebiet B verhindert weitgehend eine versiegelte Oberfläche und im Gebiet C eine durchgehende Geschiebemergelschicht die Versickerung von Niederschlägen.

Zur Methode der Spektralanalyse:

Von den bei der Spektralanalyse angewandten Gewichtsfunktionen nach TUKEY, nach BARTLETT und nach PARZEN lieferten die ersten beiden meistens die übereinstimmenderen Spektren. Bei der TUKEY-Funktion traten verschiedentlich negative Funktionswerte auf. In den hier interessierenden Frequenzbereichen machte sich das jedoch nicht störend bemerkbar, so daß die Gewichtsfunktionen nach BARTLETT und nach TUKEY zur Analyse von Grundwasserstandsganglinien geeignet sind.

Das durchschnittliche Verhalten eines Grundwasserkörpers bzw. seiner Grundwasseroberfläche wird umso besser

wiedergegeben, je länger die Beobachtungsdauer ist. Daraus folgt, daß auch für Grundwasserbilanzierungen, bei denen nur über kurze Zeiten Messungen der Grundwasserstände vorliegen, eine Abschätzung zum langzeitlichen Mittelwert gemacht werden sollte. Dies kann z.B. über die klimatische Wasserbilanz geschehen, weil meteorologische Aufzeichnungen meistens über längere Zeiten vorhanden sind.

Zukünftige Untersuchungen sollen die vorliegenden Ergebnisse und Beziehungen bestätigen und weiter aufklären. Dazu ist die Analyse von weiteren Grundwasserstandsganglinien verschiedener Grundwasserkörper notwendig. Daneben sind auch Varianten der Analysenmethode auf ihre Aussagefähigkeit bei hydrogeologischen Problemen zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß es erst wenig Literatur gibt, die auf praktische Belange bezogene Zeitreihenanalyse ausführlich behandelt. Dies gilt im besonderen Maße für Untersuchungen im Bereich des Kreuzspektrums.

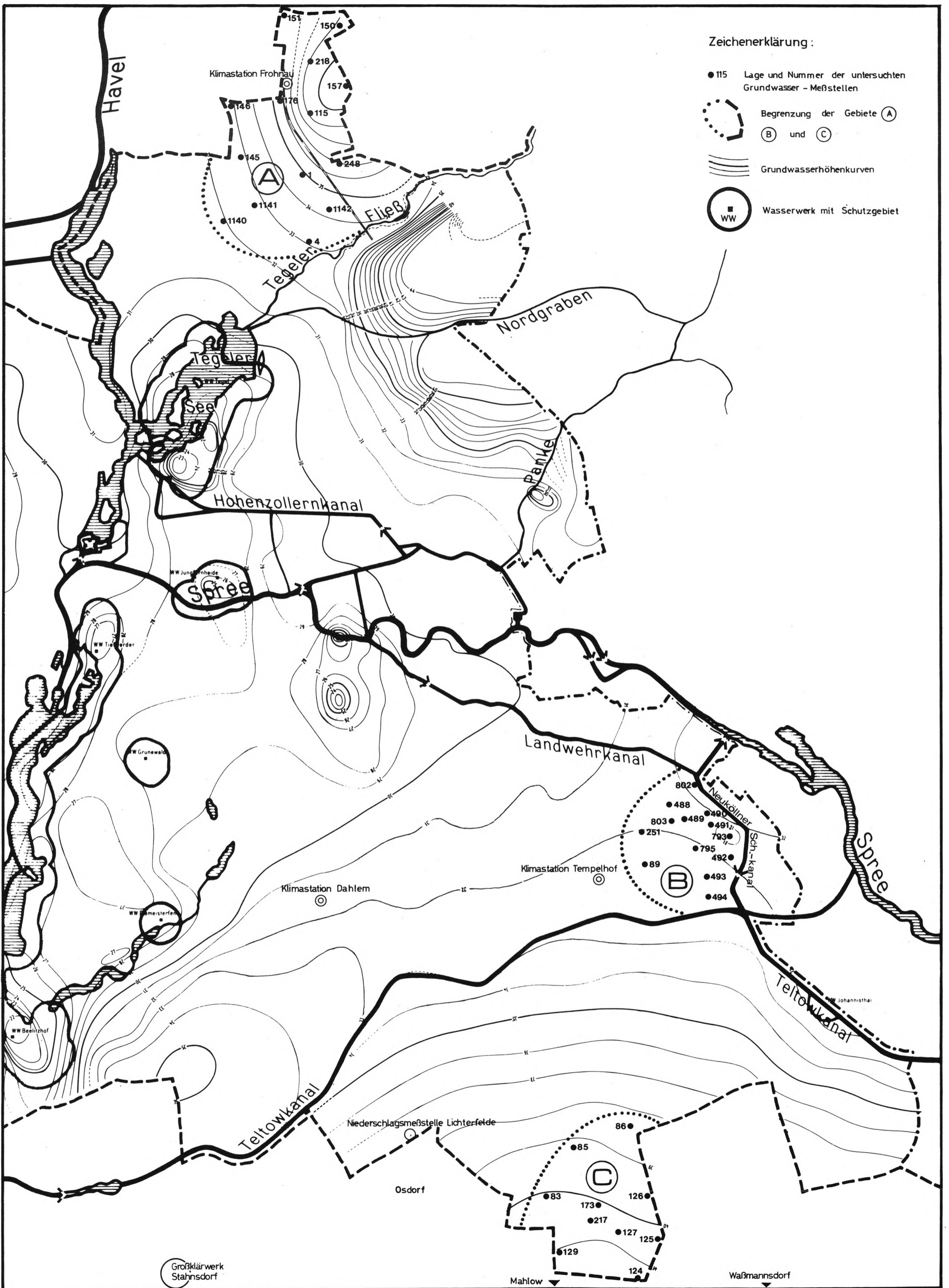
In einem anschließenden Vorhaben untersucht der Verfasser die Möglichkeit, mit Hilfe stochastischer Methoden Unterscheidungsmerkmale verschiedener Grundwasserstockwerke zu bestimmen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- AEG-TELEFUNKEN INFORMATION SYSTEMS DIVISION (1971): TR 440 Time-sharing computing system -Introduction, Konstanz
- ANDERSON, O. (1923): Ober ein neues Verfahren bei Anwendung der "Variate-Difference"-Methode. -Ausgewählte Schriften, 1, 12-27, Tübingen 1963
- " (1926,1927): Ober die Anwendung der Differenzenmethode (variate difference method) bei Reihenausgleichungen, Stabilitätsuntersuchungen und Korrelationsmessungen. - Ausgewählte Schriften, 1, 39-100, Tübingen 1963
- ASSMANN, P. (1957): Der geologische Aufbau der Gegend von Berlin. - 142 S., Der Senator f. Bau- und Wohnungswesen, Berlin 1974
- BIRKENFELD, W. (1973): Zeitreihenanalyse bei Feedback-Beziehungen. - Arbeiten z. angew. Statistik, 16, 103 S., Würzburg
- " (1975): Zur Schätzung von Spektren aus kurzen Zeitreihen. - Diskussionsarbeiten, H. 6, Inst. f. Quantitative Ökonomik und Statistik, Freie Univ. Berlin
- BLACKMANN, R.B. & TUKEY, J.W. (1959): The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. - 190 s., New York
- BLOOMFIELD, P. (1976): Fourier analysis of time series. - 258 S., New York
- BOX, G.E.P. & JENKINS, G.M. (1970): Time series analysis - forecasting and control. - 553 S., San Francisco
- BRIECHLE, D. (1971): Beitrag zur mathematischen Berechnung der Grundwasser-Neubildung und zweidimensionaler Strömung in sandigen und kiesigen Aquifern. - Diss. Techn. Univ. Hannover, Hannover
- BROHL, H., BÖTOW, E & PRELLER, C. (1977): Zur Abschätzung gewinnbarer Grundwassermengen aufgrund mathematischer Analysen von Grundwasserstandsganglinien in Teilgebieten von Berlin (W). Z. dt. geol. Ges., 128, 393-140, Hannover
- BÖTOW, E.(1976): Zeitreihenanalyse und Simulation von Grundwasserstandsganglinien in Berlin (W) zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. - Diss. Freie Univ. Berlin
- BURRE, O. (1960): Untersuchungen über die Berechnungen der dem Grundwasser zugehenden Wassermengen aus den Bewegungen des Grundwasserspiegels. - Abh. hess. L.-Amt f. Bodenforschung, 30, Wiesbaden
- COOLEY, J.W. & TUKEY, J.W. (1965): An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. - Math. Comput., 19, 297-301
- DAMMAN, W. (1965): Meteorologische Verdunstungsmessung, Näherungsformeln und die Verdunstung in Deutschland. - Wasserwirtschaft, 55, 10, 315-321, Stuttgart
- DAVIS, J.C. (1973): Statistics and data analysis in Geology. - 550 S., New York
- DAVIS, S.N. & DE WIEST, R.J.M. (1967): Hydrogeology. - 463 S., New York
- DENNER, J. (1934): Die wasserwirtschaftliche Bedeutung der künstlichen Anreicherung des Grundwassers unter besonderer Berücksichtigung der Wasserwirtschaft Groß-Berlins. - Gas- u. Wasserfach, 77, 24, 413-415, 25, 429-433, 26, 444-447, 27, 462-467, München
- " (1947): Der Grundwasserstand als Spiegelbild der Entwicklung und Wirtschaftslage Berlins - Beitrag zur Untersuchung der Grundwasserhältnisse Groß-Berlins. - Technik, 2, 2, 59-62, Berlin
- " (1958): Zum Grundwasser-Berlins. - Dt. Gewässerkl. Mitt., Sonderheft 1958, 13-22, Koblenz
- " (1965): Untersuchung der Gesetzmäßigkeit in den Beziehungen zwischen Grundwasser und Niederschlag in längeren Zeitspannen und der Möglichkeit einer Grundwasserstandsvorhersage unter besonderer Berücksichtigung der Trockenperioden. - Dt. Gewässerkl. Mitt., 9, 4, 73-84, Koblenz
- DENNER, J. & MÜSENTHIN, F. (1938): Die Grundwasserhältnisse in Berlin-Innenstadt seit 1870. - Dt. Wasserwirtschaft, 33, 1, 3-11, Stuttgart
- DER SENATOR FÜR BAU- UND WOHNUNGSWESEN, BERLIN: Gewässerkundlicher Jahresbericht des Landes Berlin. - Abflußjahr 1972, 1973, 1974, 1975, 1976
- EDGE, B.L. & LIU, P.C. (1970): Comparing power spectra computed by Blackman - Tukey and Fast Fourier Transform. - Water Resources Res., 6, 6, 1601-1610, Washington
- FREY, W. (1975): Zum Tertiär und Pleistozän des Berliner Raumes. - Z. dt. geol. Ges., 126, 281-292, Hannover
- GELLERT, J.F. & SCHOLZ, E. (1970): Geomorphologische Übersichtskarte 1:200 000 Berlin-Potsdam / Frankfurt-Eberswalde, Gotha/Leipzig
- GRAHMANN, K.R. (1943): Schwankungen der Grundwasserspiegel im Lande Sachsen während der Jahre 1920 bis 1942. Braunk. - Z. f. Gewinnung u. Verwertung d. Braunk., 42, 24/25, 245-253,
- GRENANDER, U. & ROSENBLATT, M. (1956): Statistical analysis of stationary time series. - 300 S., Stockholm
- HAMPE, F. (1977): On the estimation of spectra from time series with outliers. - Diskussionsarbeiten - H. 2, Inst. f. Quantitative Ökonomik u. Statistik, Freie Univ. Berlin
- HAUDE, W. (1959): Die Verteilung der potentiellen Verdunstung in Ägypten. - Erdkunde, 13, 214-224, Bonn

