

Geologische Abhandlungen Hessen

Band 85

(Bis Band 73: Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung)

Quantitative Wasserhaushaltsbetrachtungen im Einzugsgebiet der Elz (SE-Odenwald / Bauland)

Von

ADALBERT SCHRAFT

Wiesbaden

Mit 13 Abbildungen und 13 Tabellen

Herausgabe und Vertrieb

Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 6200 Wiesbaden

Wiesbaden 1984

Geol. Abh. Hessen	85	60 S.	13 Abb.	13 Tab.	Wiesbaden 1984
-------------------	----	-------	---------	---------	----------------

ISSN 0341—4043

Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung

- 1: JOHANNSEN, A.: Die geologischen Grundlagen der Wasserversorgung am Ostrand des Rheinischen Gebirges im Raume von Marburg-Frankenberg-Borken. 1950. 87 S., 8 Abb., 10 Taf., vergriffen.
- 2: SCHÖNHALS, E.: Die Böden Hessens und ihre Nutzung. Mit einer bodenkundlichen Übersichtskarte 1:300000. 1954. 288 S., 25 Abb., 60 Tab., 15 Taf., vergriffen.
- 3: KUBELLA, K.: Zum tektonischen Werdegang des südlichen Taunus. 1951. 81 S., 14 Abb., 2 Taf., DM 5,-.
- 4: GÖRGES, J.: Die Lamellibranchiaten und Gastropoden des oberoligozänen Meeressandes von Kassel. 1952. 134 S., 3 Taf., DM 7,50.
- 5: SOLLE, G.: Die Spiriferen der Gruppe *arduennensis-intermedius* im Rheinischen Devon. 1953. 156 S., 45 Abb., 7 Tab., 18 Taf., DM 20,-.
- 6: SIMON, K.: Schrittweises Kern- und Messen bodenphysikalischer Kennwerte des ungestörten Untergrundes. 1953. 63 S., 19 Abb., 3 Taf., DM 7,-.
- 7: KEGEL, W.: Das Paläozoikum der Lindener Mark bei Gießen. 1953. 55 S., 3 Abb., 3 Taf., DM 6,-.
- 8: MATTHES, S.: Die Para-Gneise im mittleren kristallinen Vor-Spessart und ihre Metamorphose. 1954. 86 S., 36 Abb., 8 Tab., DM 12,50.
- 9: RABIEN, A.: Zur Taxonomie und Chronologie der Oberdevonischen Ostracoden. 1954. 268 S., 7 Abb., 4 Tab., 5 Taf., DM 17,-.
- 10: SCHUBART, W.: Zur Stratigraphie, Tektonik und den Lagerstätten der Witzenhäuser Grauwacke. 1955. 67 S., 8 Abb., 4 Taf., DM 8,-.
- 11: STREMMER, H. E.: Bodenentstehung und Mineralbildung im Neckarschwemmler der Rheinebene. 1955. 79 S., 35 Abb., 28 Tab., 3 Taf., DM 7,-.
- 12: v. STETTEN, O.: Vergleichende bodenkundliche und pflanzensoziologische Untersuchungen von Grünlandflächen im Hohen Vogelsberg (Hessen). 1955. 67 S., 4 Abb., 2 Tab., 1 Taf., DM 5,50.
- 13: SCHENK, E.: Die Mechanik der periglazialen Strukturböden. 1955. 92 S., 21 Abb., 13 Tab., 10 Taf., DM 12,-.
- 14: ENGELS, B.: Zur Tektonik und Stratigraphie des Unterdevons zwischen Loreley und Lorchhausen am Rhein (Rheinisches Schiefergebirge). 1955. 96 S., 31 Abb., 2 Tab., 15 Diagr., 5 Taf., DM 12,60.
- 15: WIEGEL, E.: Sedimentation und Tektonik im Westteil der Galgenberg-Mulde (Rheinisches Schiefergebirge, Dill-Mulde). 1956. 156 S., 41 Abb., 7 Tab., 7 Taf., DM 18,60.
- 16: RABIEN, A.: Zur Stratigraphie und Fazies des Ober-Devons in der Waldecker Hauptmulde. 1956. 83 S., 2 Abb., 2 Tab., 3 Taf., DM 7,-.
- 17: SOLLE, G.: Die Watt-Fauna der unteren Klerfer Schichten von Greimerath (Unterdevon, Südost-Eifel). Zugleich ein Beitrag zur unterdevonischen Mollusken-Fauna. 1956. 47 S., 7 Abb., 6 Taf., DM 5,-.
- 18: BEDIKER, E., u. a.: Beiträge zur Geologie des Vorspessarts. 1957. 167 S., 65 Abb., 18 Tab., DM 13,-.
- 19: BISCHOFF, G.: Die Conodonten-Stratigraphie des reno-herzynischen Unterkarbons mit Berücksichtigung der *Wocklumeria*-Stufe und der Devon/Karbon-Grenze. 1957. 64 S., 1 Abb., 2 Tab., 6 Taf., DM 8,-.
- 20: PILGER, A. & SCHMIDT, W.: Die Mullion-Strukturen in der Nord-Eifel. 1957. 53 S., 42 Abb., 1 Tab., 8 Taf., DM 9,80.
- 21: LEHMANN, W. M.: Die Asterozoen in den Dachschiefern des rheinischen Unterdevons. 1957. 160 S., 31 Abb., 55 Taf., DM 30,-.
- 22: BISCHOFF, G. & ZIEGLER, W.: Die Conodontenchronologie des Mitteldevons und des tiefsten Oberdevons. 1957. 136 S., 16 Abb., 5 Tab., 21 Taf., DM 20,-.
- 23: ZÜBELEIN, H. K.: Kritische Bemerkungen zur Stratigraphie der Subalpinen Molasse Oberbayerns. 1957. 91 S., 2 Abb., DM 8,-.
- 24: GUNZERT, G.: Die einheitliche Gliederung des deutschen Buntsandsteins in der südlichen Beckenfazies. 1958. 61 S., 14 Abb., 7 Tab., DM 14,-.
- 25: PAULY, E.: Das Devon der südwestlichen Lahnmulde und ihrer Randgebiete. 1958. 138 S., 41 Abb., 6 Taf., DM 20,-.
- 26: SPERLING, H.: Geologische Neuaufnahme des östlichen Teiles des Blattes Schaumburg. 1958. 72 S., 14 Abb., 5 Tab., 10 Taf., DM 10,-.
- 27: JUX, U. & PFLUG, H. D.: Alter und Entstehung der Triasablagerungen und ihrer Erzvorkommen am Rheinischen Schiefergebirge, neue Wirbeltierreste und das Chirotheriumproblem. 1958. 50 S., 11 Abb., 3 Taf., DM 5,60.
- 28: SCHMIDT, H.: Die Cornberger Fährten im Rahmen der Vierfüßler-Entwicklung. 1959. 137 S., 57 Abb., 9 Taf., DM 15,-.

Geologische Abhandlungen Hessen

Band 85

(Bis Band 73: Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung)

Quantitative Wasserhaushaltsbetrachtungen im Einzugsgebiet der Elz (SE-Odenwald / Bauland)

Von

ADALBERT SCHRAFT

Wiesbaden

Mit 13 Abbildungen und 13 Tabellen

Herausgabe und Vertrieb

Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 6200 Wiesbaden

Wiesbaden 1984

Geol. Abh. Hessen	85	60 S.	13 Abb.	13 Tab.	Wiesbaden 1984
-------------------	----	-------	---------	---------	----------------

ISSN 0341—4043

Schriftleitung

Dr. JOE-DIETRICH THEWS, ALBERT KARSCHNY
Hessisches Landesamt für Bodenforschung
Leberberg 9, 6200 Wiesbaden

© Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Wiesbaden 1984
Printed in Germany

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen — auch auszugsweise — nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without written permission from the publisher.

Satz und Druck: Hof- und Waisenhaus-Buchdruckerei GmbH, Kassel

Kurzfassung: Durch Auswertung von Klima- und Abflußdaten von 22 Jahren (1958 — Februar 1980) konnte für das Einzugsgebiet der Odenwälder Elz (= Arbeitsgebiet) die mittlere jährliche Wasserhaushaltsgleichung aufgestellt werden:

$$N (933 \text{ mm}) = A (382 \text{ mm}) + V (551 \text{ mm})$$

41 % der gefallenen Niederschläge fließen wieder ab (Abflußverhältnis $A/N = 0,41$). Dieses hohe Abflußverhältnis wie auch die langjährige Relation $MNq:NNq = 5,6$ sprechen für ein schlechtes Rückhaltevermögen der Gesteine im Arbeitsgebiet.

Die Ergebnisse für die langjährige Gebietsverdunstung nach HAUDE, THORNTHWAITE, PENMAN und TURC wiesen insgesamt eine hohe Übereinstimmung auf (567 mm/a). Die nach RENGGER und PFAU korrigierten Werte (510 mm/a) lagen aber alle deutlich unter dem über die langjährige Wasserbilanz bestimmten Verdunstungswert (551 mm/a). Diese in der Bilanz fehlende Wassermenge wird als Gebietsverlust interpretiert. Das unterirdische Einzugsgebiet der Schefflenz muß somit in das der Elz eingreifen. Dies wurde auch über das Verhältnis „gemessener Abfluß (am Pegel) zu berechnetem Abfluß (über die Wasserbilanz)“ bestätigt.

In Anlehnung an WUNDT wurde aus dem langjährigen mittleren Grundwasserabfluß die durchschnittliche Grundwasserneubildungsrate ermittelt. Sie beträgt im Gesamtgebiet 149,1 mm/a und ist somit etwas geringer, als der über die Wasserbilanz, unter Berücksichtigung der nutzbaren Feldkapazität, bestimmte Wert von 153,6 mm/a.

Durch die von März 1979 bis Februar 1980 zusätzlich ausgeführten Abflußmessungen konnte das hydrologische Geschehen, zumindest für ein Jahr, detaillierter dargestellt werden.

Überdurchschnittlich hohe Niederschläge (990,5 mm) führten bei einer dem langjährigen Mittel entsprechenden Verdunstung (502 mm) trotz erhöhtem Abfluß (443 mm) zu einer Rücklagenbildung im Gesamtgebiet von 45,5 mm im Untersuchungszeitraum.

Über das Verhältnis „Abfluß eines Teilniederschlagsgebietes zu seiner mittleren Grundwasserspende“ konnten die Größen der unterirdischen Teileinzugsgebiete abgeschätzt werden. Sie weichen z. T. beträchtlich von den oberirdischen ab.

Im Abflußverhalten der Teilgebiete selbst lassen sich in Abhängigkeit von der Morphologie, dem Waldbestand, der Bodenbeschaffenheit und der Hauptkluftrichtung gewisse Unterschiede erkennen. Sichere Indizien für eine Abhängigkeit des Abflußverhaltens von der Geologie waren nicht gegeben.

Durch die Analyse der Trockenwetterabflußmessungen konnten sowohl größere Wasserzutritte, und somit besonders grundwasserreiche Gebiete, als auch Gewässerstrecken mit Gebietsverlusten erkannt werden.