- HANNEMANN, M. (1961): Neue Beobachtungen zur Entstehung und Entwicklung des Berliner Urstromtales zwischen Fürstenwalde (Spree) und Fürstenberg (Oder). - *Geologie*, 10, 418-434, Berlin
- JACOB, C.E. (1940): On the flow of water in an elastic artesian aquifer. - *Am. Geophys. Union Trans.*, 21, 574-586, Washington
- JAGLOM, A.M. (1959): Einführung in die Theorie stationärer Zufallsfolgen. - 177 S., Schriftenreihe d. Forschungsinstitutes f. Math. b. d. dt. Akad. d. Wissenschaften z. Berlin, H.6, Berlin
- JENKINS, G.M. & WATTS, D.G. (1968): Spectral analysis and its applications. - 525 S., San Francisco
- KELLER, H. (1916): Ober- und unterirdische Wasserwirtschaft im Spree- und Havelgebiet. - Landesanstalt f. Gewässerkunde im Ministerium der öffentlichen Arbeiten, Berlin
- KHINTCHINE, A. (1934): Korrelationstheorie der stationären Prozesse. - *Math. Ann.*, 109, 604-615
- KLAUSING, O. & SALEY, G. (1976): Die Messung des Wasserumsatzes im Felde (I) - Klimatische Wasserbilanz. DGM, 20, 1, 1-7
- " (1976): Die Messung des Wasserumsatzes im Felde (III) - Reale Wasserbilanz. - DGM, 20, 4, 100-111
- KENDALL, M. & STUART, A. (1966): The advanced theory of statistics. - Vol.3, 552 S., London
- KISIEL, C.C. (1969): Time series analysis of hydrologic data. - *Advances in Hydroscience*, 5, 1-119, New York
- KLOOS, R. (1977): Das Grundwasser: Bedeutung - Probleme. - 72 S., Senator f. Bau- und Wohnungswesen, Berlin
- " (1963): Die Grundwasserverhältnisse in Berlin (West), insbesondere in den letzten 10 Jahren. - *Wasserwirtschaft*, 53, 361-369, Stuttgart
- " (1965): Beitrag zum Verhalten des Grundwassers in Berlin (West) von 1954-1964. - *Wasserwirtschaft*, 55, 391-396, Stuttgart
- KÖHLER, H. (1926): Ober Dampfspannungsformeln. - *Meteorol. Z.*, 1926, 67-69, Berlin
- KÖNIG, H. & WOLTERS, J. (1972): Einführung in die Spektralanalyse ökonomischer Zeitreihen. - 172 S., Meisenheim am Glan
- KREMS, G. (1975): Die Grundwassersituation in Berlin (W) und die Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen im Rahmen von Baumaßnahmen auf den Grundwasserhaushalt. - *Z. dt. geol. Ges.*, 126, 215-222, Hannover
- KREYSZIG, E. (1974): Statistische Methoden und ihre Anwendungen. - 422 S., Göttingen
- LAUGWITZ, D. (1967): Ingenieurmathematik IV. - 196 S., Mannheim
- LIGHTHILL, M.J. (1966): Einführung in die Theorie der Fourier-Analyse und der verallgemeinerten Funktionen. - 91 S., Mannheim
- MAROTZ, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. - *Mitt. Inst. Wasserwirtsch., Grundbau u. Wasserbau*, 9, Univ. Stuttgart
- MEISSNER, R. (1953): Der Einfluß von Luftdruckschwankungen auf den Grundwasserstand. - *Geophys.*, Sonderband 1953, 161-180, Braunschweig
- MÖLLER, K.H. & STREKER, I. (1970): Fortran - Programmieranleitung. - 140 S., Mannheim
- NAEVE, P. (1969): Spektralanalytische Methoden zur Analyse von ökonomischen Zeitreihen. - *Ber. a. d. Inst. f. Statistik u. Versicherungsmathematik u. a. d. Inst. f. Angew. Statistik d. Freien Univ. Berlin*, H. 9, Würzburg
- PLATE, E. (1974): Analyse kontinuierlicher Zufallsfunktionen. - 94 S., *Mitt. Inst. Wasserbau III*, H.1, Univ. Karlsruhe
- RICHTER, W. & LILLICH, W. (1975): Abriß der Hydrogeologie. - 281 S., Stuttgart
- SCHÖNWIESE, C.-D. (1969): Spektrale Varianzanalyse klimatologischer Reihen im langperiodischen Bereich. - *Münchener Univ.-schriften, Meteorol. Inst., Wiss. Mitt. Nr. 15*, 52 S. Univ. München
- " (1970): Vergleichende Varianzanalyse der Hohenpeißenberger und Baseler Luftdruckreihe im langperiodischen Bereich. - *Meteorol. Rdsch.*, 23, 5, 149-153, Berlin
- " (1971): Temperatur-Varianzspektren der neuen homogenisierten Reihe von München. - *Meteorol. Rdsch.*, 24, 4, 122-125, Berlin
- SCHUSTER, A. (1906): The periodogram and its optical analogy. - *Proc. Roy. Soc., A*, 77, 136-140, London 1906
- " (1906): On the periodicities of sunspots. - *Philos. Trans. Roy. Soc., A*, 206, 69-100, London 1906
- SPANGENBERG, H.-D. (1973): Die Grundwasserverhältnisse im Einzugsgebiet der Stolberger Wasserwerksgesellschaft bei Breiniger-Berg/Stolberg / Rheinland. - *Diss. RWTH Aachen*
- SCHENK, E. (1973): Die Bestimmung des Faktors zur Eliminierung barometrisch bedingter Fluktuationen des Wasserspiegels. - *Z. f. Geophys.*, 39, 471-489, Würzburg
- STUMPF, K. (1937): Grundlagen und Methoden der Periodenforschung. - 332 S., Berlin
- UBELL, K. (1961): Über die Gesetzmäßigkeiten des Grundwassergangs und des Grundwasserhaushalts in Flachlandgebieten. - *WWT*, 11, 8, 366-372, Berlin

- UDLUFT, P. (1973): Beitrag zur Bestimmung des nutzbaren Porenraum der Münchener Schotterebene. - gwf-wasser/abwasser, 114, 11, 521-524, München
- UHLIG, S. (1959): Wasserhaushaltsbetrachtungen nach THORNTHWAITE- Z.f. Acker- u. Pflanzenbau, 109, 4, 384-407, Berlin
- VAN EIMERN, J. (1950): Meteorologisch bedingte Kleinschwankungen des Grundwasserstandes. - Ann. d. Meteorol. 1950, 215-223
- " (1968): Weitere Ergebnisse der Messung der potentiellen Evapotranspiration in Freising-Weihenstephan. - Meteorol. Rdsch., 21, 4, 109-113
- WETZEL, W. (1970): Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Zeitreihenanalyse. - Sonderhefte z. Allg. Statistischen Archiv, H. 1, 5-45
- WOLD, H. (1965): Bibliography on time series and stochastic processes. - 516 S., Edinburgh and London
- WOLDSTEDT, P. & DUPHORN, K. : Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter. - 500 S., Stuttgart
- YEVJEVICH, V. & JENG, R.I. (1969): Properties of non-homogeneous hydrologic series. - Hydrology papers, 32, Colorado State Uni., Fort Collins, Col.
- YEVJEVICH, V. (1972): Stochastic processes in hydrology. - 276 S., Water Res. Publications, Fort Collins, Col
- ZUNKER, F. (1930): Das Verhalten des Bodens zum Wasser. - Handbuch der Bodenlehre, 4, Berlin



Taf. 1: Lageplan der Grundwassermeßstellen, der Klimastationen und der Gebiete (Karte nach "Gewässerkundlichem Jahresbericht 1976" des Senators f. Bau- und Wohnungswesen)

| Ganglinie Nr. | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 |
|------------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Gebiet A: 0001 | 34.89 | $0.371 \cdot 10^{-3}$ | $0.996 \cdot 10^{-5}$ | $-0.648 \cdot 10^{-7}$ |
| 0004 | 32.91 | $-0.536 \cdot 10^{-2}$ | $0.316 \cdot 10^{-4}$ | $-0.748 \cdot 10^{-7}$ |
| 0115 | 38.29 | $0.146 \cdot 10^{-1}$ | $-0.918 \cdot 10^{-4}$ | $0.192 \cdot 10^{-6}$ |
| 0115 | 38.65 | $0.248 \cdot 10^{-2}$ | | |
| 0145 | 33.67 | $-0.201 \cdot 10^{-1}$ | $0.231 \cdot 10^{-3}$ | $-0.763 \cdot 10^{-6}$ |
| 0146 | 33.92 | $-0.226 \cdot 10^{-1}$ | $0.232 \cdot 10^{-3}$ | $-0.756 \cdot 10^{-6}$ |
| 0150 | 38.93 | $-0.146 \cdot 10^{-1}$ | $0.212 \cdot 10^{-3}$ | $-0.716 \cdot 10^{-6}$ |
| 0151 | 47.55 | $0.460 \cdot 10^{-2}$ | $-0.343 \cdot 10^{-4}$ | $0.100 \cdot 10^{-6}$ |
| 0157 | 40.60 | $-0.171 \cdot 10^{-1}$ | $0.230 \cdot 10^{-3}$ | $-0.741 \cdot 10^{-6}$ |
| 0176 | 35.25 | $-0.410 \cdot 10^{-2}$ | $0.102 \cdot 10^{-3}$ | $-0.487 \cdot 10^{-6}$ |
| 0218 | 38.26 | $-0.991 \cdot 10^{-2}$ | $0.179 \cdot 10^{-3}$ | $-0.725 \cdot 10^{-6}$ |
| 0248 | 36.33 | $0.649 \cdot 10^{-2}$ | $-0.357 \cdot 10^{-4}$ | $0.639 \cdot 10^{-7}$ |
| 1140 | 32.73 | $-0.163 \cdot 10^{-1}$ | $0.150 \cdot 10^{-3}$ | $-0.445 \cdot 10^{-6}$ |
| 1141 | 33.05 | $-0.368 \cdot 10^{-2}$ | $0.249 \cdot 10^{-4}$ | $-0.798 \cdot 10^{-7}$ |
| 1141 | 33.05 | $-0.211 \cdot 10^{-2}$ | | |
| 1142 | 35.08 | $0.188 \cdot 10^{-2}$ | $0.201 \cdot 10^{-5}$ | $-0.190 \cdot 10^{-7}$ |
| 1142 | 35.17 | $0.150 \cdot 10^{-3}$ | | |
| Gebiet B: 0089 | 32.48 | $-0.200 \cdot 10^{-2}$ | $-0.282 \cdot 10^{-4}$ | $0.120 \cdot 10^{-6}$ |
| 0251 | 32.39 | $0.394 \cdot 10^{-3}$ | $-0.642 \cdot 10^{-4}$ | $0.212 \cdot 10^{-6}$ |
| 0488 | 32.19 | $-0.114 \cdot 10^{-1}$ | $0.771 \cdot 10^{-4}$ | $-0.143 \cdot 10^{-6}$ |
| 0489 | 31.92 | $-0.111 \cdot 10^{-1}$ | $0.949 \cdot 10^{-4}$ | $-0.220 \cdot 10^{-6}$ |
| 0490 | 32.11 | $-0.456 \cdot 10^{-1}$ | $0.359 \cdot 10^{-4}$ | $-0.812 \cdot 10^{-7}$ |
| 0491 | 32.22 | $-0.713 \cdot 10^{-2}$ | $0.640 \cdot 10^{-4}$ | $-0.171 \cdot 10^{-6}$ |
| 0492 | 32.16 | $-0.308 \cdot 10^{-2}$ | $0.158 \cdot 10^{-4}$ | $-0.382 \cdot 10^{-7}$ |
| 0493 | 32.29 | $-0.667 \cdot 10^{-2}$ | $0.612 \cdot 10^{-4}$ | $-0.161 \cdot 10^{-6}$ |
| 0494 | 32.26 | $-0.171 \cdot 10^{-1}$ | $0.218 \cdot 10^{-3}$ | $-0.669 \cdot 10^{-6}$ |
| 0793 | 32.80 | $-0.122 \cdot 10^{-1}$ | $0.748 \cdot 10^{-4}$ | $0.146 \cdot 10^{-6}$ |
| 0795 | 32.75 | $-0.351 \cdot 10^{-2}$ | $-0.822 \cdot 10^{-5}$ | $0.343 \cdot 10^{-7}$ |
| 0795 | 32.60 | $-0.245 \cdot 10^{-2}$ | | |
| 0802 | 32.51 | $-0.477 \cdot 10^{-2}$ | $0.142 \cdot 10^{-4}$ | $-0.117 \cdot 10^{-7}$ |
| 0803 | 32.71 | $-0.673 \cdot 10^{-2}$ | $-0.732 \cdot 10^{-5}$ | $0.526 \cdot 10^{-7}$ |
| Gebiet C: 0085 | 38.60 | $0.769 \cdot 10^{-2}$ | $-0.844 \cdot 10^{-4}$ | $0.206 \cdot 10^{-6}$ |
| 0085 | 38.82 | $-0.164 \cdot 10^{-2}$ | | |
| 0086 | 37.65 | $0.847 \cdot 10^{-2}$ | $-0.992 \cdot 10^{-4}$ | $0.255 \cdot 10^{-6}$ |
| 0124 | 40.84 | $-0.594 \cdot 10^{-2}$ | $0.598 \cdot 10^{-4}$ | $-0.171 \cdot 10^{-6}$ |
| 0125 | 40.30 | $-0.111 \cdot 10^{-1}$ | $0.120 \cdot 10^{-3}$ | $-0.378 \cdot 10^{-6}$ |
| 0126 | 39.83 | $-0.257 \cdot 10^{-1}$ | $0.310 \cdot 10^{-3}$ | $-0.107 \cdot 10^{-5}$ |
| 0127 | 40.41 | $-0.133 \cdot 10^{-1}$ | $0.132 \cdot 10^{-3}$ | $-0.391 \cdot 10^{-6}$ |
| 0129 | 40.89 | $-0.146 \cdot 10^{-1}$ | $0.132 \cdot 10^{-3}$ | $-0.347 \cdot 10^{-6}$ |
| 0173 | 39.70 | $-0.614 \cdot 10^{-2}$ | $0.805 \cdot 10^{-4}$ | $-0.312 \cdot 10^{-6}$ |
| 0217 | 38.36 | $0.275 \cdot 10^{-1}$ | $-0.184 \cdot 10^{-3}$ | $0.403 \cdot 10^{-5}$ |

Fig. 2: Polynom-Koeffizienten der Trendfunktionen

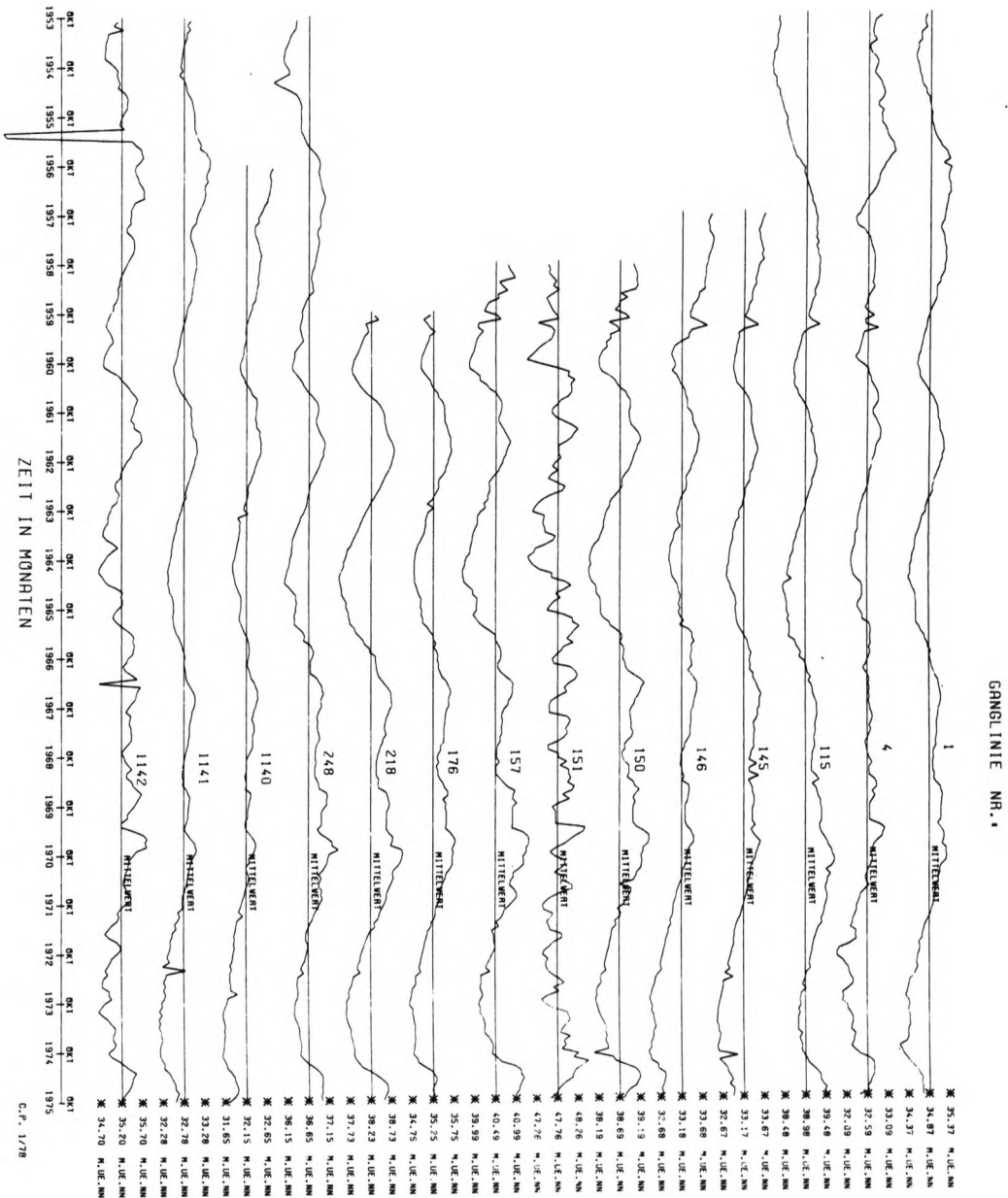
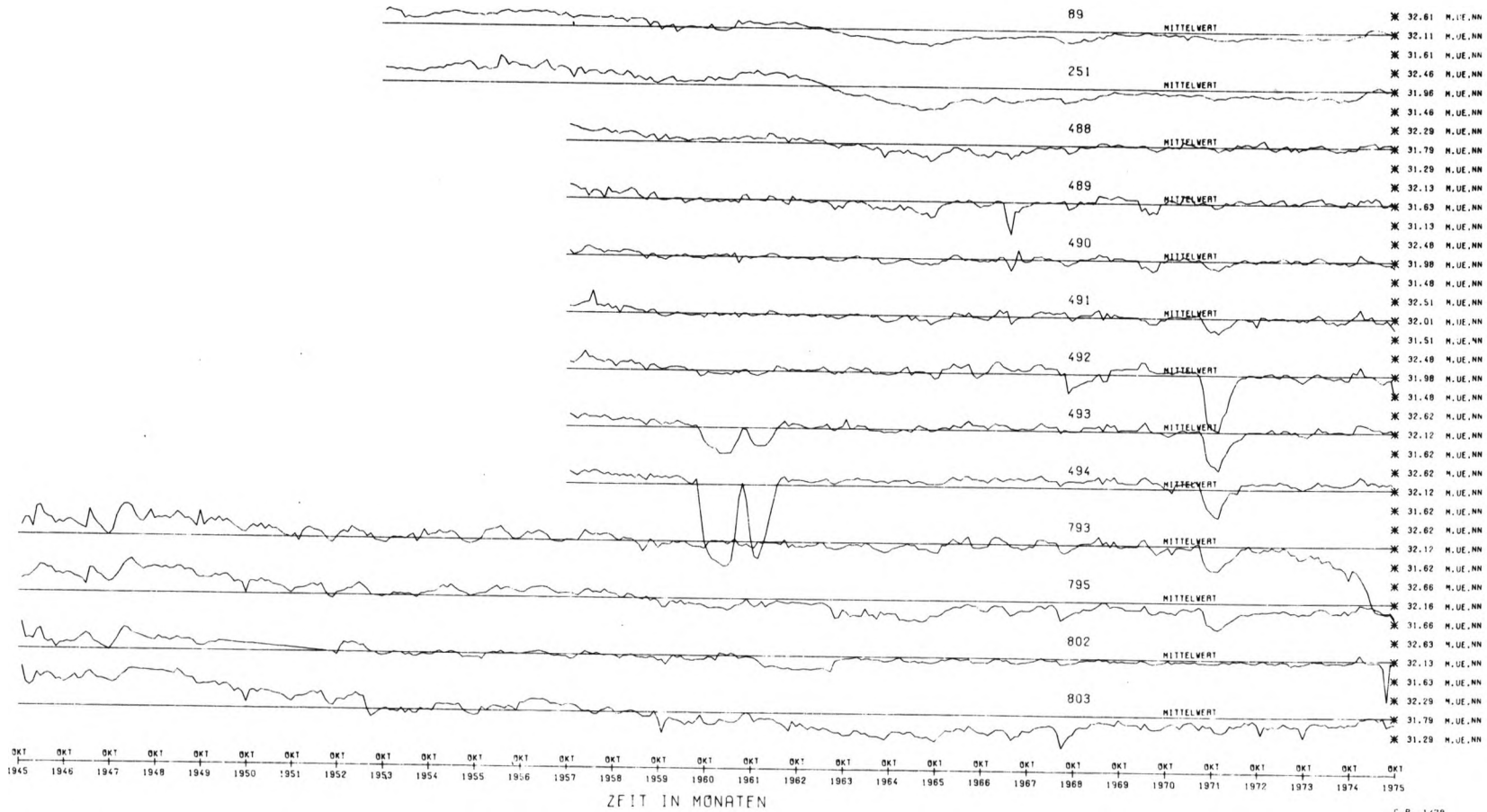


Fig. 1: Grundwassersandganglinien des Gebietes A

GANGLINIE NR. 1

GANGLINIE NR. 1



Grundwasserstandsganglinien des Gebietes B.

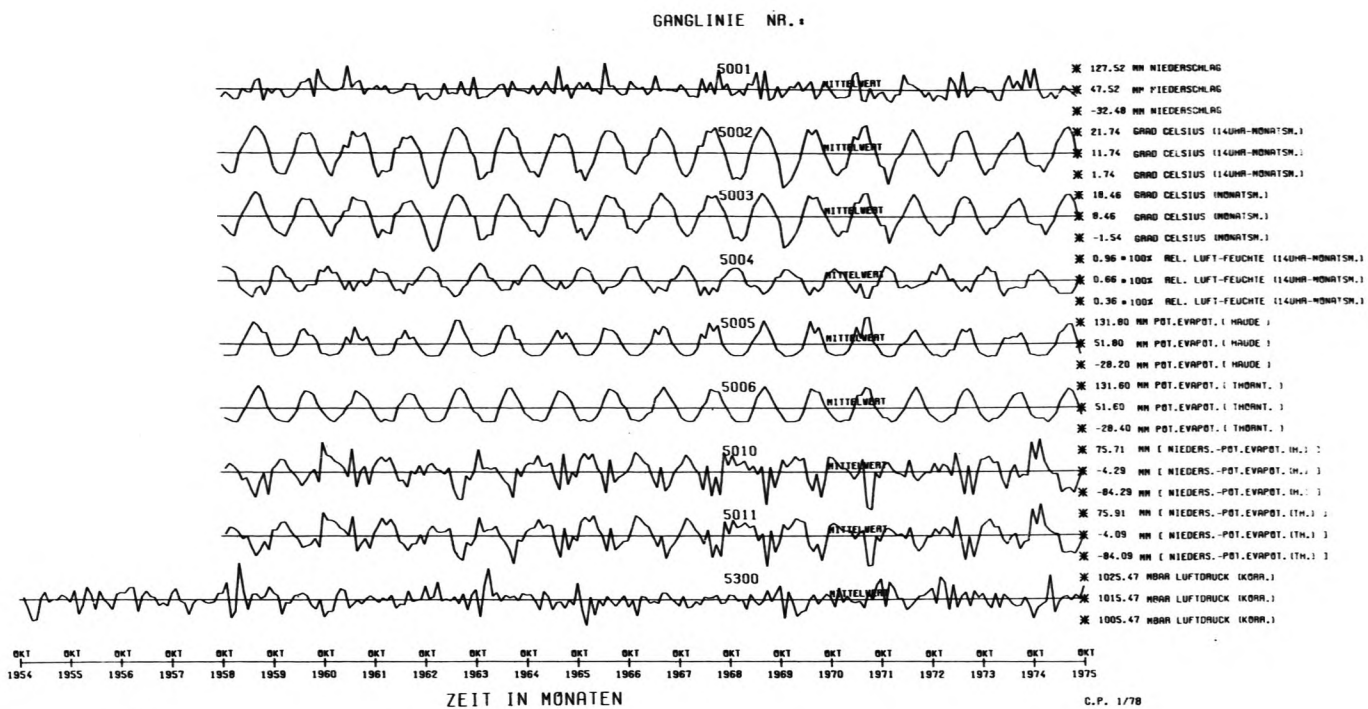


Fig. 1: klimatologische Zeitreihen des Gebietes A
 (für die Gebiete B und C liegen weitgehend übereinstimmende Reihen vor).

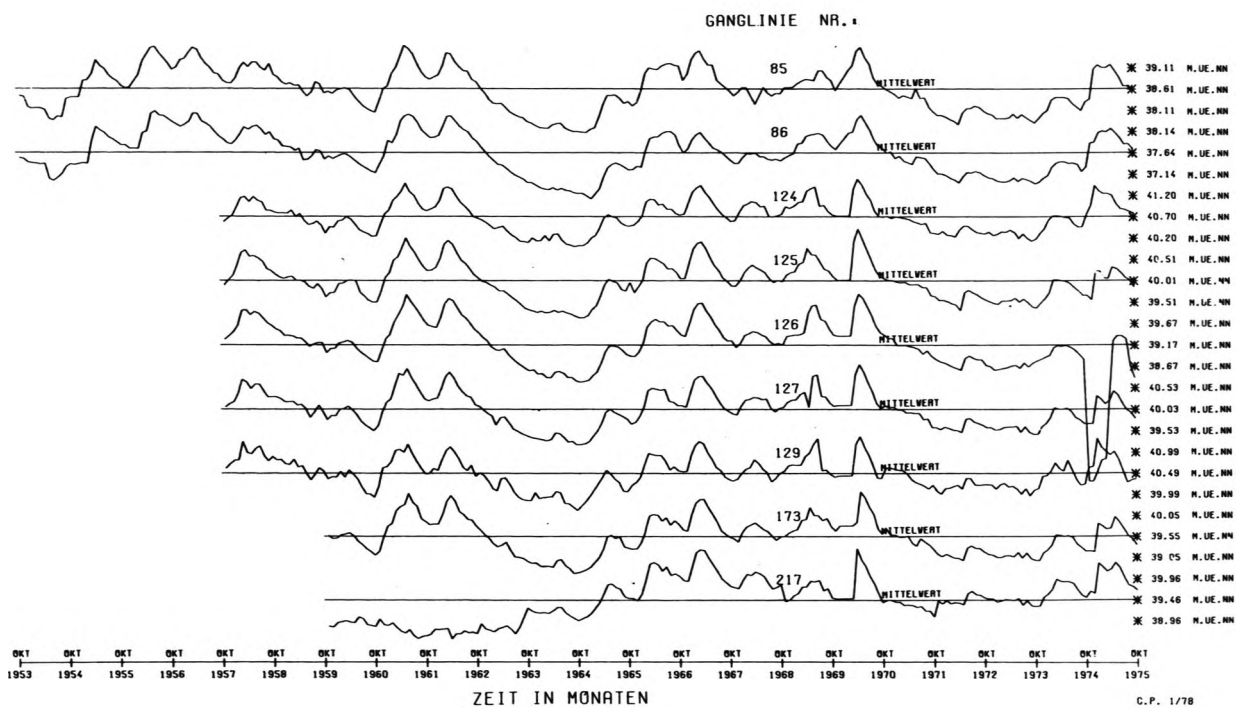
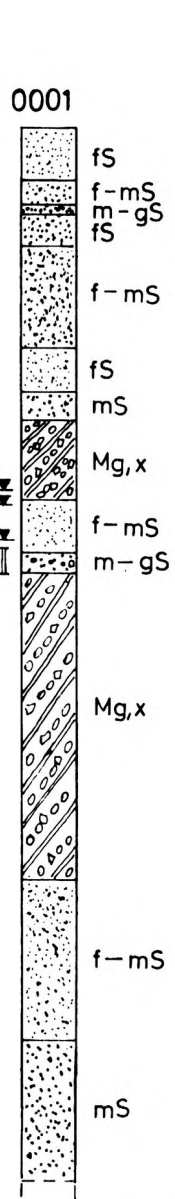


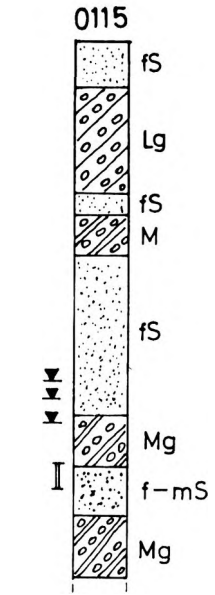
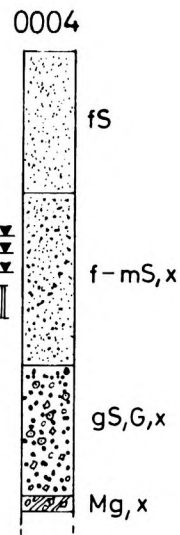
Fig. 2: Grundwasserstandsganglinien des Gebietes C

m ü. NN

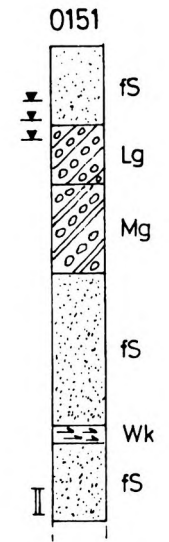
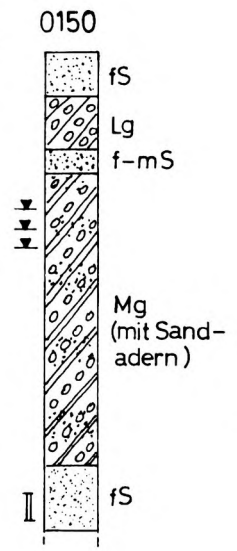
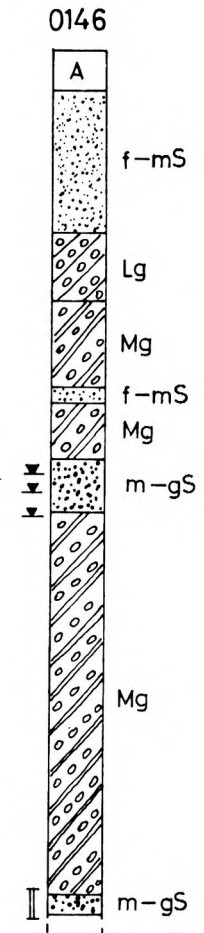
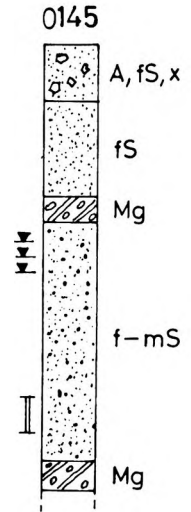
50
45
40
35
30
25
20
15
10