Das Rückhaltevermögen der einzelnen Teileinzugsgebiete wurde durch die MAILLETSche Konstante α der Auslaufkurven beschrieben. Die über die Trockenwetterfallinie (TWL) ermittelte Grundwasserneubildungsrate des Gesamtgebietes (222 mm) liegt ebenfalls über dem langjährigen Mittel. Die Neubildungsraten der Teilgebiete schwanken in weiten Grenzen (40,8 — 306,5 mm).

Abstract: Quantitative considerations concerning the water-balance in the catchment-area of the Odenwälder Elz (SE Odenwald/Bauland)

By researching the meteorological and hydrogeological dates during 22 years (1958 — February 1980) the average yearly equation of the water-balance in the catchment-area of the Odenwälder Elz could be set up:

$$\text{precipitation (933 mm)} = \text{runoff (382 mm)} + \text{evapotranspiration (551 mm)}$$

41 % of the precipitation was recorded as runoff at the water-level gauge in Neckarelz. The high relation between runoff and precipitation as well as the long-term proportion $MNq:NNq = 5.6$ indicate a bad storage ability of the rocks in the investigated area.

The many years' result of the territorial evapotranspiration show — according to HAUDE, THORNTWHAITE, PENMAN and TURC — a generally high degree of concordance (567 mm/a). According to RENGER and PFAU the corrected values of the potential evapotranspiration (about 510 mm/a) lay clearly below the value of evapotranspiration set up by the long-term water balance (551 mm/a). This deficit in water in the water-balance must be interpreted as the result of an interference of the subterranean drainage area of the adjacent river Schefflenz with the catchment-area of the river Elz. This has also been confirmed by the relation „measured runoff (at the water-level-gauge) to calculated runoff (by the water-balance)“.

In accordance with WUNDT the average ground-water recharge rate has been determined by the long-term medium ground-water runoff (in the investigated area about 149 mm/a). In comparison with the value determined by the available water content in the unsaturated soil zone (153.6 mm/a) the difference is small.

Between March 1979 and February 1980 the runoff of the river Elz and several affluents was measured, first at 15 and later at 23 control points. Adding the meteorological dates from the same period, the hydrogeological proceedings in these sub-drainage areas could be shown, at least for one year, in greater detail.

In this period of investigation the precipitation (990.5 mm) in the total catchment-area of the Elz exceeded the long-term average. But even though the runoff (443 mm) was higher than usual, too — the evapotranspiration (502 mm) being in accordance with its average rate — a storage of 45.5 mm was possible.

By means of the relation between the runoff of the sub-catchment-area and the long-term ground-water discharge the size of the subterranean drainage areas could be estimated. The sizes of the catchment- and the (subterranean) drainage areas differ considerably.

Dependent upon the morphology, the forest stand, the condition of the soil and main fissure-direction, there are certain differences in the behaviour of the runoff notable. Yet, the behaviour of the runoff does not seem to be conditioned by lithology.

By analysing the base-flow-measurements regions with greater over- and underflows were detected.

The storage ability of the various sub-drainage areas was described by the MAILLET's constant α . The rate of ground-water recharge in the total drainage area of the Elz (222 mm) exceeds the long-term average, too. The rates of the ground-water recharge in the sub-drainage areas vary from 40.8 to 306.5 mm.

4.2.4. Das Abflußverhalten des Gesamtgebietes sowie das der Teileinzugsgebiete	39
4.2.5. Grundwasserneubildung und A_u -Abfluß	41
4.2.5.1. Der Abflußzuwachs von Elz und Trienz sowie die Abflußspenden der Teilgebiete	41
4.2.5.2. Bestimmung der Grundwasserneubildung aus dem Entleerungsverhalten	43
4.2.6. Wasserbilanz	47
4.3. Fehlerbetrachtung	48
5. Schriftenverzeichnis	50
6. Anhang	52
6.1. Monatssummen des Gebietsniederschlags	52
6.2. Mittlere monatliche Abflußsummen	52
6.3. Pegel Elz Neckarelz, Niedrigste Monatsabflüsse (Tagesmittel)	53
6.4. Mittlere monatliche Abflußspenden des Gesamtgebietes	53
6.5. Abflußverhältnisse der Elz	54
6.6. A_u -Abfluß nach WUNDT	54
6.7. Potentielle Verdunstung	55
6.8. Korrigierte potentielle Verdunstung	57
6.9. Wasserbilanz	59

1. Einführung

Die vorliegenden hydrogeologischen Untersuchungen sind Teil einer Dissertation an der Universität Heidelberg über Wasserhaushalt, Chemismus und Stoffbilanz im Einzugsgebiet der Odenwälder Elz (SCHRAFT 1981, 1983). Sie sollten quantitative Erkenntnisse über den Wasserhaushalt der Festgesteinsgrundwasser im Einzugsgebiet der Elz vermitteln.

Das Arbeitsgebiet (Abb. 1) — es umfaßt eine Fläche von 157 km² — liegt am südöstlichen Odenwaldrand und setzt sich auf die Muschelkalkhöhen des im Süden angrenzenden Baulandes fort [Bl. 6420 Schlossau, 6421 Buchen, 6520 Zwingenberg, 6521 Oberschefflenz, 6620 Mosbach, 6621 Billigheim (Dallau)]. Landschaftlich gehört es zu den Mittelgebirgen. Der höchste Punkt liegt im Quellgebiet der Elz (522 m über NN), die geringste Höhenlage besitzt die Elzmündung bei Neckarelz (140 m über NN). Bei einer Flußlänge von 38,1 km ergibt sich somit für die Elz ein mittleres Gefälle von 1%. Sie gehört zum Einzugsgebiet des Neckars.

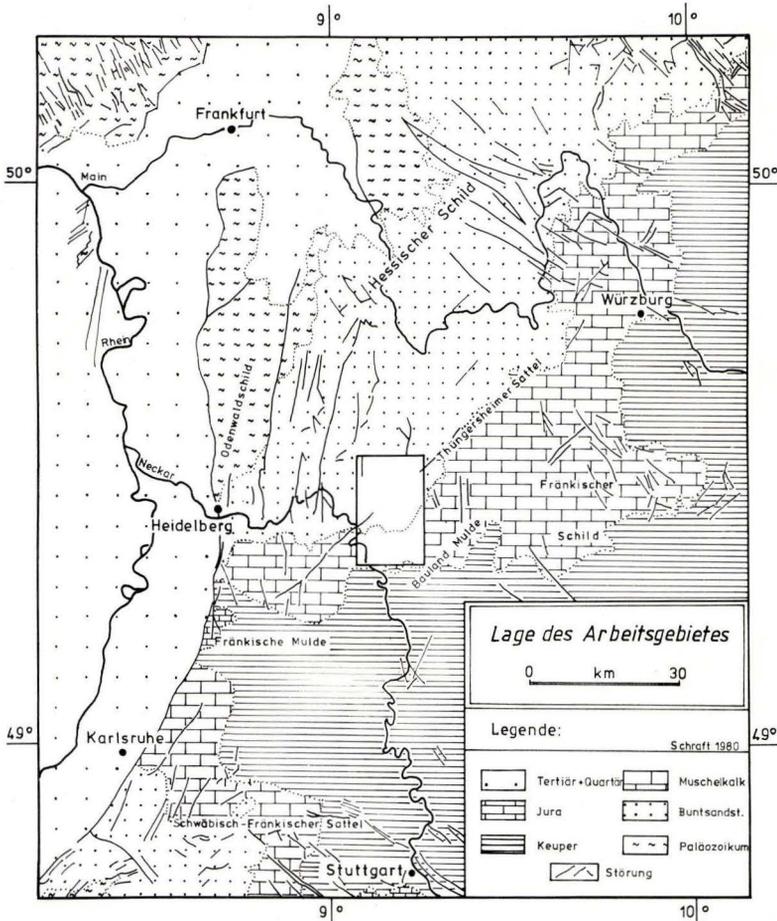


Abb. 1. Lage des Arbeitsgebietes.

Die Anregung zur vorliegenden Arbeit erhielt ich von Herrn Prof. Dr. K. SAUER, Präsident i. R. des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg in Freiburg i. Br., dem ich für sein Interesse am Fortgang der Arbeit sowie für viele nützliche Ratschläge und Diskussionen ganz besonders danke. Herrn Prof. Dr. W. SIMON, Direktor des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Ruprecht-Karl-Universität danke ich für seine wertvolle Unterstützung in allen anfallenden Fragen.

Verschiedene Ämter und Behörden stellten mir Unterlagen und sonstige Hilfsmittel zur Verfügung. Folgenden Dienststellen gilt mein Dank: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg in Karlsruhe, Deutscher Wetterdienst — Zentralamt — in Offenbach, Wasserwirtschaftsamt Heidelberg und der Außenstelle Buchen. — Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für eine 16 monatige finanzielle Unterstützung.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Berechnungen wurden an der IBM/370-168 des Universitätsrechenzentrums Heidelberg an den Bildschirmen IBM 3277 und ITT 3210 durchgeführt. Die Rechenprogramme wurden zu einem Großteil selbst erstellt (in FORTRAN und ALGOL W).

2. Geologie und Petrographie

Das Einzugsgebiet der Odenwälder Elz wird aus einer vom Mittleren Buntsandstein bis zum Oberen Muschelkalk reichenden Gesteinsfolge aufgebaut (Abb. 2). Für die Wassergewinnung sind lediglich Schichten des Mittleren- und Oberen Buntsandsteins sowie bedingt einzelne Horizonte im Unteren Muschelkalk von Interesse. Je nach ihrer Lage zum Vorfluter und den abdeckenden hangenden Schichten kann sich für die einzelnen Schichtglieder eine unterschiedliche hydrogeologische Bedeutung ergeben (Tab. 1).

Der Obere Hauptbuntsandstein ist trotz seiner guten Klüftigkeit und seines relativ geringen Tonanteils nur nördlich der Linie Trienz — Scheringen für die Grundwassererschließung von Relevanz. Da er nach Süden abtaucht und durch den überlagernden tonig gebundenen Karneol-Dolomithorizont keinen hydraulischen Kontakt zum hangenden Plattensandstein besitzt, ist der Grundwasserabfluß stark eingeschränkt. Durch die langen Verweilzeiten nimmt die Mineralisierung des Grundwassers nach Süden zu. Bei Mosbach und Auerbach führen die Schichten des Oberen Hauptbuntsandsteins ein Na-Ca-SO₄-Cl-HCO₃-Mineralwasser (BECKSMANN 1956).

Die überlagernden Plattensandsteine sind nur ein bedingt brauchbarer Grundwasserleiter. Das tonige Bindemittel dieser Gesteine begünstigt die Entstehung von weit aushaltenden Spalten keineswegs. Da die Schichten des Röts dieses Stockwerk auf der Nordseite des Elzbachtales nicht überall vor Verunreinigungen schützen, ist zudem der bakterielle Befund seines Grundwassers nicht immer einwandfrei. Die mehr oder weniger speichernden Gesteine des Platten- und Chirotheriensandsteins sind an der SE-Flanke des Odenwaldes stark zerschnitten, dementsprechend der Grundwasserspeicher, den sie darstellen können, stark zerschlitzt und aufgelöst. Der Chirotheriensandstein kommt deshalb nur zwischen Mosbach und Neckarelz sowie bei Auerbach für die Wassererschließung in Betracht. Sonst liegt er entweder über den Talsohlen (im Norden), so daß sein Wasser in unbedeutenden Quellen ausläuft, oder aber er taucht (nach Süden) unter den Muschelkalk ab, wobei die Gefahr besteht, daß bereits das in ihm gespeicherte Grundwasser versalzen ist, weil es keine Abflußmöglichkeit hat. Beide Grundwasserhorizonte führen im Raum Mosbach gespanntes Spaltengrundwasser. Der starke artesische Auftrieb findet seine Begründung in der hohen Lage des Einzugsgebietes im Odenwald, der Rötton dichtet den Leiter zum Hangenden hin ab.

Die den Buntsandstein nach oben abschließenden Tonsteine des Röts sind mit Ausnahme des lokal in ihnen auftretenden Rötquarzits (bei Nüstenbach, E von Dallau und bei Muckental) als Grundwasserspeicher ungeeignet.

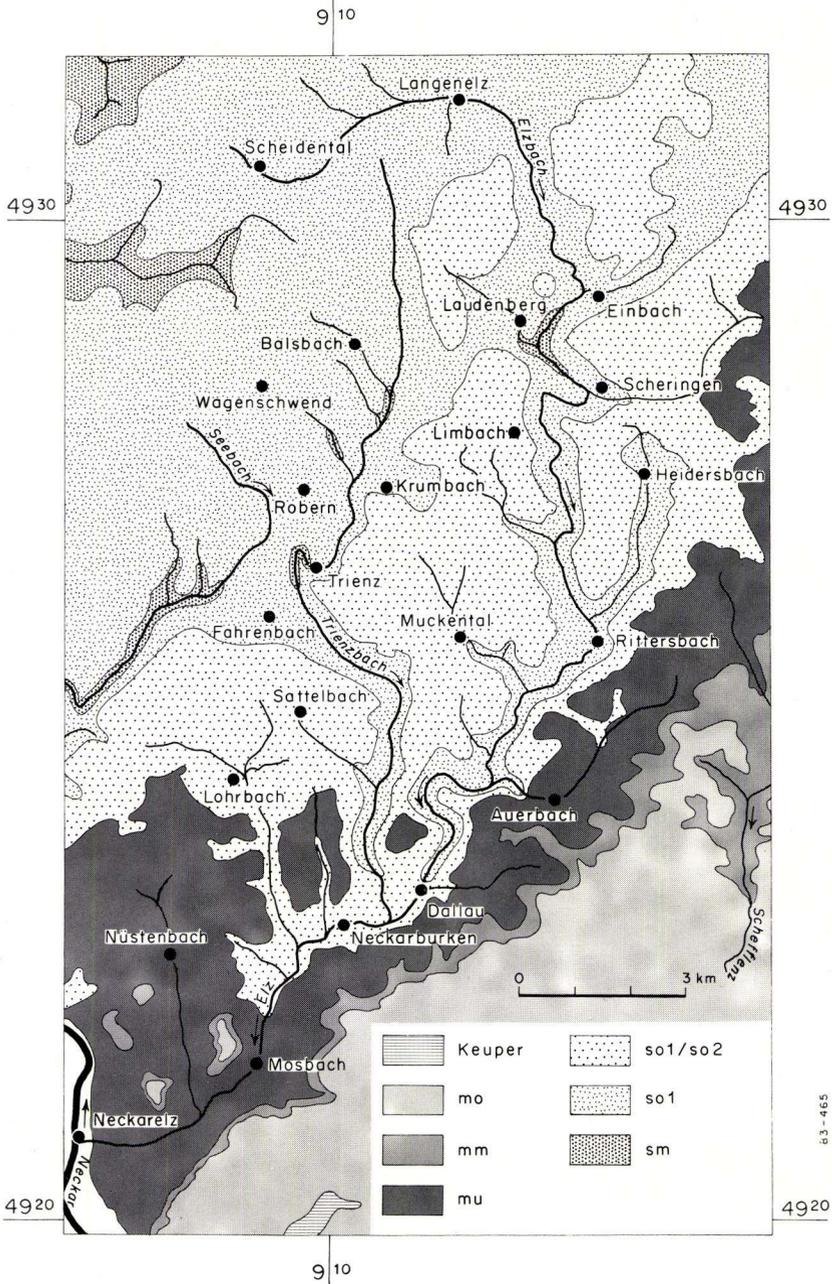


Abb. 2. Geologie im Einzugsbereich der Odenwälder Elz.

83-465

Tab. 1. Stratigraphie und Lithologie

Gruppe	Formation	Mächtigkeit [m]	Gesteinsbeschreibung	GW
mo	mo2 <i>nodosus</i> -Schichten	35—40	dichte, graue, dünnbankige Kalke mit reichlich Mergelzwischenlagen und Einschaltungen von Lumachellenbänken (u.a. <i>cycloides</i> -Bank)	4
	mo1 Trochiten-schichten	30—35 (—40)	engepackte, unebenflächige bis knollige oder knauerige Bankkalke, z.T. mit Bänken aus dichten bis feinkristallinen, reinen Kalken (mit Trochitenstielgliedern), aber auch mit bituminösen, knollig zerfallenen Knauerkalken. Besonders fossilreich sind plattig-schiefrige, mergelige Kalkbänke (<i>Myophoria</i> , <i>Gervilleia</i> und <i>Coenothyris</i>). Im unteren Teil in bergfrischem Zustand blaue Kalke	4
mm	Anhydrit-gruppe	30—40	dunkle, bituminöse Kalksteine sowie graue, blättrig zerfallende Schiefertone und Zellenkalke, -mergel und -dolomite sowie mehr oder minder grobkristalline, durch die Verwitterung gelbliche Dolomite bzw. dolomitische Kalke	4
mu	mu3 Wellenmergel	10—15	bituminöse, plattige Mergel mit geringen Gehalten an Muskovit	4
	mu2 Wellenkalk	45—50	dünnplattige, wulstige und gefurchte Kalke, im unteren Teil z.T. mit höherem Mergelgehalt, über den Schaumkalkbänken dichte, feinkristalline und fossilreiche, dunkelblaugraue Bänke, durch Verwitterung rotbraun gefärbt, mit pseudoolithischen Strukturen; stratigraphisch wichtig: <i>Spiriferina</i> -Bank und die Schaumkalkbänke	2
	mu1 Wellendolomit	20	Mergel und knollig zerfallende Dolomite, z.T. wechselagernd mit mehr oder weniger dolomitischen Schiefer-tonlagen, z.T. mit feinem Sandgehalt und Glimmerschüppchen, sowie grobkristalline (zucker-körnige), hellgraue, feste bis sandig zerfallende Dolomite; stratigraphisch wichtig: <i>ecki</i> - und <i>buchi</i> -Schichten	2
so	so2 Röt	20—25	rote, mehr oder weniger sandige, glimmerführende Schiefertone, zwischengeschaltet sind dünne, feinkörnige, glimmerreiche Sandsteinbänke (u.a. <i>Myophoria</i> -Bank)	i.a. 4
	χ Chirotherien-sandstein	<10	vorwiegend weißer, seltener violetter, roter oder schwärzlicher, fein- bis mittelkörniger, meist sehr fester Quarz-sandstein, dickbankig, stark geklüftet	1/2
	so1 Platten-sandstein	30—45	basale Lagen meist dickbankig mit trennenden Zwischen-lagen aus mürben Sandsteinen oder sandigen Schiefer-tonlagen, in höheren Horizonten dünnbankige bis dünn-plattige, rein sandige bis tonige, feinkörnige Sandsteine, helle Glimmerplättchen parallel den Schichtfugen und nicht selten auf ihnen angereichert	2/3
	α Karneol-Dolomit-Horiz.	ca. 5	mürbe bis leicht verkieselte, feinkörnige, dunkelrote bis -violette, dichte, löcherige Sandsteine	4
sm	sm3 Quarzitischer Hauptbunt-sandstein	50—60 im Arbeits-gebiet	ähnlich sm2, aber zunehmende Kornvergrößerung sowie stärkere Einkieselung, rote Farbe etwas matter und heller als beim sm2, lebhaftes Glitzern der Oberfläche im Sonnenlicht, verursacht durch die vielen Kristallflächen des quarzitischen Bindemittels, geringe Geröllführung	1/2
	sm2 Oberer Hauptbunt-sandstein		rötliche, mürbe bis verkieselte, mittel- bis grobkörnige, tongallenreiche Sandsteine, wechselagernd mit dünn-bankigen, feinkörnigen Sandsteinen	1/2

GW Bedeutung als Grundwasserhorizont:

1 groß

2 bedingt, z.T. nur einzelne Bänke oder bei günstiger Lage zur Vorflut

3 mäßig

4 keine

In den Gesteinen des Unteren Muschelkalkes sind i. a. keine großen Wassermengen gespeichert, da sie über einen erheblichen Tonanteil verfügen und somit nicht die Voraussetzungen für eine gute Verkarstung besitzen (BECKSMANN 1952). Nur aus zwei Horizonten läßt sich unter günstigen Bedingungen Trinkwasser gewinnen: der Dolomitsteinbank-Zone (FINDEISEN 1970) an der Basis des Wellendolomits (μ_1) und den Kalksteinbänken der Schaumkalkzone im höheren Teil des Wellenkalkes (μ_2). Im Raum Mosbach besitzt der Untere Muschelkalk große Verbreitung, doch liegt seine Basis entweder über bzw. nur unbedeutend unter dem Vorflutniveau, so daß er für eine Grundwassererschließung uninteressant ist. Nur zwischen Mosbach und Neckarelz sowie östlich von Dallau kann er zur Grundwassergewinnung herangezogen werden.

Trotz ihrer großen Verbreitung haben quartäre Sedimente (Alte Schotter der Elz sowie Talfüllungen) für die Wassererschließung i. a. keine Bedeutung (CARLÉ 1960). Sie wurden in Tab. 1 daher auch nicht berücksichtigt.

3. Tektonik

Der tektonische Bau des Untersuchungsgebietes ist unkompliziert. Bedingt durch das Fehlen größerer Störungszonen (SCHRAFF 1981), zeigt die Streichkurvenkarte mit dem Karneol-Dolomithorizont als Bezugsfläche auch relativ einfache Lagerungsverhältnisse an (Abb. 3). Das Hauptstreichen der Isobathen ist im NW-Teil des Gebietes vorwiegend NNE, es schwenkt im zentralen Teil auf NE ein und biegt im SE auf ein Streichen von 90° um. Die Schichten zeigen dementsprechend ein schwaches Einfallen von etwa 2° nach SE mit Abweichungen nach E im Nordwesten und nach S im Südosten. In Steinbrüchen zu beobachtende Lagerungsstörungen erreichen bei NE — SW- und NW — SE-Streichen i. a. nur Versatzbeträge von wenigen Dezimetern.

Der einheitliche tektonische Beanspruchungsplan, den die Schichtlagerungskarte vermittelte, wird durch die kleintektonische Aufnahme bestätigt.