HW
MW
NW



II = Filterrohr

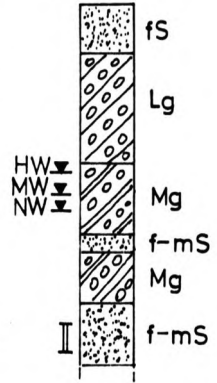


Taf. 5: Bohrprofile von Pegeln aus Gebiet A
(Darst. nach DIN 4023)

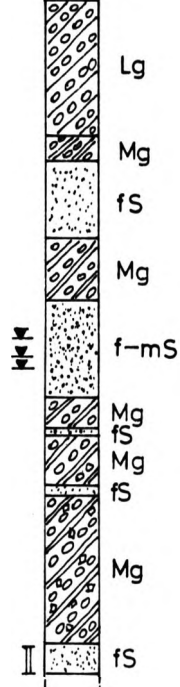
mü. NN

50
45
40
35
30
25
20
15
10

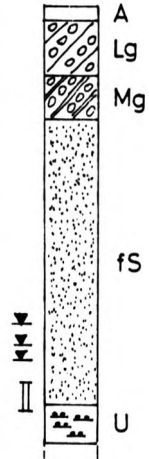
0157



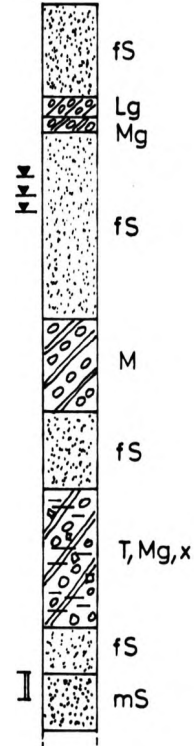
0176



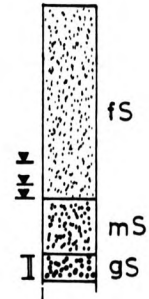
0218



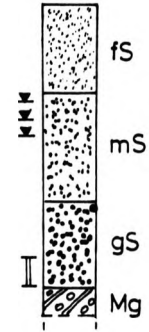
0248



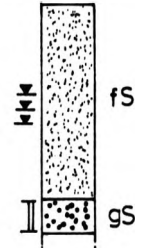
1140



1141



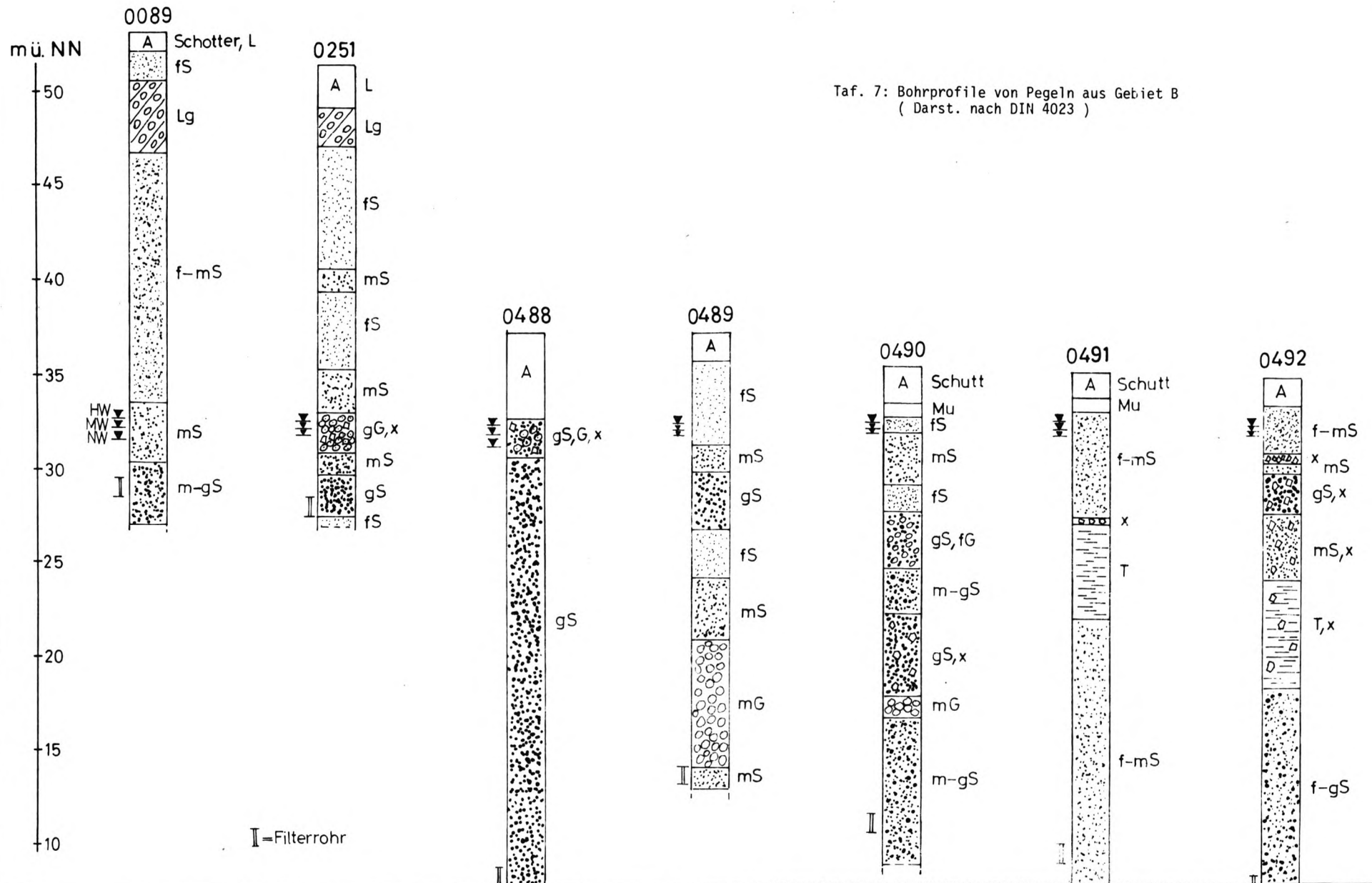
1142

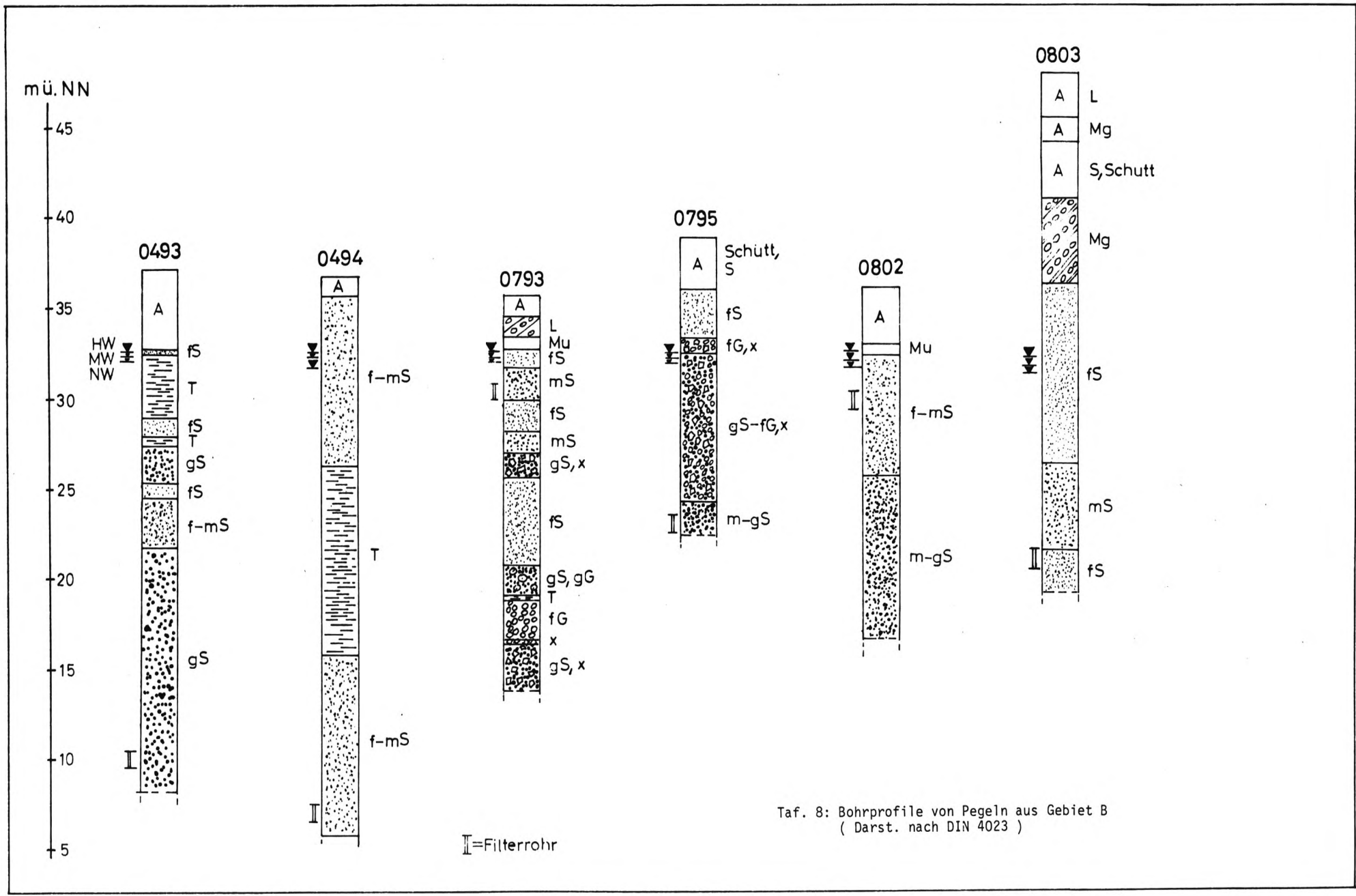


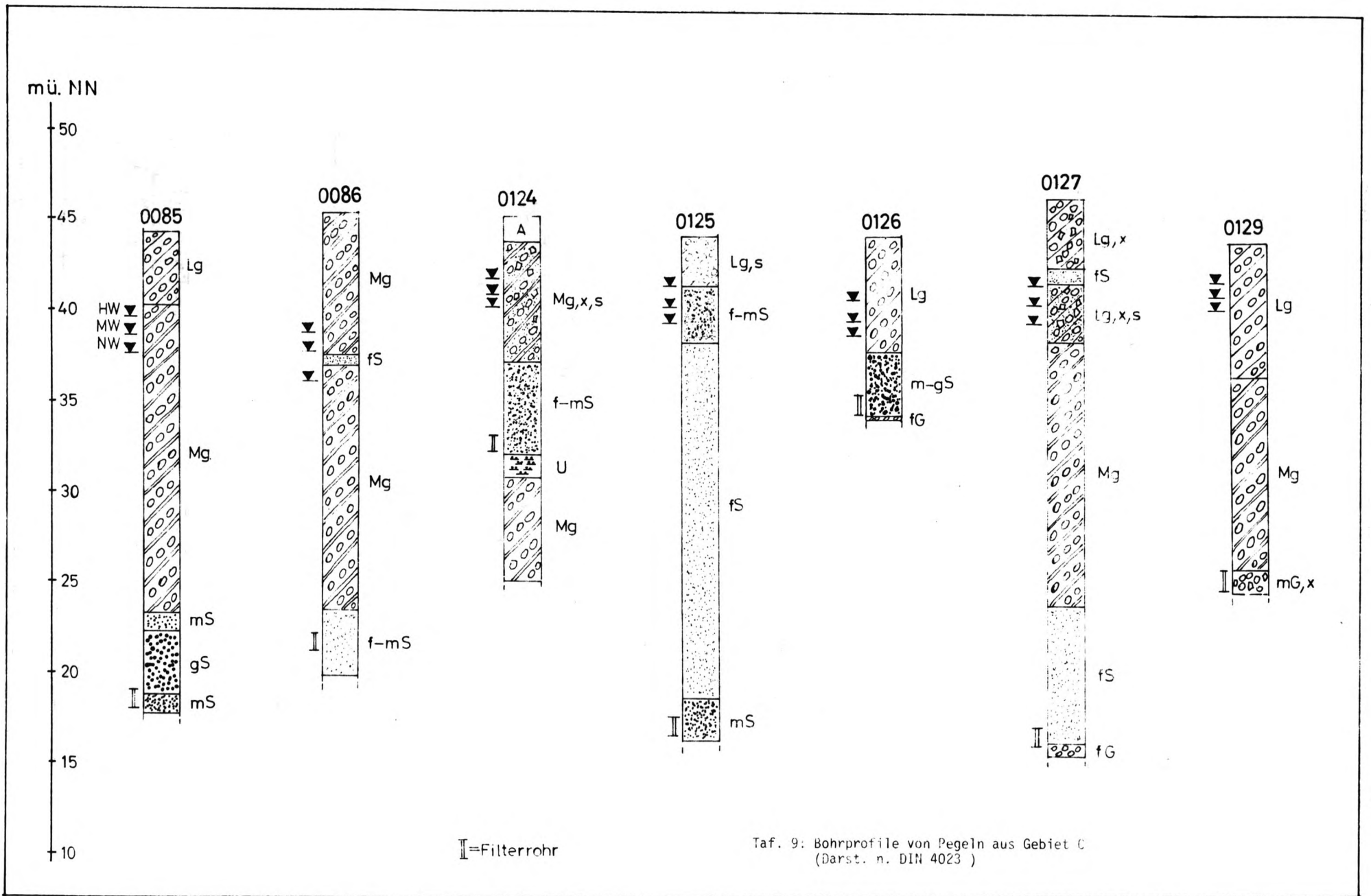
II=Filterrohr

Taf. 6: Bohrprofile von Pegeln aus Gebiet A
(Darst. nach DIN 4023)