Die Auswertung von über 3000 Kluftmessungen aus 24 Steinbrüchen (18 im Plattensandstein und 6 im Unteren Muschelkalk, Abb. 4) ergab, daß in den untersuchten Aufschlüssen mindestens zwei, meist aber drei und mehr Kluftscharen vorhanden sind. Steinbrüche mit nur einer Hauptkluftchar (Hauptmaximum) und einer meist weniger ausgeprägten Gegenkluftchar (Nebenmaximum) dominieren. In den meisten Steinbrüchen schließen Haupt- und Nebenkluftchar einen Winkel von etwa 90° ein. Treten vier Kluftscharen auf, so bilden je zwei Kluftrichtungen ein annähernd orthogonales Kluftsystem. Abhängigkeiten von der Lithologie lassen sich nicht erkennen.

Faßt man alle im Untersuchungsgebiet gemessenen Klüfte zu einer Sammelrose zusammen (Abb. 5, oben links), so treten die Nebenkluftscharen infolge der starken Streuung der Kluftrichtungen in den Einzeldiagrammen stellenweise nur sehr undeutlich in Erscheinung. Die Sammeldarstellung zeigt aber deutlich ein orthogonales Kluftsystem mit zwei fast gleich stark ausgeprägten Kluftscharen. Das Hauptmaximum liegt zwischen 40° und 50° , sein Kluftanteil beträgt 20% aller im Arbeitsgebiet gemessenen Klüfte. Ein kaum weniger deutlich ausgeprägtes Nebenmaximum ist in der 140° -Richtung ausgebildet.

Um ein genaueres Bild über die regionale Verteilung der Hauptkluftrichtungen im Arbeitsgebiet zu erhalten, wurden enger zusammenliegende Steinbrüche zusammengefaßt und die Ergebnisse wiederum in Sammeldiagrammen dargestellt (Abb. 5).

Haupt- und Nebenmaximum der einzelnen Teilbereiche liegen innerhalb des Streubereichs immer in den gleichen Richtungen, wobei jedoch beide Maxima vertauscht sein können.

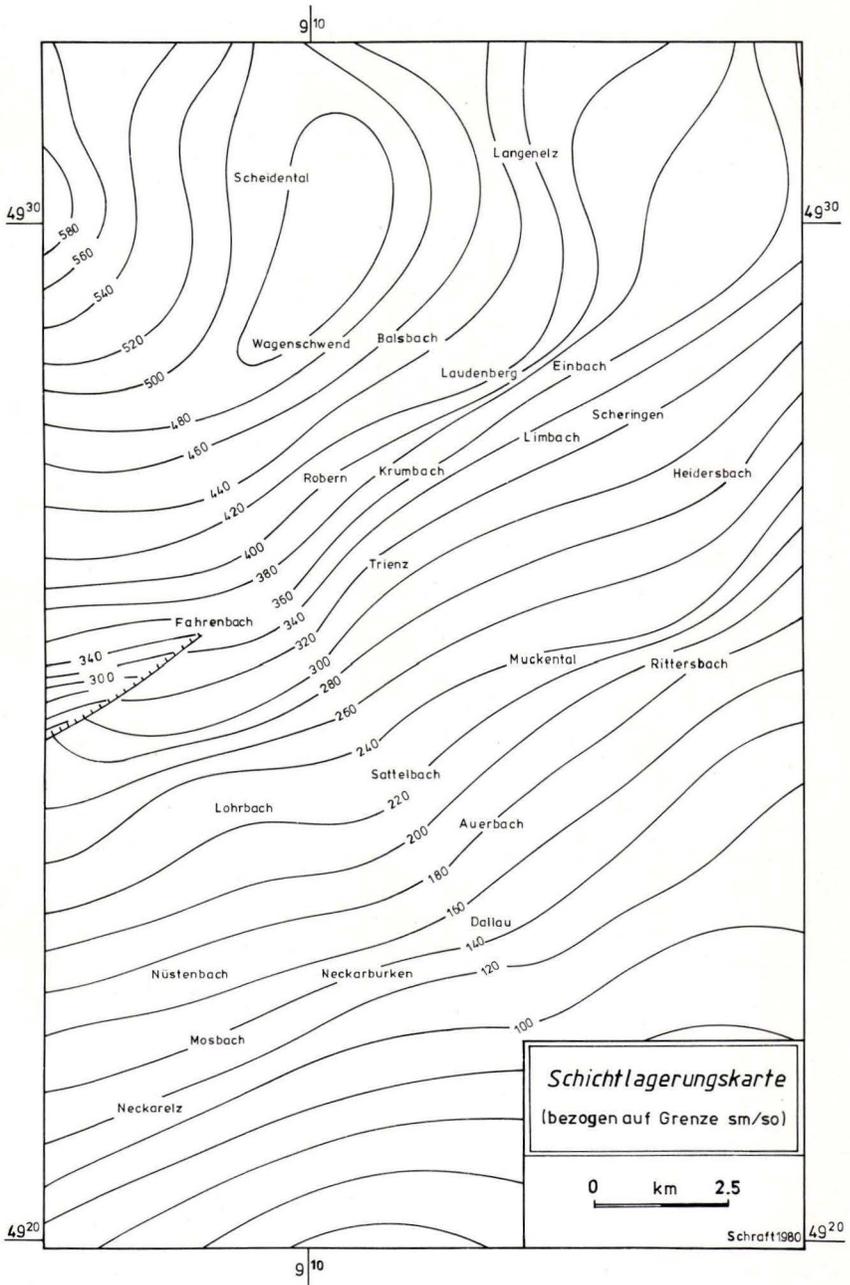


Abb. 3. Schichtlagerung.

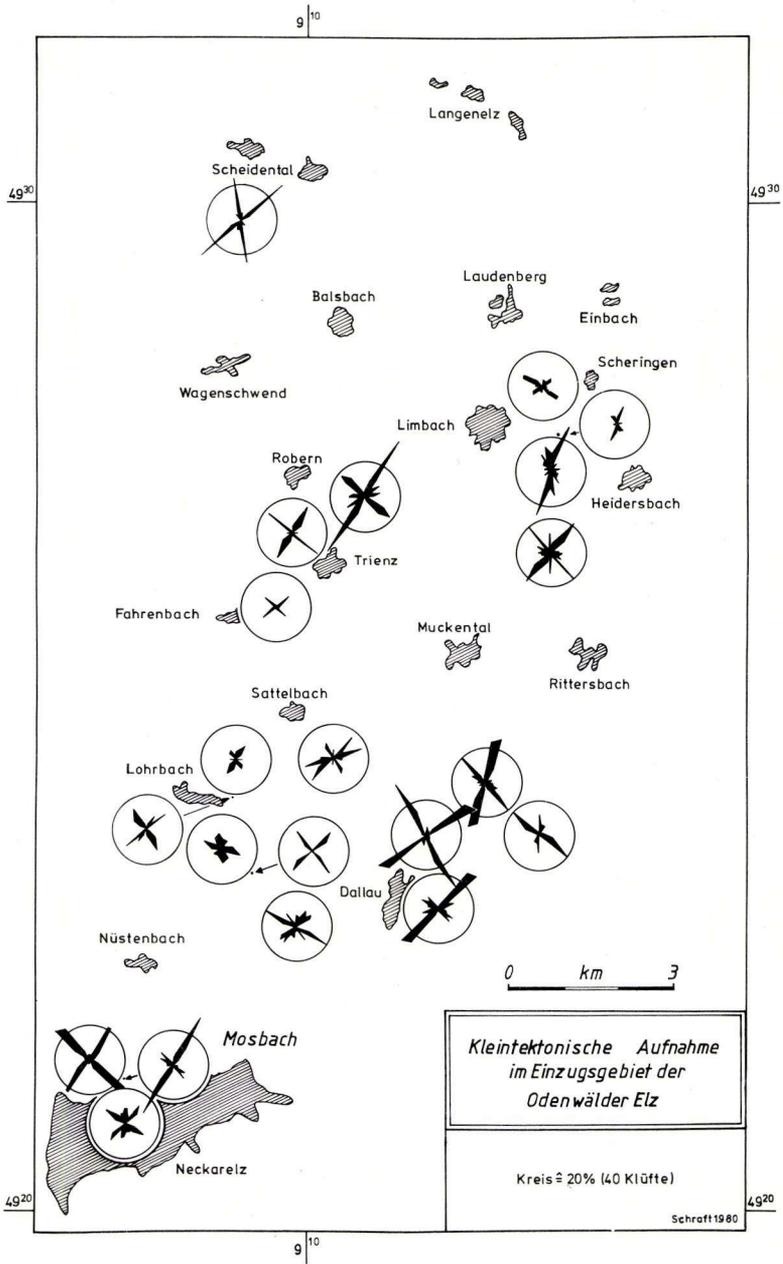
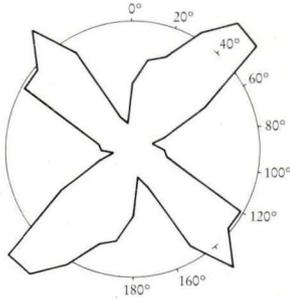


Abb. 4. Kleintektonische Aufnahme im Einzugsgebiet der Odenwälder Elz.

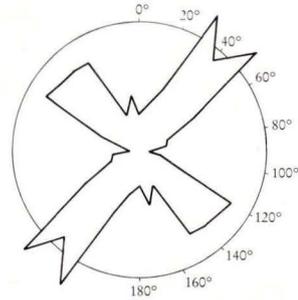
So streicht die vorherrschende Kluftchar im Süden des Arbeitsgebietes (Muschelkalk des Baulandes) im Intervall $40^\circ - 50^\circ$, im Osten ist die 20° -Richtung dominant und im Westen tritt die 40° -Richtung am häufigsten auf.

Meist schwächer ausgeprägte Nebenkluftscharen liegen im Süden bei $130^\circ - 140^\circ$, im Osten bei 90° und 140° und im Westen zwischen 120° und 150° und 165° und 175° .



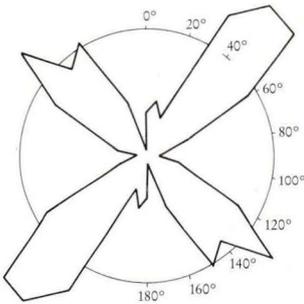
Sammelrose der Klüfte im gesamten Arbeitsgebiet

Zahl der Aufschlüsse: 21
Zahl der Messungen: 2462
Kreisradius: 10%



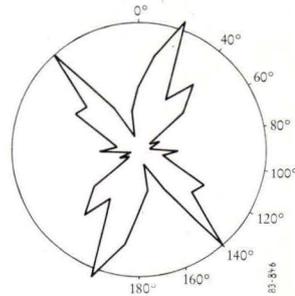
Sammelrose der Klüfte im Westteil des Arbeitsgebietes

Zahl der Aufschlüsse: 10
Zahl der Messungen: 1055
Kreisradius: 10%



Sammelrose der Klüfte im Südteil des Arbeitsgebietes

Zahl der Aufschlüsse: 5
Zahl der Messungen: 1174
Kreisradius: 10%



Sammelrose der Klüfte im Ostteil des Arbeitsgebietes

Zahl der Steinbrüche: 4
Zahl der Messungen: 797
Kreisradius: 10%

Abb. 5. Sammelrosen der Klüfte.

4. Wasserhaushalt

Zur Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen Abfluß, Niederschlag und Verdunstung standen die Aufzeichnungen vom 1. 1. 1958 — 29. 2. 1980 folgender Meßstationen zur Verfügung:

Meteorologische Stationen:

Niederschlag: (Monatssummen)	Niederschlagsstation Niederschlagsstation Niederschlagsstation Niederschlagsstation Niederschlagsstation Klimahauptstation	Diedesheim Unter-Schefflenz Rineck Balsbach Schlossau Buchen
Windgeschwindigkeit		
Rel. Luftfeuchte (Dampfdruck)		Klimahauptstationen
Temperatur (Monatsmittelwerte)		Buchen u. Neudenu
Wirksame Sonnenscheindauer (Monatssummen)		Klimahauptstationen Buchen u. Neudenu
Globalstrahlung (mittlere Tageswerte)		Klimahauptstation Würzburg

Im Untersuchungszeitraum (März 1979 — Februar 1980) standen ferner die täglichen Niederschlagssummen der genannten 6 Stationen zur Verfügung.

Hydrologische Stationen:

Im Arbeitsgebiet war im Untersuchungszeitraum ein Schreibpegel an der Elz in Neckarelz installiert. Die Meßstelle liegt 2,0 km oberhalb der Mündung, am rechten Ufer. Ihr Niederschlagsgebiet umfaßt 157 km². Die Höhe des Pegelnulldpunktes beträgt 139,05 m über NN. Beobachtungswerte (mittlere Tageswerte) stehen seit dem 28. 10. 1957 lückenlos zur Verfügung. Diese Werte liegen den durchgeführten Untersuchungen zugrunde.

4.1. Langjährige Wasserbilanz

4.1.1. Das Niederschlagsdargebot

Das 22jährige Mittel des Gebietsniederschlags im Arbeitsgebiet von Januar 1958 — Februar 1980 beträgt 933 mm/a. Gegenüber dem Mittel 1888 — 1917 (780 mm nach PEPLER 1922) ist der Niederschlag damit heute deutlich höher.

Die langjährige Niederschlagsverteilung im Einzugsgebiet der Elz zeigt deutliche Abhängigkeiten von der Morphologie (Abb. 6). Die Leewirkung der im SE vorgelagerten Höhen des Baulandes bedingen die relativ geringen Niederschlagshöhen der Stationen Unter-Schefflenz und Diedesheim. Mit dem Anstieg auf die Hochebenen des Odenwaldes nehmen die Niederschläge deutlich zu. Die höchsten Niederschläge des Gesamtgebietes fielen mit 974 mm/a auf den Höhen zwischen Rineck und Balsbach, die geringsten in der Gegend von Buchen (777 mm/a). Auf das Gesamtgebiet umgerechnet fallen langfristig in den Wintermonaten etwa die gleichen Niederschlagsmengen wie in den Sommermonaten. Diese Verteilung verschiebt sich zugunsten der Sommermonate (bis 53 %) in den Gebieten mit geringerem Niederschlag. Dies wirkt sich, da in diesen Zeiten die Verdunstung ihre höchsten Werte erreicht, ungünstig auf die Grundwasserneubildung aus.

Die Berechnung der Gebietsniederschläge erfolgte über das Polygon-Verfahren nach THIESSEN (Abb. 7; vergl. SCHAFT 1982 und DISKIN 1969).

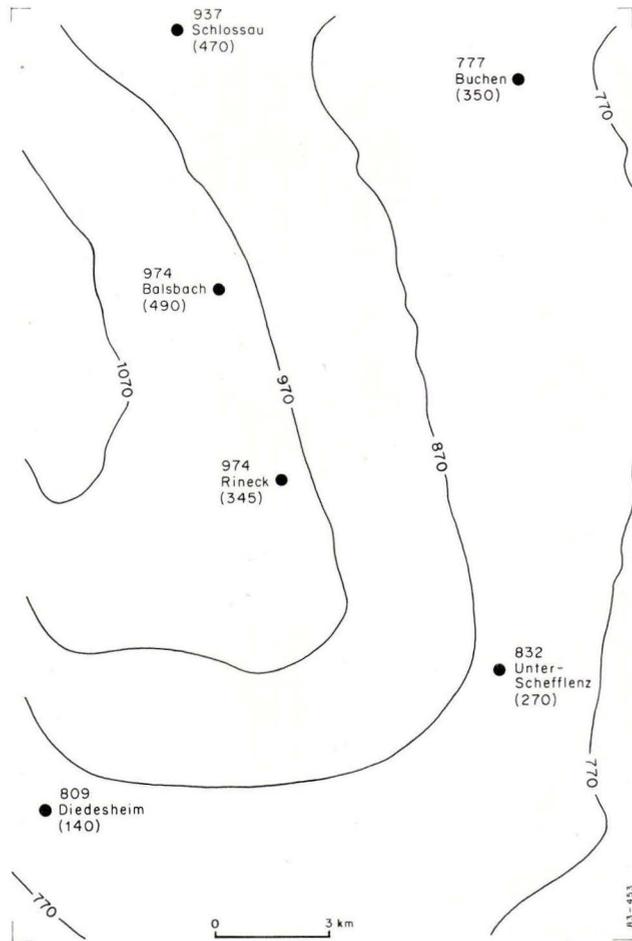


Abb. 6. Isohyeten (20jähriges Mittel des Gebietsniederschlags 1958 — 1977). (Alle Angaben in mm, Zahlen in Klammern geben die NN-Höhen der Stationen an.)

4.1.2. Das Abflußverhalten der Elz

Einen brauchbaren Hinweis auf das Abflußverhalten eines Flußsystems gibt das Abflußverhältnis (A/N). Bei einem Verhältnis $A/N = 0,41$, wie es als langjähriges Mittel im Arbeitsgebiet bestimmt wurde, fließen 41 % der gefallenen Niederschläge wieder ab ($A_{ges} = 382$ mm), davon 73 % im Winter und 27 % im Sommer. Im Vergleich zu anderen Flußgebieten (KELLER in WECHMANN 1964, WUNDT 1953) liegt die Elz mit diesem Verhältnis im Bereich relativ hoher Abflüsse. Dieses hohe Abflußverhältnis wird durch stark schwankende Abflußmengen begünstigt (langjähriges Mittel $NQ : HQ = 1 : 125$). In Naßjahren ist das A/N -Verhältnis besonders hoch (Anhang 6.5).

Nur geringen Einfluß auf die stark wechselnden monatlichen Abflußmengen hat i. a. die Mächtigkeit der aus Löß und Röttonen bestehenden Verwitterungsdecke. Kurzfristig hohe Niederschläge, wie sie für Konvektionsregen typisch sind, führen, bedingt durch eine geringe Permeabilität dieser Böden, zu starken Abflußspitzen des A_0 . Typisch für diese extremen Abflüsse ist der nicht erhöhte A_u -Abfluß (z. B. Feb. 1958, Dez. 1966, Feb. 1970). Die eigentlichen Unterschiede im Abflußverhalten der Elz liegen jedoch in den Eigenschaften der Speichersteine und deren ausreichender Versorgung mit Niederschlagswasser begründet. Bei hohem Grundwasserstand (in den Naßjahren 1965 — 1969, 1974 — 1975) verläuft der A_u -Abfluß durch starken und nur schwach verzögerten Abfluß von kurzfristigem Karstwasser (VILLINGER 1969) in etwa parallel dem Gesamtabfluß und dem Niederschlag.

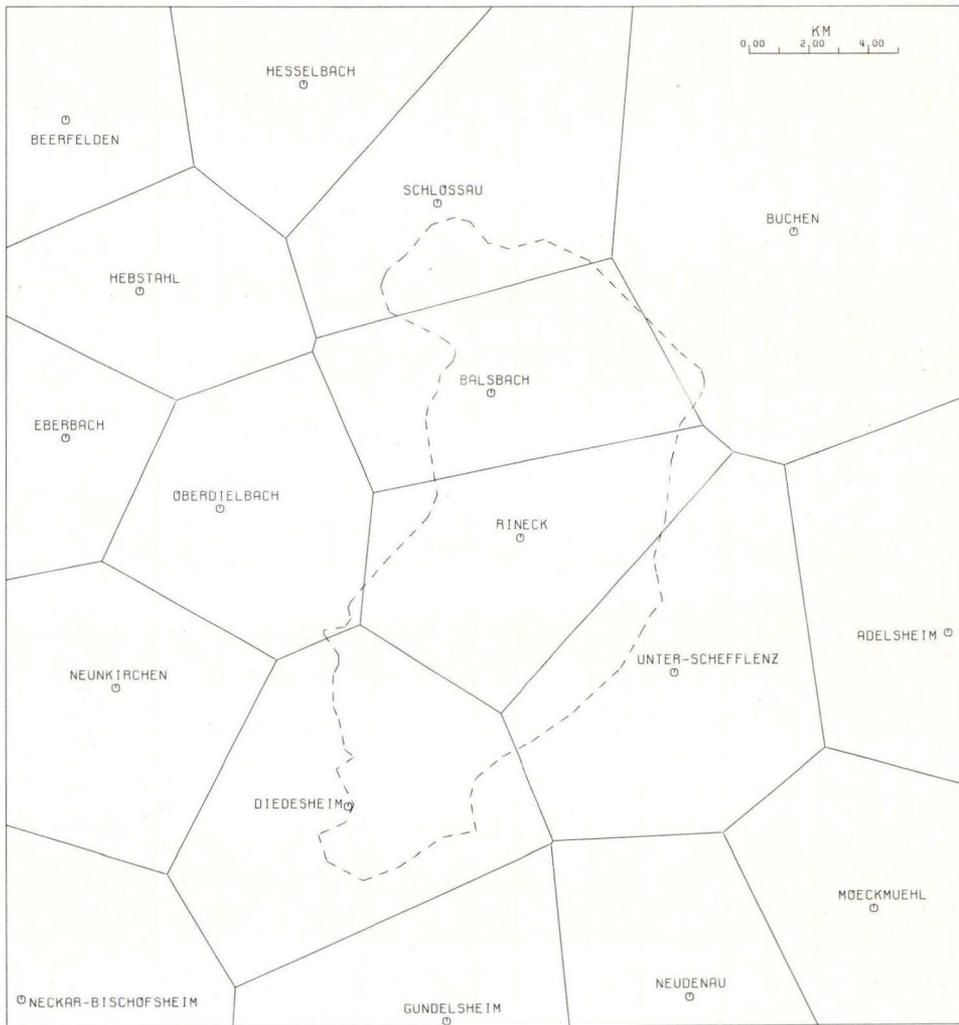
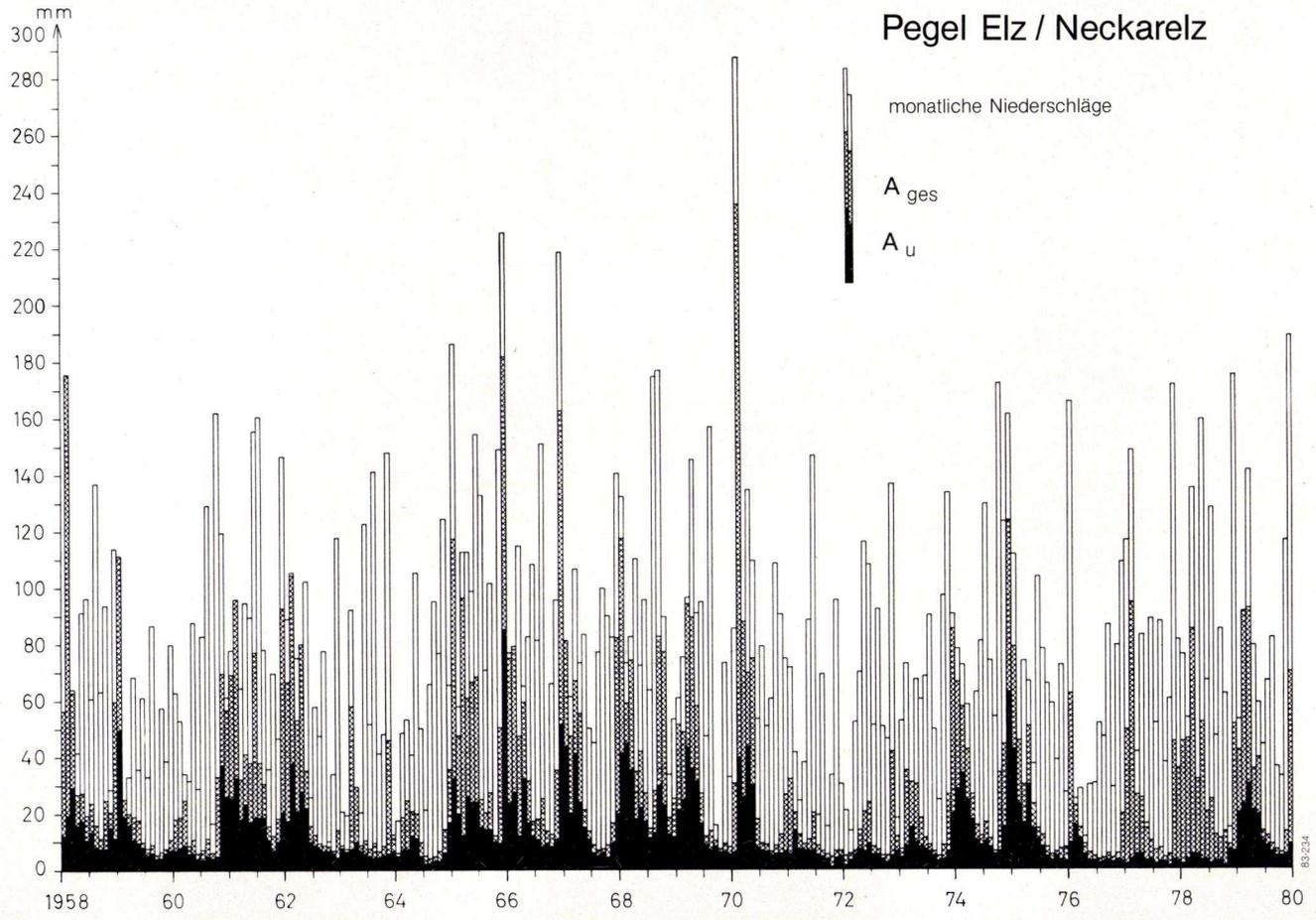