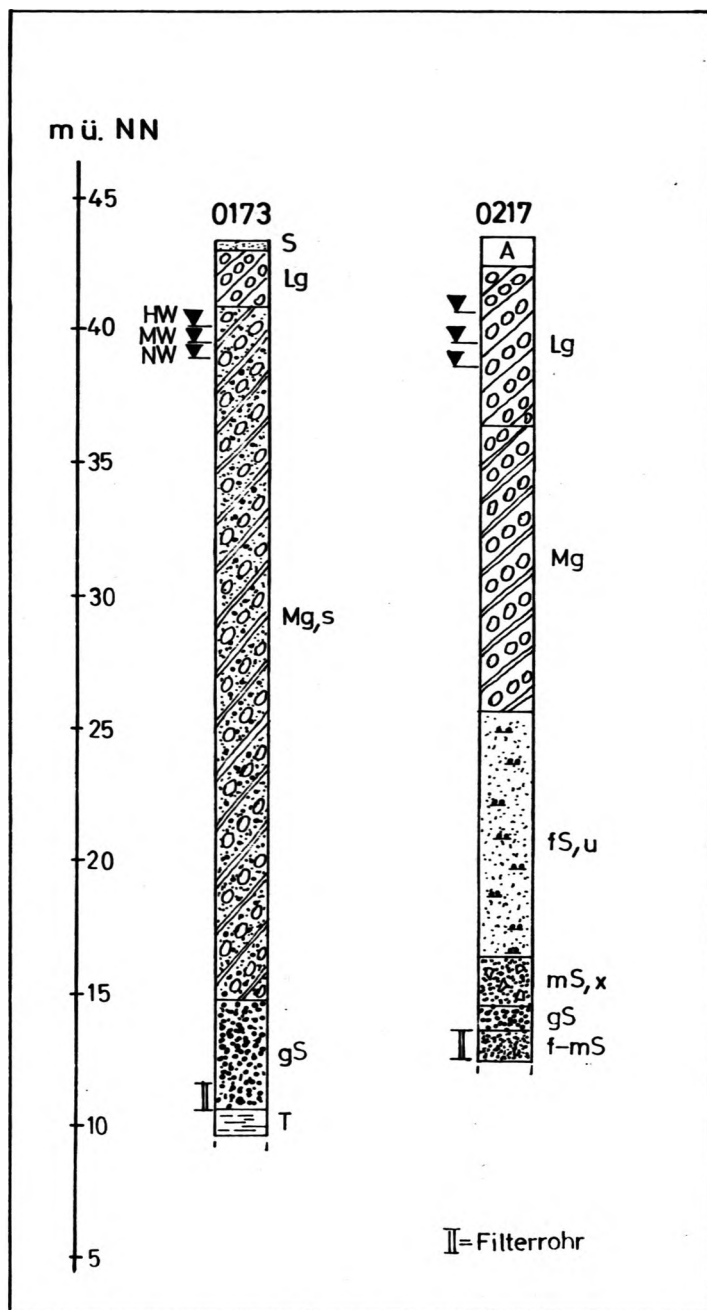
Taf. 7: Bohrprofile von Pegeln aus Gebiet B
(Darst. nach DIN 4023)







Taf. 9: Bohrprofile von Pegeln aus Gebiet C
(Darst. n. DIN 4023)



Taf. 10: Bohrprofile von Pegeln aus Gebiet C
(Darst. nach DIN 4023)

```

000010 C*****
000020 C*****
000030 C*
000040 C*
000050 C*
000060 C* PROGRAMM ZUR UNTERSUCHUNG VON GANGLINIEN
000070 C*
000080 C*
000090 C*
000100 C* ***** SPEKTRUM *****
000110 C*
000120 C*
000130 C*
000140 C* DAS PROGRAMM BASIERT AUF DER THEORIE DER STOCHASTISCHEN
000150 C* PROZESSE UND DER METHODE VON BLACKMAN & TUKEY (1959)
000160 C*
000170 C*
000180 C*
000190 C*
000200 C*
000210 C*
000220 C* DAS AUTOSPEKTRUM WIRD UEBER DIE AUTOKORRELATIONSFUNKTION
000230 C* ERMITTELT.
000240 C* BEIM KREUZSPEKTRUM WIRD DIE LAENGERE REIHE GEKUEZT. DAHER
000250 C* MUESSEN ALLE IM KREUZSPEKTRUM UNTERSUCHTEN REIHEN ZUM GLEICHEN
000260 C* ZEITPUNKT ENDEN.
000270 C* ES KOENNEN BEI DEN HIER VORGEgebenEN SPEICHERPLAEZTEN
000280 C* BIS ZU 5 GANGLINIEN MIT JE BIS ZU 500 MESSPUNKTEN GLEICH-
000290 C* ZEITIG UNTERSUCHT WERDEN.
000300 C*
000310 C*
000320 C* VERSION VOM 12.12.77
000330 C*
000340 C*
000350 C*
000360 C* VERFASSER: C. PRELLER
000370 C*
000380 C*
000390 C*****
000400 C*
000410 C*
000420 C* LOGICAL LOGI
000430 C* COMMON /ZDIF/7(5,500),ZDIF(5,500)/AK/ACKOV(7,101),ACKOR(7,101)
000440 C* 1/GU/GERA(101),UNGERA(101)/SY/SYMB(9)
000450 C* 2 //K(5),VA(5),IEND(5),ZMA(5),ZMI(5)
000460 C* DATA ZEI/'JA ',GERA/101*0./,UNGERA/101*0./
000470 C* WRITE(9,23)
000480 C* 23 FORMAT(1H,'ANZAHL DER GANGLINIEN (BIS ZU 5) IM FORMAT I1')
000490 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
000500 C* READ(9,22)I1
000510 C* 22 FORMAT(I1)
000520 C* WRITE(9,20) I1
000530 C* 20 FORMAT(1H,'ANGABE VON (BIS ZU ',I1,' ) GANGLINIEN-NUMMER(N)
000540 C* IM FORMAT I4')
000550 C* DO 100 I=1,I1
000560 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
000570 C* READ(9,21,FRR=99) K(I)
000580 C* 21 FORMAT(I4)
000590 C* 100 CONTINUE
000600 C* 99 DO 101 I2=1,I1
000610 C* IF (K(I2).GE.5000) GOTO 102
000620 C* CALL DAT1 (I2,IEN,*152)
000630 C* GOTO 103
000640 C* 102 CALL DAT2 (I2,IEN,*152)
000650 C* 103 WRITE(6,24) K(I2),(SYMB(3),I=1,40),IEN
000660 C* 24 FORMAT(///,1H,'T5','GANGLINIE NR.:',I4,T27,40A1,T20,
000670 C* 1'ANZAHL DER MESSDATEN:',I3)
000680 C* IEND(I2)=IEN
000690 C* EN=FL0AT(IEN)
000700 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
000710 C* WRITE(9,27) K(I2)
000720 C* 27 FORMAT(1H0,'GANGLINIE NR.:',I4,5X,'SOLL TRENDBERECHNUNG
000730 C* DURCHFUEHRT WERDEN? JA ODER NEIN')
000740 C* READ(9,26) ZEIC
000750 C* 26 FORMAT(A4)
000760 C* IF (ZEIC.EQ. ZEI) CALL TREND (I2,IEN,ZMIT,VAR,*160,*161)
000770 C*****MITTELMERT
000780 C* ZMIT=0.
000790 C* DO 107 IA=1,IEN
000800 C* ZMIT=ZMIT+Z(I2,IA)

```

```

000810 107 CONTINUE
000820 ZMIT=ZMIT/EN
000830 C*****DIFFERENZ ZWISCHEN GRUNDWASSERSTAND (Z-WERT) UND MITTELMERT
000840 C*****VARIANZ
000850 VAR=0.
000860 DO 108 IA=1,IEN
000870 ZDIF(I2,IA)=Z(I2,IA)-ZMIT
000880 VAR=VAR+ZDIF(I2,IA)*ZDIF(I2,IA)
000890 108 CONTINUE
000900 109 VA(I2)=VAR/EN
000910 C*****MAXIMALER UND MINIMALER GRUNDWASSERSTAND
000920 C*****MAXIMALE UND MINIMALE DIFFERENZ ZUM LANGJAHRIGEN MITTEL
000930 ZMAX=Z(I2,1)
000940 ZMIN=Z(I2,1)
000950 ZMA(I2)=ZDIF(I2,1)
000960 ZMI(I2)=ZDIF(I2,1)
000970 DO 110 IA=2,IEN
000980 IF(Z(I2,IA).GT.ZMAX) ZMAX=Z(I2,IA)
000990 IF(Z(I2,IA).LT.ZMIN) ZMIN=Z(I2,IA)
001000 IF(ZDIF(I2,IA).GT.ZMA(I2)) ZMA(I2)=ZDIF(I2,IA)
001010 IF(ZDIF(I2,IA).LT.ZMI(I2)) ZMI(I2)=ZDIF(I2,IA)
001020 110 CONTINUE
001030 WRITE(6,20)ZMAX,ZMIN,ZMA(I2),ZMI(I2)
001040 20 FORMAT(//,1H ,T10,'ZMAX=',F8.2,' EINHEITEN',/,T10,
001050 1'ZMIN=',F8.2,' EINHEITEN',/,T10,'MAX. DIFFERENZ ZUM
001060 2LANGJ. MITTEL= ',F8.3,/,T10,'MIN. DIFFERENZ ZUM
001070 3LANGJ. MITTEL= ',F8.3)
001080 WRITE(6,30) ZMIT
001090 30 FORMAT(//,T10,'MITTELMERT = ',F10.3,' EINHEITEN')
001100 WRITE(6,31) VA(I2)
001110 31 FORMAT(//,T10,'VARIANZ = ',F10.3)
001120 C*****AUTOKOVARIANZEN UND AUTOKORRELATIONEN
001130 C ZUR BERECHNUNG DER AUTOKOVARIANZEN UND AUTOKORRELATIONEN WERDEN
001140 C HIER 100 ZEITVERSCHIEBUNGEN ANGENOMMEN
001150 IX=I2
001160 IY=I2
001170 IDIF=0
001180 C*****AUFRUF SUBROUTINE KORR1
001190 CALL KORR1 (I2,IX,IY,IDIF,IFN,LOGI)
001200 101 CONTINUE
001210 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
001220 WRITE(9,29)
001230 29 FORMAT(1H0,'HUR KREUZSPEKTRUM? JA ODER NEIN')
001240 READ(8,26)ZEIC
001250 IF (ZEIC.EQ.ZEI) GOTO 119
001260 DO 200 I2=1,I1
001270 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
001280 WRITE(9,25)
001290 25 FORMAT(1H ,S'OLL GANGLINIE AUSGEDRUCKT WERDEN?
001300 1JA ODER NEIN?')
001310 READ(8,26) ZEIC
001320 C*****AUFRUF SUBROUTINE GDRUCK
001330 IF(ZEIC.EQ.ZEI) CALL GDRUCK (I2)
001340 200 CONTINUE
001350 WRITE(6,35)
001360 35 FORMAT(///,1H ,T2,'AUTOKORRELATION',/)
001370 DO 115 I2=1,I1
001380 WRITE(6,36)K(I2),SYMB(I2+2),I2
001390 36 FORMAT(1H ,T2,I4,T10,A1,T13,'AN ',I1,'STELLE STEHEND')
001400 115 CONTINUE
001410 I4=1
001420 CALL DIAG (I1,I4,I1)
001430 C
001440 C*****AUTOSPEKTRUM*****
001450 DO 114 I2=1,I1
001460 IEN=IEND(I2)
001470 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
001480 WRITE(9,42)IEND(I2)
001490 42 FORMAT(1H0,'ANGABE VON LAG FUER AUTOSPEKTRUM IM FORMAT I3
001500 1 -- LAG< 0.3** I3)
001510 CALL ANFRAG (LAG,NF)
001520 C*****AUFRUF SUBROUTINE ASPEK
001530 CALL ASPEK (I2,LAG,NF,IEN)
001540 WRITE(6,40)
001550 40 FORMAT(5(//))
001560 PERIOD=6.
001570 CALL AMPLIT(I2,IEN,PERIOD)
001580 114 CONTINUE
001590 IF (I1.EQ.1) GOTO 118
001600 C