Abb. 7. Lage der Niederschlagsstationen zum Einzugsgebiet.

Abb. 8. Monatliche Niederschläge, A_{ges} und A_u (WINDT), Pegel Elz/Neckarelz.



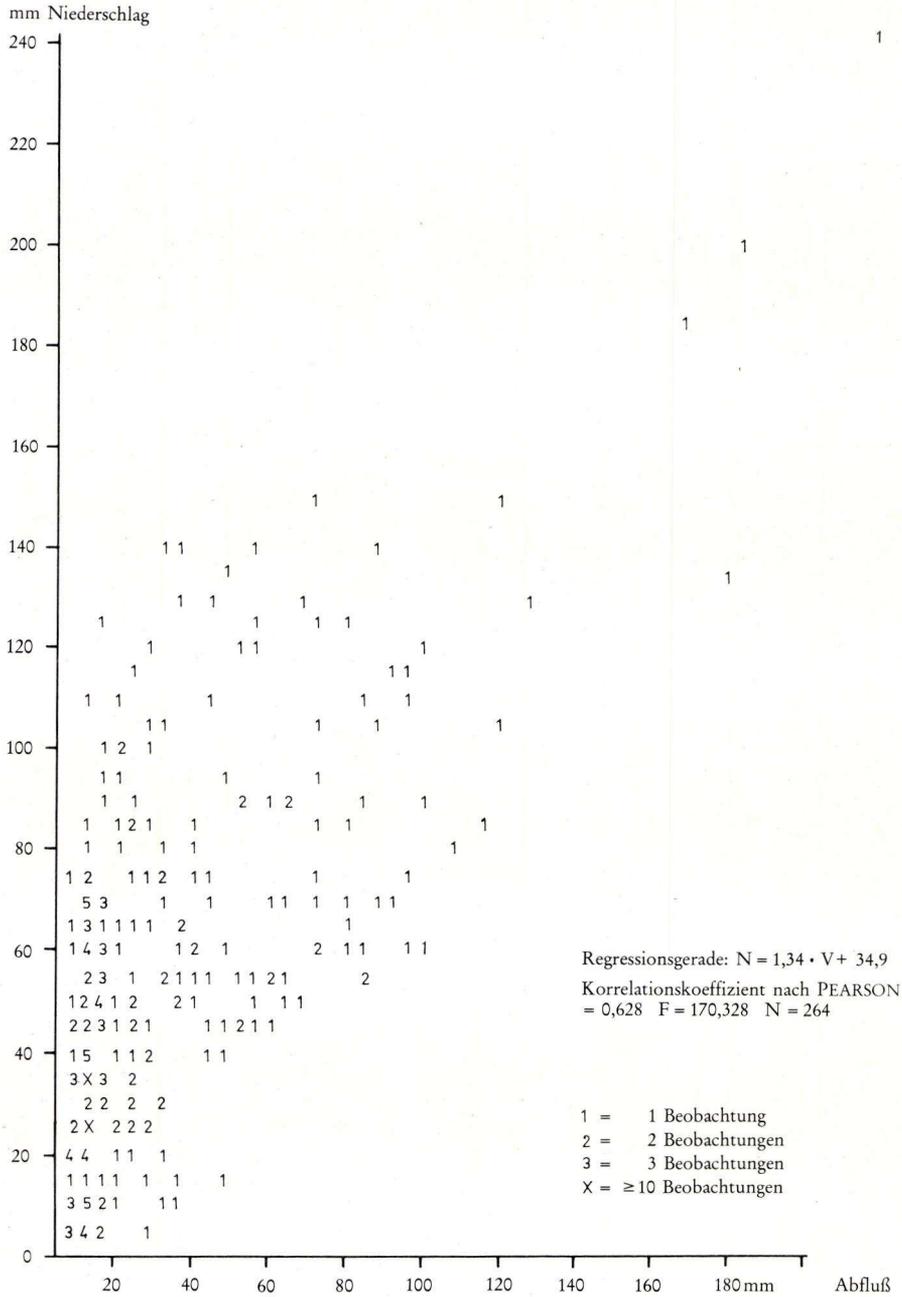


Abb. 9. Korrelation Niederschlag — Abfluß (1958 — 1979).

Während einer längeren Trockenperiode und dementsprechend abnehmender Grundwasservorräte machen sich jedoch die günstigeren hydraulischen Eigenschaften des Buntsandsteins positiv bemerkbar. Die Entleerung des Buntsandstein-Grundwasserspeichers geht langsamer vor sich, so daß aufgrund des höheren Wasserrückhaltevermögens, selbst bei weitgehend entleertem Karstwasserspeicher, im Kluftgrundwasserleiter des Buntsandsteins noch größere Wassermengen für den Abfluß zur Verfügung stehen (1976 — 1978).

Niederschläge nach einer Trockenperiode lassen den Abfluß bis zu einem viertel Jahr verspätet, selbst bei inzwischen abnehmenden Niederschlägen, noch ansteigen (1961 — 1962).

Die im August 1960 einsetzende Niederschlagsperiode regenerierte zuerst die Bodenfeuchte und die aufgebrauchten Vorräte, im Oktober 1960 stieg erstmals der A_O -Abfluß wieder an, ab November — zum Niederschlagsereignis ein viertel Jahr verzögert — auch der A_U -Abfluß. Der Abfluß im ersten Halbjahr 1961 ist im wesentlichen noch eine Folge dieses Niederschlagsereignisses. Trotz der im Juni 1961 neu einsetzenden Regenperiode nimmt sowohl der Gesamts als auch der A_U -Abfluß noch bis Oktober ab. Die erneute Zunahme von A_O - und A_U -Abfluß erfolgte erst im November, nach Abnahme der starken Verdunstung und neu einsetzenden Regenfällen.

Die Zunahme des Gesamtabflusses 1972 — 1975, bei generell abnehmenden Niederschlagshöhen, ist auf höhere Grundwasserabflüsse zurückzuführen (Abb. 8). Die relativ geringen A_U -Abflüsse von 1972 sind noch eine Folge des vorangegangenen Trockenjahres 1971. So wurde ein Großteil der Niederschläge im Winterhalbjahr 1973 zur Ergänzung der Feldkapazitäten aufgebraucht; erst dann setzte mit zunehmender Infiltration die allmähliche Auffüllung der leergelaufenen Speicher ein. Mit Beginn des Sommerhalbjahres 1975 fangen die Speicher an sich zu entleeren, um am Ende dieses Halbjahres etwa den gleichen Grundwasserstand wie Anfang 1972 zu erreichen.

In stärkeren Trockenjahren, wie z. B. 1972, nimmt der A_U -Abfluß schon im Winterhalbjahr ab. Dies wird so erklärt (HOHBERGER 1977: 30), daß infolge der relativ geringen Verkarstung und den z. T. mächtigeren Deckschichten die Niederschlagssummen nicht mehr ausreichen, um entscheidend zur Grundwasserneubildung beizutragen.

Tab. 2. Mittelwerte der Gebietsabflußspende (1958—1978) in $l/s \cdot km^2$

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
MNq	7,39	8,41	7,20	7,20	5,48	3,82
Mq	20,51	25,29	17,58	14,52	10,83	7,96
MHq	109,24	130,00	67,39	45,03	37,45	37,26
	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
MNq	2,99	2,61	2,61	2,23	3,44	7,20
Mq	4,90	4,52	4,59	5,41	9,43	19,43
MHq	27,58	26,75	23,95	26,18	41,97	117,32
	Winter	Sommer	Jahr			
MNq	2,87	1,91	1,78			
Mq	17,71	6,37	11,97			
MHq	218,60	69,55	221,72			

4. 1. 2. 1. A b f l u ß s p e n d e n

Die Abflußspenden wurden für das 157 km² große Einzugsgebiet der Odenwälder Elz aufgrund langjähriger Mittelwerte charakteristischer Hauptzahlen berechnet. Dieses Verfahren liefert repräsentative Mittelwerte für die Abflußspenden, es erlaubt aber auch über die Verhältniszahl MNq : NNq Rückschlüsse auf das Grundwasserrückhaltevermögen eines Einzugsgebiets (WROBEL 1971: 243): Je kleiner diese Verhältniszahl ist, desto langsamer gibt ein Einzugsgebiet seinen Grundwasservorrat ab.