```

```

001610 C*****KREUZKOVARIANZEN*****KREUZKORRELATIONEN
001620 C*****KX- UND QUADRATSPEKTRUM
001630 C ZUR BERECHNUNG DER KREUZKOVARIANZEN UND KREUZKORRELATIONEN
001640 C WERDEN AUCH HIER 100 ZEITVERSCHIEBUNGEN ANGENOMMEN
001650 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
001660 119 WRITE(9,55)
001670 55 FORMAT(1H0,'KREUZKORRELATION: ANGABE VON 2 GANGLINIEN-NUMMERN
001680 1 IM FORMAT (I4,1X,I4)'
001690 READ(8,56,END=119)KX,KY
001700 56 FORMAT(I4,1X,I4)
001710 I5=2
001720 I6=6
001730 I7=7
001740 C*****ANFRAGE NACH DER KUERZEREN DER BEIDEN REIHEN
001750 DO 120 I2=1,I1
001760 IF (KX.EQ.K(I2))IX=I2
001770 IF (KY.EQ.K(I2))IY=I2
001780 120 CONTINUE
001790 IDIF=IEND(IX)-IEND(IY)
001800 IF(IDIF) 121,121,122
001810 121 IEN=IEND(IX)
001820 IDIF=IABS(IDIF)
001830 CALL KORR1(I6,IX,IY,IDIF,IEN,LOGI)
001840 GOTO 123
001850 122 IEN=IEND(IY)
001860 CALL KORR2(I6,IX,IY,IDIF,IEN,LOGI)
001870 123 WRITE(6,71)
001880 71 FORMAT(1H0,T2,'KREUZKORRELATION')
001890 WRITE(6,60)KX,KY,SYMB(8)
001900 60 FORMAT(1H0,T2,'REIHE ',I4,' MIT REIHE ',I4,2X,A1,2X,
001910 1' AN 1.STELLE STEHEND -- POSITIVE ZEITVERSCHIEBUNGEN')
001920 C
001930 C*****NEGATIVE ZEITLICHE VERSCHIEBUNG
001940 C*****REIHE 2 (KY) ZEITLICH FEST, REIHE 1 (KX) WIRD VERSCHOBEN
001950 IF (LOGI) GOTO 125
001960 C*****AUFRUF SUBROUTINE KORR1
001970 CALL KORR1 (I7,IY,IX,IDIF,IEN,LOGI)
001980 GOTO 126
001990 C*****AUFRUF SUBROUTINE KORR2
002000 125 CALL KORR2 (I7,IY,IX,IDIF,IEN,LOGI)
002010 126 WRITE(6,70)SYMB(8)
002020 70 FORMAT(1H ',T20,A1,2X,' AN 2.STELLE STEHEND -- NEGATIVE
002030 1ZEITVERSCHIEBUNGEN')
002040 CALL DIAG (I5,I6,I7)
002050 C*****BERECHNUNG DER GERADEN UND UNGERADEN KREUZKOVARIANZEN MIT ALIGNING
002060 ACMAX=ABS(ACKOR(6,1))
002070 IT6=1
002080 ACMAX=ABS(ACKOR(7,1))
002090 IT7=1
002100 DO 130 IH=2,101
002110 IF (ABS(ACKOR(6,IH)).GT.ACMAX) GOTO 131
002120 GOTO 132
002130 131 ACMAX=ABS(ACKOR(6,IH))
002140 IT6=IH
002150 132 IF (ABS(ACKOR(7,IH)).GT.ACMAX) GOTO 133
002160 GOTO 130
002170 133 ACMAX=ABS(ACKOR(7,IH))
002180 IT7=IH
002190 130 CONTINUE
002200 IF (ACMAX.GE.ACMAX) GOTO 134
002210 GOTO 135
002220 134 LS=IT6
002230 LS0=LS-1
002240 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
002250 WRITE(9,73) IEN,LS0
002260 WRITE(6,73) IEN,LS0
002270 73 FORMAT(1H0,'ANGABE VON LAG FUER KREUZSPEKTREN IM FORMAT I3
002280 1 -- LAG < 0.3*',I3,' ZUM 100 ; HOECHSTE
002290 2KORRELATION BEI PUNKT ',I3,/)
002300 CALL AFRAG (LAG,NF)
002310 IF (LAG.LT.LS+1) GOTO 151
002320 LK=0
002330 IF (2*LS-LAG.GE.0) GOTO 140
002340 GOTO 141
002350 140 LAS=LAG-LS
002360 ASSIGN 150 TO LK
002370 GOTO 127
002380 141 LAS=LS
002390 127 DO 136 IH=1,LAS
002400 CCR(IH)=0.5*(ACKOR(I6,IH+LS-1)+ACKOR(I6,LS-IH+1))

```



```

002410      UNGERA(IH)=0.5*(ACKOV(I6,IH+LS-1)-ACKOV(I6,LS-IH+1))
002420 136 CONTINUE
002430      GOTO LK, (150)
002440      LS1=LS+1
002450      LAS=LAG-LS
002460      DO 137 IH=LS1,LAS
002470      GERA(IH)=0.5*(ACKOV(I6,IH+LS-1)+ACKOV(I7,IH-LS+1))
002480      UNGERA(IH)=0.5*(ACKOV(I6,IH+LS-1)-ACKOV(I7,IH-LS+1))
002490 137 CONTINUE
002500      GOTO 150
002510 135 LS=IT7
002520      LS0=-1*(LS-1)
002530      LE=LS+FIX(0.3*(101.-FLOAT(LS)))
002540      WRITE(9,73) IEN,LS0
002550      WRITE(6,73) IEN,LS0
002560      CALL AFRAG (LAG,NF)
002570      IF (LAG.LT.LS+1) GOTO 151
002580      LK=0
002590      IF (2*LS-LAG.GE.0) GOTO 142
002600      GOTO 143
002610 142 LAS=LAG-LS
002620      ASSIGN 150 TO LK
002630      GOTO 120
002640 143 LAS=LS
002650 120 DO 138 IH=1,LAS
002660      GERA(IH)=0.5*(ACKOV(I7,IH+LS-1)+ACKOV(I7,LS-IH+1))
002670      UNGERA(IH)=0.5*(ACKOV(I7,IH+LS-1)-ACKOV(I7,LS-IH+1))
002680 138 CONTINUE
002690      GOTO LK, (150)
002700      LS1=LS+1
002710      LAS=LAG-LS
002720      DO 139 IH=LS1,LAS
002730      GERA(IH)=0.5*(ACKOV(I7,IH+LS-1)+ACKOV(I6,IH-LS+1))
002740      UNGERA(IH)=0.5*(ACKOV(I7,IH+LS-1)-ACKOV(I6,IH-LS+1))
002750 139 CONTINUE
002760 150 IO=1
002770      CALL DSPEK (IO,IX,LAS,NF)
002780      IO=2
002790      CALL DSPEK (IO,IY,LAS,NF)
002800      CALL CSPEK (KX,KY,IO,I9,LAG,LAS,NF,LS0,IEN)
002810      GOTO 119
002820 151 WRITE(6,74)
002830 74 FORMAT(1H0,10Y,'LAG KLEINER ALS M-WERT')
002840      GOTO 119
002850 152 WRITE(6,75)
002860      WRITE(9,75)
002870 75 FORMAT(5X,'FEHLER: GANGLINIENNUMMER KOMMT IN DIESER DATEI
002880      1 NICHT VOR ODER FEHLER IN DER DATEI')
002890      GOTO 118
002900 161 WRITE(6,76)
002910      WRITE(9,76)
002920 76 FORMAT(5X,'FEHLER IM ZUSAMMENHANG MIT UP LINGL')
002930 110 STOP
002940      END
002950 C
002960 C+++++
002970 C ENDE HAUPTPROGRAMM
002980 C+++++
002990 C
003000      BLOCK DATA
003010      COMMON /SV/SYMB(9)
003020      DATA SYMB(1)/' ',SYMB(2)/'|',SYMB(3)/'**',SYMB(4)/'+',
003030      1SYMB(5)/'0',SYMB(6)/'X',SYMB(7)/'&',SYMB(8)/'%',SYMB(9)/'E' /
003040      END
003050 C
003060 C*****EINLESEN VON MONATLICHEN DATEN BEI 14-TAEGIGEN MESSUNGEN*****
003070      SUBROUTINE DAT1 (I2,IEN,*)
003080      COMMON/ZXDIF/Z(5,500),ZDIF(5,500)//K(5)
003090 1000 READ(10,1103,END=1001) KX
003100 1100 FORMAT(I4)
003110      IF(KX.EQ.K(I2)) GOTO 1003
003120      GOTO 1000
003130 1003 BACKSPACE 10
003140      DO 1004 IEN=1,500
003150      READ(10,1101,END=1005) KX,Z(I2,IEN)
003160 1101 FORMAT(I4,3X,F8.0,/)
003170      IF(KX.NE.K(I2)) GOTO 1005
003180 1004 CONTINUE
003190 1005 IEN=IEN-1
003200      REVIND 10

```

```

003210 RETURN
003220 RETURN 10
003230 RETURN 1
003240 END
C
003250
003260 C*****EINLESEN VON MONATLICHEN DATEN BEI MONATLICHEN MESSUNGEN*****
003270 SUBROUTINE DAT2 (I2,IEN,*)
003280 COMMON/7/DIF Z(5,500),7/DIF(5,500)/K(5)
003290 READ(11,2100,END=2005) KX,Z(I2,IEN)
003300 FORMAT(I4)
003310 IF (KX.EQ.K(I2)) GO TO 2003
003320 GO TO 2000
003330 BACKSPACE 11
003340 DO 2004 IEN=1,500
003350 READ(11,2101,END=2005) KY,Z(I2,IEN)
003360 FORMAT(I4,3,F5.0)
003370 Z(I2,IEN)=Z(I2,IEN)
003380 IF (KY.EQ.K(I2)) GO TO 2005
003390 CONTINUE
003400 IEN=IEN-1
003410 RETURN 11
003420 RETURN
003430 RETURN 11
003440 RETURN 1
003450 END
C
003460
003470 C*****SUBROUTINE TREND(I2,IEN,ZMT,VAR,*,*)
003480 SUBROUTINE TREND (I2,IEN,ZMT,VAR,*,*)
003490 DIMENSION T7(2,5),A(4)
003500 COMMON/7/DIF Z(5,500),7/DIF(5,500)/K(5)
003510 DATA LIM,LIM2/4,5/
003520 DIMENSION DIF(500),C1(500),C2(500),C3(500)
003530 WRITE(6,3050)
003540 URITE(9,3050)
003550 FORMAT('C',10X,'SCHLETTUNG DES GRADES DES POLYNOMES')
003560 DO 3000 I=1,5
003570 SOLA=0.
003580 JEN=IEN-I
003590 IF (J.GE.2) GO TO 3002
003600 DO 3001 JA=1, JEN
003610 DIF(JA)=Z(I2,JA+1)-Z(I2,JA)
003620 DUA=DIF(JA)*DIF(JA)
003630 SOLA=SOLA+DUA
003640 GO TO 3003
003650
003660 DO 3004 JI=1, JEN
003670 DIF(JI)=DIF(JI+1)-DIF(JI)
003680 DUA=DIF(JI)*DIF(JI)
003690 SOLA=SOLA+DUA
003700 CONTINUE
003710 SOLA=SOLA/V LOAT(JEN)
003720 N=2*J
003730 ALGO=EXTERNAL TENKO
003740 BINO=FINO(N,J)
003750 SOLAET=SOLA/BINO
003760 URITE(6,3051) J,SOLAET
003770 URITE(9,3051) J,SOLAET
003780 FORMAT(1H,15X,GRAD: ',I1,5X,'SOLAETZUW: ',F12.4)
003790 CONTINUE
003800 C-----ANFRAGE AN TERMINAL -----
003810 URITE(9,3053)
003820 FORMAT(1H,9,'ANGABE DES GRADES DES POLYNOMES IM FORMAT I1')
003830 READ(8,3052) N
003840 FORMAT(I1)
003850 URITE(6,3055)N
003860 FORMAT(1H,15X,'GEMÄBLTER GRAD DES POLYNOMES = ',I1,/)
003870 TZ(1,1)=FLOAT(IEN)
003880 TZ(2,1)=0.
003890 TZ(3,1)=0.
003900 TZ(4,1)=0.
003910 TZ(4,2)=0.
003920 TZ(4,3)=0.
003930 TZ(4,4)=0.
003940 TZ(1,5)=0.
003950 TZ(2,5)=0.
003960 TZ(3,5)=0.
003970 TZ(4,5)=0.
003980 DO 3005 JE=1,IEN
003990 C1(JE)=FLOAT(JE)
004000 C2(JE)=C1(JE)*C1(JE)

```

```

004 010 C3(IE)=C2(IE)*C1(IE)
004 020 C4=C3(IE)*C1(IE)
004 030 C5=C4*C1(IE)
004 040 C6=C5*C1(IE)
004 050 T2(2,1)=T2(2,1)+C1(IE)
004 060 T2(3,1)=T2(3,1)+C2(IE)
004 070 T2(4,1)=T2(4,1)+C3(IE)
004 080 T2(4,2)=T2(4,2)+C4
004 090 T2(4,3)=T2(4,3)+C5
004 100 T2(4,4)=T2(4,4)+C6
004 110 T2(1,5)=T2(1,5)+C(12,IE)
004 120 T2(2,5)=T2(2,5)+C(12,IE)*C1(IE)
004 130 T2(3,5)=T2(3,5)+C(12,IE)*C2(IE)
004 140 T2(4,5)=T2(4,5)+C(12,IE)*C3(IE)
004 150 CONTINUE
3905
004 160 T2(1,5)=T2(1,5)*(-1.)
004 170 T2(2,5)=T2(2,5)*(-1.)
004 180 T2(3,5)=T2(3,5)*(-1.)
004 190 T2(4,5)=T2(4,5)*(-1.)
004 200 T2(1,2)=T2(2,1)
004 210 T2(1,3)=T2(3,1)
004 220 T2(1,4)=T2(4,1)
004 230 T2(2,2)=T2(3,1)
004 240 T2(2,3)=T2(4,1)
004 250 T2(2,4)=T2(4,2)
004 260 T2(3,2)=T2(4,1)
004 270 T2(3,3)=T2(4,2)
004 280 T2(3,4)=T2(4,3)
004 290 I=I+1
004 300 IF(I,EN,1) GOTO 3006
004 310 IF(I,EN,2) GOTO 3007
004 320 IF(I,EN,3) GOTO 3008
004 330 IF(I,EN,4) GOTO 3009
004 340 T2(1,2)=T2(1,5)
004 350 GOTO 3000
004 360 T2(1,3)=T2(1,5)
004 370 T2(2,3)=T2(2,5)
004 380 GOTO 3000
004 390 T2(1,4)=T2(1,5)
004 400 T2(2,4)=T2(2,5)
004 410 T2(3,4)=T2(3,5)
004 420 CALL LINQ( T2,A,H,LIM1,LIM2,A3100)
004 430 GOTO (3010,3011,3012,3013), N
004 440 WRITE(6,3060)M,(A(3D),JD=1,1)
004 450 WRITE(9,3060)M,(A(3D),JD=1,1)
004 460 FORMAT('H',T5,'DIE Koeffizienten der Trendfunktion (Polynom ',I1,
004 470 ' ,GRADEN) sind: ',/,1H ,T17,'A0 = ',E12.6,/,1H ,T17,'A1 = ',
004 480 'E12.6)
004 490 DO 3020 JE=1,IEN
004 500 TREN=A(1)+A(2)*C1(IE)+A(3)*C2(IE)
004 510 ZDF(I2,IE)=Z(I2,IE)-TREN
004 520 CONTINUE
3920
004 530 GOTO 3014
004 540 WRITE(6,3050)M,(A(3D),JD=1,3)
004 550 WRITE(9,3050)M,(A(3D),JD=1,3)
004 560 FORMAT('H',T5,'DIE Koeffizienten der Trendfunktion (Polynom ',I1,
004 570 ' ,GRADEN) sind: ',/,1H ,T17,'A0 = ',E12.6,/,1H ,T17,'A1 = ',
004 580 'E12.6)
004 590 DO 3020 JE=1,IEN
004 600 TREN=A(1)+A(2)*C1(IE)+A(3)*C2(IE)
004 610 ZDF(I2,IE)=Z(I2,IE)-TREN
004 620 CONTINUE
3921
004 630 GOTO 3014
004 640 WRITE(6,3050)M,(A(3D),JD=1,4)
004 650 WRITE(9,3050)M,(A(3D),JD=1,4)
004 660 FORMAT('H',T5,'DIE Koeffizienten der Trendfunktion (Polynom ',I1,
004 670 ' ,GRADEN) sind: ',/,1H ,T17,'A0 = ',E12.6,/,1H ,T17,'A1 = ',
004 680 'E12.6,/,1H ,T17,'A2 = ',E12.6)
004 690 DO 3022 JE=1,IEN
004 700 TREN=A(1)+A(2)*C1(IE)+A(3)*C2(IE)+A(4)*C3(IE)
004 710 ZDF(I2,IE)=Z(I2,IE)-TREN
004 720 CONTINUE
3922