Im Untersuchungsgebiet beträgt die MNq-Spende 1,78 l/s · km² (21jähriges Mittel 1958 — 1978), die NNq-Spende über den gleichen Zeitraum gemittelt 0,32 l/s · km², der Quotient aus MNq- und NNq-Spende somit 5,6. Die niedrige NNq-Spende und die hohe Verhältniszahl sprechen für ein schlechtes Rückhaltevermögen der im Arbeitsgebiet anstehenden Schichtenfolge. Die hohe signifikante lineare Korrelation zwischen N und A (Abb. 9) ist auch in diesem Sinne zu interpretieren.

Für die einzelnen Monate, für die Winter- und Sommerhalbjahre als auch für die Jahre ergeben sich die in Tab. 2 zusammengestellten Mittelwerte. Die Monatswerte der Gebietsabflußspenden sind Anhang 6.4 zu entnehmen.

4.1.3. Die Verdunstung

4. 1. 3. 1. Die potentielle Evapotranspiration

Die aus meteorologischen Daten berechenbare potentielle Verdunstung (ET_{pot}) stellt die bei wassergesättigtem Boden mögliche dar. Von den bekannten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration wurden vier Verfahren (HAUDE, THORNTHWAITE, PENMAN und TURC) mit unterschiedlichen Ausgangsgrößen ausgewählt und danach die monatliche ET_{pot} für 14 bzw. 22 Jahre berechnet (Tab. 3).

Tab. 3. Jahreswerte der ET_{pot} [mm]

Jahr	HAUDE	THORN.	PENMAN	TURC
1958	564,7	607,6		
1959	767,8	642,9		
1960	539,2	621,3		
1961	528,8	630,2		
1962	630,7	584,9		
1963	611,2	615,8		
1964	765,3	630,1		
1965	492,7	595,2		
1966	526,3	631,4	538,6	583,7
1967	576,5	628,9	574,6	610,3
1968	505,1	609,6	531,4	553,9
1969	595,3	613,5	581,5	572,8
1970	584,4	602,3	583,0	554,7
1971	713,4	619,9	630,7	621,4
1972	528,6	593,6	546,8	523,2
1973	693,1	612,9	638,1	549,3
1974	589,8	626,6	616,1	548,3
1975	541,0	621,5	603,9	586,1
1976	667,2	633,5	604,7	602,0
1977	531,8	627,4	490,4	536,7
1978	522,2	598,7	489,6	524,9
1979	595,0	617,1	513,1	556,9

Die ermittelten Monatswerte der potentiellen Verdunstung zeigen nicht immer einen übereinstimmenden Verlauf. Der Grund für auftretende Abweichungen bei ihrer Berechnung nach unterschiedlichen Verfahren liegt in der Auswahl der zugrundegelegten Klimaparameter, die nicht alle den gleichen Jahresgang aufweisen, und der Abhängigkeit von dem Klima, unter dem die Formel aufgestellt wurde. Prinzipiell sind die Abweichungen unter den einzelnen Methoden um so größer, je kürzer der Untersuchungszeitraum ist.

Der langjährige Vergleich der ET_{pot} nach HAUDE, PENMAN, THORNTHWAITE und TURC zeigt im 14- bzw. 22jährigen Mittel eine sehr gute Übereinstimmung aller vier Methoden: Die ET_{pot} nach HAUDE (568,4 mm), PENMAN (567,3 mm) und TURC (566,0 mm) sind als identisch anzusehen, die ET_{pot} nach THORNTHWAITE (616,6 mm) ist im Mittel etwa 49 mm (= 8,6 %) höher. In den einzelnen Jahren allerdings sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren oft recht hoch (Tab. 3). Sie liegen zwischen 2,7 mm im Jahr 1976 (PENMAN und TURC) und 135,2 mm im Jahr 1964 (HAUDE und THORNTHWAITE).

In diesem 14- bzw. 22jährigen Meßintervall schwankt die ET_{pot} der einzelnen Methoden in unterschiedlichen Grenzen:

	Min.	(Jahr)	Max.	(Jahr)	Mittel	Max. — Min.
HAUDE	492,7	(1965)	767,8	(1959)	568,4	275,1
THORNTHWAITE	584,9	(1962)	633,5	(1976)	616,6	48,6
PENMAN	489,6	(1978)	638,1	(1973)	567,3	148,5
TURC	524,9	(1978)	621,4	(1971)	566,0	96,5

Alle Angaben in mm

Die Extremwerte liegen bei der ET_{pot} nach HAUDE am weitesten auseinander: Sie weichen vom Mittelwert bis zu 200 mm ab. Durch diese Schwankungsbreite scheint die ET_{pot} nach HAUDE den klimatischen Verhältnissen in Deutschland besser angepaßt (DAMMANN 1959: 319). Dagegen schwankt die ET_{pot} nach THORNTHWAITE kaum: die Extreme weichen nur bis 30 mm vom langjährigen Mittel ab, das mit 616,6 mm deutlich über den Mittelwerten der anderen drei Methoden liegt.

Die Verteilung der Verdunstung auf die einzelnen Monate (Anhang 6.7) des Jahres zeigt bei allen Verfahren, zumindest in den Sommermonaten, einen ähnlichen Gang, wobei besonders die Werte von PENMAN und TURC eine straffe Korrelation aufweisen. Sie liefern auch die niedrigsten Werte. Die Werte nach THORNTHWAITE sind in der Regel etwas erhöht.

Störend wirken sich die zu geringen Werte für die ET_{pot} von THORNTHWAITE und TURC in den Wintermonaten aus. Dort wird bei Temperaturen unter 0 °C keine Verdunstung mehr angenommen. Durch die relativ hohe Luftfeuchte im Frühjahr bedingt, sind die Verdunstungswerte nach THORNTHWAITE in diesen Monaten zu gering, im Herbst bei geringer Luftfeuchte wiederum zu hoch. In der Jahresbilanz, vor allem bei mehrjährigen Bilanzen, gleichen sich diese Fehl- und Überschußbeträge jedoch so gut aus, daß UHLIG (1954: 13) die Ergebnisse nach THORNTHWAITE und HAUDE innerhalb der Fehlergrenzen als gleichwertig ansieht.

Insgesamt scheint die Formel von PENMAN die Verdunstungsverhältnisse am besten wiederzugeben.

4. 1. 3. 2. Die reelle Evapotranspiration

Die reelle oder aktuelle Evapotranspiration (ET_{reell}) ist die wirklich eingetretene (UHLIG 1954). Sie ist je nach der Wassersättigung des Bodens und dem Zustand der Vegetationsdecke kleiner als die potentielle oder maximal gleich groß. Die ET_{reell} ist im Gegensatz zur ET_{pot} von der Bodenart und der Vegetation abhängig.

4.1.3.2.1. Bestimmung der ET_{reell} aus der ET_{pot} und dem Bodenwasserhaushalt

Die potentielle Verdunstung entspricht nur dann der aktuellen, wenn der Boden ständig ausreichend durchfeuchtet ist, so daß genügend Wasser für die Evapotranspiration zur Verfügung steht. Dies trifft jedoch nur für Naßjahre bzw. für Jahre mit weitgehend gleichmäßiger Niederschlagsverteilung zu. In Trockenjahren sind die Sommerniederschläge oftmals geringer als die berechneten Werte für die ET_{pot} .

Tritt ein Niederschlagsdefizit ($N - A_o < ET_{pot}$) auf (PFAU 1966) oder wird ein bestimmtes Niederschlagsdefizit überschritten (RENGER et al. 1974), so findet keine potentielle Verdunstung mehr statt. Die berechneten Werte für die potentielle Verdunstung müssen über den Bodenwasserhaushalt nach folgender Überlegung zur realen Verdunstung abgemindert werden:

Bleibt die Niederschlagshöhe eines Monats hinter der ET_{pot} des betreffenden Monats zurück, so wird angenommen, daß der Niederschlag völlig von der ET_{pot} aufgebraucht wird. Die verbleibende Höhe der ET_{pot} ist das potentielle Wasserdefizit. Je nach seiner Höhe und dem aktuellen Wassergehalt des Bodens wird es ganz oder teilweise aus der Bodenfeuchte gedeckt. Der Anteil, der aus dem Bodenwassergehalt tatsächlich an die Verdunstung abgeht, wird als reelles Defizit bezeichnet (UHLIG 1959).

Zur Ermittlung der ET_{reell} wird das Verfahren nach PFAU (1966) und RENGER et al. (1974) angewandt. Berechnungsgrundlage für das „PFAU-Verfahren“ ist die potentielle Verdunstung nach THORNTHWAITE, PENMAN und TURC für das „RENGER-Verfahren“ die von HAUDE. Beide Verfahren unterscheiden sich praktisch nur in der Bestimmung des realen Defizits.

Die ET_{pot} nach HAUDE wird einem Vorschlag von RENGER et al. (1974) entsprechend wie folgt korrigiert:

Tritt ein potentielles Defizit auf, wird es ganz oder teilweise aus der nutzbaren Feldkapazität nF (im Arbeitsgebiet 125 mm) gedeckt. Der dadurch verminderte Wassergehalt wird als Ausgangswert des nächsten Monats eingesetzt. Unterschreitet der Wassergehalt 70 % der nutzbaren Feldkapazität, so wird die Verdunstung nach folgender Formel abgemindert:

$$ET_{reell} = ET_{pot} \cdot \left[0,2 + 2 \frac{\% nF}{100} - 1,2 \left(\frac{\% nF}{100} \right)^2 \right] \quad \langle \text{mm/Mon.} \rangle$$

Die aktuelle Feldkapazität ergibt sich dann aus:

$$nF_{(m)} = nF_{(m-1)} + (N - ET_{reell})$$

wobei der Index $m-1$ andeuten soll, daß es sich um die nF des Vormonats handelt.

In Anlehnung an PFAU (1966) wird das reelle Defizit wie folgt bestimmt:

Tritt ein potentielles Defizit auf, so sinkt die Feldkapazität auf:

$$nF_{(m)} = \frac{nF_{(m-1)}}{\left(\frac{|N - A_o - ET_{pot}|}{nF_{\alpha}} \right)^e} \quad \langle \text{mm/Mon.} \rangle$$

$nF_{(m)}$ = Wassergehalt des Bodens im Berechnungsmonat

$nF_{(m-1)}$ = Wassergehalt des Bodens im Vormonat

$N - A_o - ET_{pot}$ = potentielles Wasserdefizit im Berechnungsmonat

nF_{α} = nutzbare Feldkapazität

Die reelle Evapotranspiration ergibt sich dann aus:

$$ET_{\text{reell}} = N + \text{reelles Defizit}$$

oder

$$ET_{\text{reell}} = N + \left[nF_{(m-1)} - nF_{(m)} \right]$$

Als Folge der unterschiedlichen Korrekturvorschriften der ET_{pot} bei PFAU und RENGER ergibt sich für die ET_{reell} , je nachdem welche Methode man anwendet, ein geringfügiger Unterschied. Da die Abminderung der potentiellen Evapotranspiration nach RENGER erst unter 70 % nutzbarer Feldkapazität, bei PFAU aber schon nach Aufbrauch des gefallenen Niederschlags (d. h. bei voller Feldkapazität) beginnt, ist die ET_{reell} nach PFAU in den Sommermonaten meist geringer als der entsprechende Wert nach RENGER. In den übrigen Monaten entspricht die ET_{reell} meist der ET_{pot} .