```

```

004810 3014 ZMIT=0.
004820 VAR=0.
004830 DO 3025 JE=1, JEN
004840 VAR=VAR+ZDIF(I2, JE)*ZDIF(I2, JE)
004850 3025 CONTINUE
004860 WRITE(6, 3054)
004870 3054 FORMAT(1H0, '//, T10, '--- TRENDBEREINIGTE ZEITREIHE ---')
004880 3090 RETURN 1
004890 3100 RETURN 2
004900 END
004910 C
004920 C*****SUBROUTINE ADFRAG*****
004930 SUBROUTINE ADFRAG (LAG, NF)
004940 READ(8, 4000) LAG
004950 4000 FORMAT(I3)
004960 WRITE(9, 4001)
004970 4001 FORMAT(1H0, 'ANZAHL DER FREQUENZEN DURCH ANGABE VON NF
004980 1IM FORMAT I3 (LAG < NF < 2....3*LAG)')
004990 READ(8, 4002) NF
005000 4002 FORMAT(I3)
005010 RETURN
005020 END
005030 C
005040 C*****SUBROUTINE GDRUCK*****
005050 C*****AUSDRUCK DER DIFFERENZENGANGLINIE ZUM LANGJAERIGEN MITTELWERT
005060 SUBROUTINE GDRUCK (I2)
005070 COMMON/SY/SYMB(9)/ZXDIF/Z(5, 500), ZDIF(5, 500)
005080 COMMON K(5), VA(5), IEND(5), ZMA(5), ZMI(5)
005090 ZA=ABS(ZMA(I2))
005100 ZI=ABS(ZMI(I2))
005110 IF(ZA.GT.ZI) GOTO 201
005120 F=55./ZI
005130 GOTO 202
005140 201 F=55./ZA
005150 202 FM=1./F
005160 WRITE(6, 210) K(I2), FM, (SYMB(4), IC1=1, 113)
005170 210 FORMAT(///, T55, '**** NR.: ', I4, ' ****',
005180 11H0, T2, 'GEMES-', T12, 'DIFFERENZ', /, 1H , T2, 'SENER ', T12,
005190 1'ZUM', /, 1H , T2, 'HERT', T12, 'LANGJAERIGEN', T55,
005200 2'DIFFERENZENGANGLINIE', /, 1H , T12, 'MITTELWERT', /, 1H ,
005210 3T55, 'MASSSTAB DER DIFFERENZEN:
005220 4', /, 1H , T55, '1 SPALTE=', F7.3,
005230 5' EINHEITEN', /, 1H , T20, 113A1)
005240 IEN=IEND(I2)
005250 DO 200 IA=1, IEN
005260 KM=IFIX(ZDIF(I2, IA)*F)
005270 KDIF=KM+56
005280 WRITE(6, 211) Z(I2, IA), ZDIF(I2, IA), SYMB(2), SYMB(2)
005290 211 FORMAT(1H , T1, F8.2, T10, F8.2, T20, A1, T76, A1)
005300 WRITE(6, 212) (SYMB(1), IC1=1, KDIF), SYMB(3)
005310 212 FORMAT(1H+, T20, 112A1)
005320 200 CONTINUE
005330 RETURN
005340 END
005350 C
005360 C*****SUBROUTINE DIAG*****
005370 C*****AUSDRUCK DES KORRELATIONSDIAGRAMMS
005380 SUBROUTINE DIAG (L1, L2, L3)
005390 DIMENSION FORM(5, 5), FOR(5)
005400 COMMON /AK/ACKOV(7, 101), ACKOR(7, 101)/SY/SYMB(9)//K(5)
005410 DATA FORM/'(1H , T2, 1(F 5.2, 2X))', '(1H , T2, 2(F 5.2, 2X))',
005420 1'(1H , T2, 3(F 5.2, 2X))', '(1H , T2, 4(F 5.2, 2X))',
005430 2'(1H , T2, 5(F 5.2, 2X))'/
005440 WRITE(6, 310)
005450 310 FORMAT(1H0, T70, '0.0', T60, '-0.2', T50, '-0.4', T40, '-0.6', T30, '-0.8',
005460 1T20, '-1.0', T80, '0.2', T90, '0.4', T100, '0.6', T110, '0.8', T120, '1.0')
005470 WRITE(6, 311)
005480 311 FORMAT(1H , T30, 10('+', 9('-')), '+')
005490 DO 300 IF=1, 5
005500 FOR(IF)=FORM(IF, L1)
005510 300 CONTINUE
005520 DO 301 IH=1, 101
005530 IH1=IH-1
005540 WRITE(6, FOR) (ACKOR(I2, IH), I2=L2, L3)
005550 WRITE(6, 312) SYMB(2), IH1
005560 312 FORMAT(1H+, T80, A1, T82, I3)
005570 DO 302 I2=L2, L3
005580 AKOR=IFIX(ACKOR(I2, IH)*50.)+70
005590 WRITE(6, 313) (SYMB(1), IC=1, AKOR), SYMB(I2+2)
005600 313 FORMAT(1H+, 132A1)

```

```

005610 302 CONTINUE
005620 301 CONTINUE
005630 RETURN
005640 END
005650 C
005660 C*****SUBROUTINE KORR1*****
005670 C*****REIHE 2 (KY) LAENGER ALS REIHE 1 (KX) SOMIT AUTOKORRELATION
005680 SUBROUTINE KORR1 (L4,IX,IY,I0IF,IEN,LOGI)
005690 COMMON /AK/ACKOV(7,101),ACKOR(7,101)/ZYDIF/Z(5,500),ZDIF(5,500)
005700 1//K(5),VA(5)
005710 LOGICAL LOGI
005720 LOGI=.TRUE.
005730 EN=FLOAT(IEN)
005740 DO 400 IH=1,101
005750 IV=IH-1
005760 IY=IY-IV
005770 ACKO=0.
005780 DO 401 II=1,IY
005790 IK=I+IV
005800 ACKO=ACKO+ZDIF(IY,II)*ZDIF(IY,IK+I0IF)
005810 401 CONTINUE
005820 ACKOV(L4,IY)=ACKO/EN
005830 ACKOR(L4,IY)=ACKOV(L4,IY)/SQRT(VA(IY)*VA(IY))
005840 400 CONTINUE
005850 RETURN
005860 END
005870 C
005880 C*****SUBROUTINE KORR2*****
005890 C*****REIHE 1 (KX) LAENGER ALS REIHE 2 (KY)
005900 SUBROUTINE KORR2 (L4,IX,IY,I0IF,IEN,LOGI)
005910 COMMON /AK/ACKOV(7,101),ACKOR(7,101)/ZYDIF/Z(5,500),ZDIF(5,500)
005920 1//K(5),VA(5)
005930 LOGICAL LOGI
005940 LOGI=.FALSE.
005950 EN=FLOAT(IEN)
005960 DO 500 IH=1,101
005970 IV=IH-1
005980 IY=IY-IV
005990 ACKO=0.
006000 DO 501 II=1,IY
006010 IK=II+IV
006020 ACKO=ACKO+ZDIF(IY,II+I0IF)*ZDIF(IY,IK)
006030 501 CONTINUE
006040 ACKOV(L4,IY)=ACKO/EN
006050 ACKOR(L4,IY)=ACKOV(L4,IY)/SQRT(VA(IX)*VA(IY))
006060 500 CONTINUE
006070 RETURN
006080 END
006090 C
006100 C*****SUBROUTINE ASPEK*****
006110 SUBROUTINE ASPEK (I2,LAG,NF,IEN)
006120 COMMON /AK/ACKOV(7,101),ACKOR(7,101)/SV/SYMB(9)//K(5),VA(5)
006130 DATA PI/3.14159/
006140 XLAG=FLOAT(LAG)
006150 XIEN=FLOAT(IEN)
006160 BANDT=1.333/XLAG
006170 BANDB=1.5/XLAG
006180 BANDP=1.86/XLAG
006190 XIL=XIEN/XLAG
006200 FGB=2.667*XIL
006210 FGP=3.*XIL
006220 WRITE(6,620)K(I2)
006230 620 FORMAT(1H0,/,/,T2,'AUTOSPEKTRUM DER GANGLIMIE ',I4)
006240 WRITE(6,621)LAG,NF,BANDT,FGT,BANDB,FGB,BANDP,FGP
006250 621 FORMAT(1H0,/,T2,'TRUNC.-P.= ',I3,6X,'ANZAHL FREIHEITEN=',I3,
006260 1T50,'BANDBREITE TUKEY = ',F6.3,T85,'ANZAHL FREIHEITSGRADE
006270 1TUKEY = ',F5.1,/,T50,'BANDBREITE BARTLETT = ',F6.3,T85,'ANZAHL
006280 2FREIHEITSGRADE BARTLETT = ',F5.1,/,T50,'BANDBREITE PARZEN = ',
006290 3F6.3,T85,'ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = ',F5.1)
006300 WRITE(6,622)SYMB(3),SYMB(4),SYMB(5)
006310 622 FORMAT(2(/),T3,'FREQ',T10,'PERI',T17,'SP.T',T24,'SP.B',T31,
006320 1'SP.P',/,T19,A1,T26,A1,T34,A1,/)
006330 XNF=FLOAT(NF)
006340 LAG0=LAG-1
006350 DO 600 IP=1,NF
006360 IG=IP-1
006370 XIG=FLOAT(IG)
006380 FREQ=XIG/(2.*XNF)
006390 OMF=PI*XIG/XNF
006400

```

```

006410      SXT=0.
006420      SX0=0.
006430      SXP=0.
006440      DO 601 IZ=1,LAG0
006450      XI7=FLOAT(IZ)
006460      XCOS=COS(PI*XI7/FLAG)
006470      XMT=.5*(1.+XCOS)
006480      XMP=1.-XI7/FLAG
006490      IF (XI7.GT.XLAG/2.) GO TO 602
006500      XMP=1.-6.*(XI7*XI7)/(FLAG*FLAG)+6.*(XI7**3./FLAG**3.)
006510      GO TO 603
006520      602  XMP=2.*((1.-YIZ/FLAG)**3.)
006530      603  QMC=COS(PI*YIZ)
006540      ACK0=ACK0R(IZ,IZ+1)*QMC
006550      SXT=SXT+ACK0*XMT
006560      SX0=SX0+ACK0*XMP
006570      SXP=SXP+ACK0*XMP
006580      601  CONTINUE
006590      SPT=2.*(1.+2.*SXT)
006600      SPD=2.*(1.+2.*SX0)
006610      SPP=2.*(1.+2.*SXP)
006620      KT=FIX(SPT)+43
006630      IF (KT.GT.132) KT=132
006640      KP=FIX(SPD)+43
006650      IF (KP.GT.132) KP=132
006660      KP=FIX(SPP)+43
006670      IF (KP.GT.132) KP=132
006680      IF (Z.G.EQ.' ') GO TO 604
006690      PER=1./FREQ
006700      WRITE(6,650)FREQ,PER,SPT,SPD,SPP,SYMB(2)
006710      650  FORMAT(1H',F5.3,2X',F5.1,3(1X,F6.2),T45,A1)
006720      GO TO 610
006730      604  WRITE(6,651)FREQ,PER,SPT,SPD,SPP,SYMB(2)
006740      651  FORMAT(1H',F5.3,2X',10HEX',3(1X,F6.2),T45,A1)
006750      610  WRITE(6,652)(SYMB(1),IC1=1,KT),SYMB(3)
006760      WRITE(6,652)(SYMB(1),IC1=1,KP),SYMB(4)
006770      WRITE(6,652)(SYMB(1),IC1=1,KP),SYMB(5)
006780      652  FORMAT(1H'+,1F20.1)
006790      600  CONTINUE
006800      RETURN
006810      END
006820
006830      C*****SUBROUTINE AMPLIT *****
006840      SUBROUTINE AMPLIT (I2,IEN,PERIOD)
006850      COMMON/ZYDEF/7(5,500),7DEF(5,500)
006860      DATA PI/3.14159/
006870      ZC=0.
006880      ZS=0.
006890      SIQUA=0.
006900      COQUA=0.
006910      CS=0.
006920      DO 5000 I=1,IEN
006930      XI=(FLOAT(I))/PERIOD*PI
006940      SI=SIGN(XI)
006950      CO=COS(XI)
006960      ZC=ZC+7DEF(I2,I)*CO
006970      ZS=ZS+7DEF(I2,I)*SI
006980      SIQUA=SIQUA+SI*SI
006990      COQUA=COQUA+CO*CO
007000      CS=CS+CO*SI
007010      5000  CONTINUE
007020      A1=ZC*SIQUA-ZS*CS
007030      Q=CQUA*SIQUA-CS*CS
007040      A=A1/Q
007050      Q1=ZS*COQUA-ZC*CS
007060      Q=Q1/Q
007070      C=SQRT(A**2+Q**2)
007080      PHI=ATAN2(-Q,A)
007090      KPERIO=FIX(2.*PERIOD)
007100      WRITE(6,5010) KPERIO,C
007110      WRITE(6,5010) KPERIO,C
007120      5010  FORMAT(///,T10,'DIE AMPLITUDE DER ',I3,'-MONATSPERIODE BETRAEGT:
007130      1',F10.4,' EINHEITEN')
007140      WRITE(6,5011) PHI
007150      WRITE(6,5011) PHI
007160      5011  FORMAT(/,T10,'DIE PHASENVERSCHIEBUNG BETRAEGT: ',
007170      1F10.4)
007180      RETURN
007190      END
007200      C

```

TUKEY
BARTLETT
PARZEN

```

007210 C*****SUBROUTINE CSPEK*****
007220 SUBROUTINE CSPEK (IC,IN,LAS,NF)
007230 COMMON /AW/ACKOV(7,101),ACKOR(7,101)/ASPE/SKOUT(2,200),
007240 SKOVB(2,200),SKOVP(2,200)
007250 DATA PI/3.14159/
007260 XLAS=FLOAT(LAS)
007270 XIF=FLOAT(NF)
007280 LAS0=LAS-1
007290 DO 6000 IP=1,NF
007300 IC=IP-1
007310 YIG=FLOAT(IC)
007320 OM=PI*XIG/XIF
007330 SXKVT=0.
007340 SXKVB=0.
007350 SXKVP=0.
007360 DO 6001 IZ=1,LAS0
007370 YIZ=FLOAT(IZ)
007380 YCNS=CNS(PI*XIZ/XLAS)
007390 HMT=.5*(1.+XCNS)
007400 HMP=1.-XIZ/XLAS
007410 IF (XIZ.GT.XLAS/2.) GOTO 6002
007420 HMP=1.-6.*((YIZ*XIZ)/(XLAS*XLAS))+6.*(XIZ**3./XLAS**3.)
007430 GOTO 6003
007440 6002 HMP=2.*((1.-XIZ/XLAS)**3.)
007450 6003 OMC=CNS(OM*XIZ)
007460 ACK=ACKOV(IN,IP+1)*OMC
007470 SXKVT=SXKVT+ACK*HMT
007480 SXKVB=SXKVB+ACK*HMP
007490 SXKVP=SXKVP+ACK*HMP
007500 6001 CONTINUE
007510 SKOVB(IP,IP)=2.*(ACKOV(IN,1)+2.*SXKVB)
007520 SKOVP(IP,IP)=2.*(ACKOV(IN,1)+2.*SXKVP)
007530 SKOVB(IP,IP)=2.*(ACKOV(IN,1)+2.*SXKVB)
007540 6000 CONTINUE
007550 RETURN
007560 END
007570 C
007580 C*****SUBROUTINE CSPEK*****
007590 SUBROUTINE CSPEK (KX,KY,IB,I9,LAG,LAS,NF,LS0,IEM)
007600 COMMON /ASPE/SKOUT(2,200),SKOVB(2,200),SKOVP(2,200)/GU/GERA(101),
007610 IUNGERA(101)/SY/SYMB(9)
007620 DIMENSION PHAST(200),PHASB(200),PHASP(200),GRADT(200),GRADB(200),
007630 GRADP(200),CHET(200),CHEB(200),CHEP(200),FREN(200),PER(200)
007640 DATA PI/3.14159/,ZHEIPI/6.28318/
007650 XLAS=FLOAT(LAS)
007660 XIEM=FLOAT(IEM)
007670 XIL=XIEM/XLAS
007680 BANDT=1.333/XLAS
007690 BANDB=1.5/XLAS
007700 BANDP=1.06/XLAS
007710 FGT=2.667*XIL
007720 FGB=3.*XIL
007730 FGP=3.71*XIL
007740 WRITE(6,725)KX,KY
007750 725 FORMAT(1H0,///,T2,'KREUZSPEKTREN AUS DEN REIHEN ',I4,' UND ',I4)
007760 WRITE(6,726)LAG,NF,BANDT,FGT,BANDB,FGB,BANDP,FGP
007770 726 FORMAT(1H0,/,T2,'TRUNC.-P.= ',I3,6X,'ANZAHL FREQUENZEN= ',I3,
007780 1T50,'BANDBREITE TUKEY = ',F6.3,T85,'ANZAHL FREIHEITSGRADE
007790 1TUKEY = ',F5.1,/,T50,'BANDBREITE BARTLETT = ',F6.3,T85,'ANZAHL
007800 2FREIHEITSGRADE BARTLETT = ',F5.1,/,T50,'BANDBREITE PARZEN = ',
007810 3F6.3,T85,'ANZAHL FREIHEITSGRADE PARZEN = ',F5.1)
007820 WRITE(6,740)SYMB(3),SYMB(4),SYMB(5),SYMB(6),SYMB(7),SYMB(8)
007830 740 FORMAT(1H0,///,T2,'AMPLITUEDEN- UND GAINSPAKTRUM',/,T20,
007840 1'AMPLITUEDENSPEKTRUM',T110,'GAINSPAKTRUM',/,
007850 2T95,'0.0',T106,'10',T116,'20',T126,'30',/,T96,
007860 33('+',9(' - ')),',/,T3,'FREQ',T10,'PERI',
007870 4T17,'AN.T',T24,'AM.B',T31,'AM.P',T38,'GA.T',T45,'GA.B',T52,
007880 5'GA.P',/,T10,A1,T26,A1,T33,A1,T40,A1,T47,A1,T54,A1)
007890 LAS0=LAS-1
007900 XNF=FLOAT(NF)
007910 ZPI=180./PI
007920 S=FLOAT(LS0)
007930 ALIG=ZHEIPI*S
007940 DO 7000 IP=1,NF
007950 IC=IP-1
007960 YIG=FLOAT(IC)
007970 FREQ(IP)=YIG/(2.*XNF)
007980 OM=PI*XIG/XNF
007990 CSXT=0.
008000 CSXB=0.

```



```

008810 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGAINB),SYMB(7)
008820 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGAINB),SYMB(8)
008830 700 CONTINUE
008840 WRITE(6,733)SYMB(3),SYMB(4),SYMB(5)
008850 733 FORMAT(1H ,//,T2,'PHASENSPEKTRUM',/,T48,'-360',T58,'-270',
008860 1T68,'-180',T78,'-90',T90,'0',T99,'90',T109,'180',T119,'270',
008870 2T129,'360',/,T50,8('+'-'')),'+',/,T3,'FREQ',T10,'PERI',T17,
008880 3'GRAD',T25,'GRAD9',T33,'GRADP',/,T19,A1,T26,A1,T33,A1)
008890 WRITE(6,731)FREQ(1),GRAD(1),GRAD9(1),GRADP(1),SYMB(2)
008900 731 FORMAT(1H ,F5.3,2X,'UNEN',3(1X,F7.1),T90,A1)
008910 KGRAD=FIX(GRAD(1)/9.)+88
008920 KGRAD9=FIX(GRAD9(1)/9.)+88
008930 KGRADP=FIX(GRADP(1)/9.)+88
008940 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRAD),SYMB(3)
008950 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRAD9),SYMB(4)
008960 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRADP),SYMB(5)
008970 DO 710 J=2,NF
008980 KGRAD=FIX(GRAD(J)/9.)+88
008990 IF(KGRAD.GT.130) KGRAD=130
009000 IF(KGRAD.LT.48) KGRAD=48
009010 KGRAD9=FIX(GRAD9(J)/9.)+88
009020 IF(KGRAD9.GT.130) KGRAD9=130
009030 IF(KGRAD9.LT.48) KGRAD9=48
009040 KGRADP=FIX(GRADP(J)/9.)+88
009050 IF(KGRADP.GT.130) KGRADP=130
009060 IF(KGRADP.LT.48) KGRADP=48
009070 WRITE(6,732)FREQ(J),PER(J),GRAD(J),GRAD9(J),GRADP(J),SYMB(2)
009080 732 FORMAT(1H ,F5.3,2X,F5.1,3(1X,F7.1),T90,A1)
009090 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRAD),SYMB(3)
009100 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRAD9),SYMB(4)
009110 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KGRADP),SYMB(5)
009120 710 CONTINUE
009130 WRITE(6,734)
009140 734 FORMAT(1H ,//,T2,'KORREKTURSPKTRUM')
009150 WRITE(6,730)
009160 730 FORMAT(1H ,T40,'0.0',T50,'0.2',T60,'0.4',T70,'0.6',T80,'0.8',
009170 1T90,'1.0')
009180 WRITE(6,730)
009190 730 FORMAT(1H ,T50,5('+'-'')),'+')
009200 WRITE(6,735)SYMB(3),SYMB(4),SYMB(5)
009210 735 FORMAT(1H ,T3,'FREQ',T10,'PERI',T17,'K.T',T24,'K.9',T31,'K.P',/,
009220 1T40,A1,T26,A1,T33,A1)
009230 WRITE(6,736)FREQ(1),COR(1),COR9(1),CORP(1),SYMB(2)
009240 736 FORMAT(1H ,F5.3,2X,'UNEN',3(1X,F6.2),T50,A1)
009250 KOR=FIX(COR(1)*50.)+48
009260 KOR9=FIX(COR9(1)*50.)+48
009270 KORP=FIX(CORP(1)*50.)+48
009280 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KOR),SYMB(3)
009290 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KOR9),SYMB(4)
009300 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KORP),SYMB(5)
009310 DO 711 J=2,NF
009320 KOR=FIX(COR(J)*50.)+48
009330 IF(KOR.GT.130) KOR=130
009340 KOR9=FIX(COR9(J)*50.)+48
009350 IF(KOR9.GT.130) KOR9=130
009360 KORP=FIX(CORP(J)*50.)+48
009370 IF(KORP.GT.130) KORP=130
009380 WRITE(6,737)FREQ(J),PER(J),COR(J),COR9(J),CORP(J),SYMB(2)
009390 737 FORMAT(1H ,F5.3,2X,F5.1,3(1X,F6.2),T50,A1)
009400 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KOR),SYMB(3)
009410 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KOR9),SYMB(4)
009420 WRITE(6,741)(SYMB(1),IC=1,KORP),SYMB(5)
009430 711 CONTINUE
009440 741 FORMAT(1H +,132A1)
009450 RETURN
009460 END

```


BERLINER GEOWISSENSCHAFTLICHE ABHANDLUNGEN

Freie Universität Berlin — Technische Universität Berlin — Technische Fachhochschule Berlin

Bisher sind erschienen:

Reihe A

Band 1 / Götz Knoche: Zur Stratigraphie und Petrographie paläozoischer Sedimente am Ost-
rand der Serra S. Bruno (Kalabrien, Süditalien), 67 S., 48 Abb., 3 Taf. 1977. DM 19,—.

Band 2 / Peter Eggert: Sedimentpetrographisch-stratigraphische Untersuchungen in den Unter-
kreide-Serien und dem Bolgenkonglomerat (Oberkreide) der Feuerstätter Decke im Allgäu
und Vorarlberg. 167 S., 38 Abb., 18 Taf. 1977. DM 35,—.

Band 3 / Horst Grotjohann: Die Korrelation von Geochemie und Faziesdifferenzierung im erz-
höffigen Muschelkalk (Mitteltrias) der Ostalpen. 70 S., 34 Abb., 5 Taf., 10 Tab. 1978.

Friedrich F. Helmdach: Nichtmarine Ostrakoden aus der spanischen Oberkreide. 8 S.,
5 Abb., 1 Tafel. 1978. DM 23,—.

Band 4 / Christian Preller: Trend- und Spektralanalysen von Grundwasserstandsganglinien und
klimatologischen Reihen zur Ermittlung der Grundwasserneubildung in drei Gebieten von
Berlin (West). 84 S., 27 Abb., 22 Taf., 3 Tab., 1978. DM 19,—.

Reihe B

Band 1

Heft 1: Joachim Steinbeck, Modellseismische Untersuchungen von Rayleighwellen unter beson-
derer Berücksichtigung einer Deckschicht von variabler Mächtigkeit. 128 S., 58 Abb. 1965.
DM 25,—.

Heft 2: Peter Giese, Versuche einer Gliederung der Erdkruste im nördlichen Alpenvorland, in
den Ostalpen und in Teilen der Westalpen mit Hilfe charakteristischer Refraktions-Laufzeit-
Kurven sowie eine geologische Deutung. 218 S., 83 Abb. 1965. DM 40,—.

Heft 3: Joachim Meyer, Zur Modulation der erdmagnetischen Aktivität. 72 S., 26 Abb. 1973.
DM 18,—.

Heft 4: Kurt Bram, Zum Aufbau der Kruste und des oberen Mantels im Bereich des westlichen
Grabens des ostafrikanischen Grabensystems und im östlichen Zaire-Becken. Ergebnisse einer
Untersuchung der Raumwellen von Nah-Erdbeben. 65 S., 32 Abb. 1975. DM 25,—.

Heft 5: Detlef Damaske, Der Weltzeitgang der erdmagnetischen Aktivität als magnetosphäri-
scher Modulationseffekt. 75 S., 33 Abb. 1976. DM 20,—.

Heft 6: Michael Leppin, Modellversuche zur erdmagnetischen und magnetotellurischen Tiefen-
sondierung mit Hilfe eines elektrolytischen Troges. 68 S., 39 Abb. 1977. DM 19,—.

Als Hefte 1–6 von Band 1 wurden die ehemaligen „Geophysikalischen Abhandlungen“ des In-
stituts für Geophysikalische Wissenschaften der FU Berlin übernommen.

VERLAG VON DIETRICH REIMER IN BERLIN

Berlin 45, Unter den Eichen 57