Für die ET_{reell} wurden folgende Extrem- und Mittelwerte bestimmt:

	Min.	(Jahr)	Max.	(Jahr)	Mittel	(ET_{pot})	Max. - Min.
HAUDE	376	(1976)	570	(1969)	509,5	(568,4)	194
THORNTHWAITE	414	(1976)	625	(1966)	541,1	(616,6)	211
PENMAN	394	(1976)	570	(1974)	513,7	(567,3)	176
TURC	392	(1976)	579	(1966)	507,4	(566,0)	187

Alle Angaben in mm

Im 14- bzw. 22jährigen Mittel beträgt die ET_{reell} 54 — 58 % des langjährigen Niederschlags (933 mm) und rund 89 % der jeweiligen ET_{pot} .

Der langjährige Vergleich der ET_{reell} nach HAUDE/RENGER, THORNTHWAITE/PFAU (1958 — Febr. 1980), PENMAN/PFAU und TURC/PFAU (1966 — Febr. 1980) zeigt im 22- bzw. 14jährigen Mittel eine sehr gute Übereinstimmung, lediglich die etwas zu hohe ET_{pot} nach THORNTHWAITE ist auch nach der Abminderung zur ET_{reell} immer noch etwas zu hoch (um 5 %). Die anderen drei Werte sind mit einer mittleren Abweichung von ca. 1 % als identisch anzusehen.

Die Jahreswerte weisen auch nach der Abminderung der ET_{pot} z. T. große Unterschiede (bis zu 100 mm: 1965 u. 1966) zwischen entsprechenden Werten von THORNTHWAITE und HAUDE (Tab. 4) auf. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Verfahren sind aber deutlich geringer geworden. Ihre Schwankungsbreite ist nun bei allen Verfahren mehr den natürlichen Gegebenheiten angepaßt.

Der Gang der Monatswerte zeigt den gleichen Trend. Allerdings sind in den einzelnen Monaten die Unterschiede z. T. größer (Anhang 6.8).

4.1.3.2.2. Bestimmung über die langjährige Wasserbilanz

Bei einem mittleren jährlichen Niederschlag von 933 mm (Mittelwert 1958 — 1979) und einem durchschnittlichen Abfluß von 382 mm im gleichen Zeitraum am Pegel Neckarelz ergibt sich eine mittlere jährliche ET_{reell} von 551 mm oder 59 % des Niederschlags. Diese Bestimmung setzt aber voraus, daß Niederschlags- und unterirdisches Einzugsgebiet übereinstimmen.

Der Absolutwert der ET_{reell} , bestimmt über den langjährigen Wasserhaushalt, liegt etwa 7 % über dem entsprechenden korrigierten Wert der ET_{reell} nach RENGER und PFAU. Die sehr ähnlichen Werte der ET_{reell} durch Korrektur der ET_{pot} (Kap. 4.1.3.2.1) und ihre Differenz zu dem über die langjährige Wasserbilanz bestimmten Verdunstungswert sprechen für eine Abweichung der unterirdischen von den oberirdischen Wasserscheiden (vgl. auch Kap. 4.1.7).

Tab. 4. Jahreswerte der ET_{reell} [mm]

Jahr	HAUDE	THORN.	PENMAN	TURC
1958	563,3	587,8		
1959	478,2	469,6		
1960	497,8	545,8		
1961	529,0	612,5		
1962	477,3	460,5		
1963	512,6	532,1		
1964	507,1	519,0		
1965	492,8	589,3		
1966	526,4	624,8	536,3	579,3
1967	509,0	555,6	523,6	541,3
1968	504,9	593,6	521,4	539,5
1969	570,7	549,3	555,6	532,0
1970	510,9	522,5	541,3	498,5
1971	523,6	510,6	548,5	509,2
1972	518,4	564,7	538,8	511,5
1973	535,6	493,5	516,9	478,8
1974	554,1	585,3	570,5	526,0
1975	524,9	557,1	549,5	531,1
1976	376,2	414,9	393,6	392,2
1977	448,3	535,4	445,9	477,7
1978	521,7	567,4	480,2	501,7
1979	493,8	512,0	469,7	484,3

4.1.3.2.3. Bestimmung nach TURC

Für überschlägige Betrachtungen der realen Evapotranspiration für längere Zeitspannen (> 1 Jahr) gibt TURC (nach GRAY 1970: 3.59) unter Einbeziehung von Temperatur und Niederschlagssummen folgende Näherungsformel:

$$ET_{reell} = \frac{N}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{N}{I_t}\right)^2}}$$

ET_{reell} = „reelle“ Evapotranspiration pro Jahr (mm)

N = Summe des Jahresniederschlags (mm)

$$I_t = 300 + 25 \cdot t + 0,05 \cdot t^3$$

t = mittlere Jahrestemperatur

Für die Jahre 1958 — 1979 schwankt die ET_{reell} nach TURC im Gesamtgebiet von 425 — 515 mm, die Bandbreite ist gegenüber der korrigierten potentiellen Verdunstung nach HAUDE, THORNTHWAITE, PENMAN und TURC deutlich eingeschränkt (Kap. 4.1.3.2.1). Bei einem Vergleich der aktuellen Verdunstung nach TURC mit den entsprechenden Verdunstungswerten nach HAUDE ergeben sich größere Fehlbeträge vor allem in den Trockenjahren (bis zu 106 mm im Jahr 1969).

In nassen Jahren ist i. a. eine recht befriedigende Übereinstimmung festzustellen (1965 betrug die Differenz zwischen beiden Verdunstungswerten nur 1 mm). Die aktuelle Verdunstung

Tab. 5. Wasserbilanz (aktuelle Verdunstung nach TURC) [alle Angaben in mm/km²]

Jahr	T	N	A	V	(R - B)
1958	8,7	1070,3	525,54	493,59	51,17
1959	9,4	610,9	251,63	429,53	-70,26
1960	8,9	866,9	273,13	475,31	118,46
1961	9,3	1091,0	561,47	513,80	15,73
1962	7,6	813,8	415,97	440,32	-42,50
1963	7,5	734,5	214,39	425,41	94,70
1964	8,8	760,8	170,53	455,34	134,93
1965	7,9	1406,8	772,88	493,71	140,20
1966	9,1	1179,0	575,25	515,42	88,34
1967	9,1	979,2	416,16	495,94	67,11
1968	8,4	1152,0	598,98	492,00	61,01
1969	8,2	890,5	428,63	464,36	-2,49
1970	8,3	1215,3	585,07	495,69	134,54
1971	8,6	668,1	140,58	432,64	94,88
1972	7,8	770,6	151,90	438,21	180,49
1973	8,5	818,1	269,75	460,71	87,64
1974	9,1	1077,8	453,07	506,69	118,03
1975	9,3	753,8	286,05	463,93	3,82
1976	9,0	687,3	158,30	444,09	84,91
1977	9,2	977,8	320,74	497,88	159,18
1978	8,1	1017,6	397,94	473,65	146,01
1979	8,4	969,1	427,09	477,97	64,04

T Temperatur
N Niederschlag
A Abfluß

V aktuelle Verdunstung
(R - B) Vorratsänderung

nach TURC liegt aber auch in Naßjahren so gut wie immer (mit Ausnahme von 1976) unter dem entsprechenden Wert der ET_{reell} nach HAUDE. Die Fehlbeiträge zu der ET_{reell} nach THORNTHWAITE, PENMAN und TURC sind noch etwas höher.

Vergleicht man die 22jährigen Mittelwerte, so zeigt sich, daß die ET_{reell} nach TURC im untersuchten Gebiet nicht der tatsächlichen Verdunstung entspricht. Mit 472 mm ist sie um 79 mm (14,3 %) zu niedrig.

Tab. 5 gibt eine vereinfachte Wasserbilanz auf der Grundlage der Verdunstung nach TURC wieder.

4.1.4. Der Grundwasserabfluß

Für die Trennung von A_o und A_u wird i. a. die statistische Ermittlung des A_u nach WUNDT (1958) sowie die graphische Abtrennung in Anlehnung an NATERMANN (1951) angewendet.

4.1.4.1. Das Verfahren nach WUNDT (MoMNQ)

Nach WUNDT (1958) besteht der niedrigste Tagesabfluß eines Monats ausschließlich aus Grundwasser. Liegen langjährige Pegelaufzeichnungen vor, so läßt sich der mittlere unterirdische Abfluß (mittlerer Niedrigwasserabfluß MoMNQ), z. B. eines Jahres, aus dem Quotienten aus der Summe der Niedrigwasserabflüsse (NQ) der Monate und der Anzahl der Einzelmonate (n) aus:

$$MoMNQ = \frac{\sum NQ}{n}$$

berechnen. Dieser Wert entspricht dem durchschnittlichen Grundwasserabfluß.

Tab. 6. Der A_u -Abfluß (1958—1979)

Jahr	A_u (WUNDT) [mm]	A_{ges} [mm]	A_{ges} [%]	A_u (NATERM.) [mm]
1958	169,3	525,5	32	
1959	146,1	251,6	58	158,3
1960	121,1	273,1	44	
1961	220,3	561,5	39	
1962	176,3	416,0	42	
1963	77,1	214,4	36	
1964	80,6	170,5	47	
1965	285,1	772,9	37	281,4
1966	223,0	575,3	39	224,1
1967	204,9	416,2	49	
1968	277,0	599,0	46	275,4
1969	212,6	428,6	49	210,6
1970	186,7	585,1	32	
1971	68,1	140,6	48	73,5
1972	59,1	151,9	39	
1973	93,0	269,8	35	
1974	227,4	453,1	50	
1975	160,3	286,1	56	
1976	60,2	158,3	39	62,3
1977	32,1	320,7	10	180,4
1978	39,5	397,9	10	
1979	157,6	427,1	37	178,4

Die Reduktion des MoM_{NQ} nach KILLE (1970) erbrachte im Untersuchungsgebiet keine nennenswerte Verbesserung. Die Abweichungen des MoM_{NQ_r} vom MoM_{NQ} lagen i. a. unter 3%. Die durchgeführten Berechnungen wurden deshalb ohne diese Abminderung durchgeführt.

4. 1. 4. 2. Die A_u -Linie nach NATERMANN

Nach NATERMANN (1958) läßt sich der „grundwasserbürtige Anteil“ A_u eines Vorfluterabflusses aus der Ganglinie von Tagesmittelwerten bestimmen.

Der unterirdische Abfluß A_u wird dadurch bestimmt, daß die Tief- bzw. Trockenwetterpunkte der aus Tageswerten ermittelten Gesamtabflußganglinie durch eine A_u -Linie miteinander verbunden werden. Die ausplanimetrierte Fläche unter der A_u -Linie ergibt den unterirdischen Abfluß in m³ pro Zeiteinheit oder die unterirdische Abflußhöhe in mm, bezogen auf das unterirdische Einzugsgebiet.

Dieses Verfahren bereitet aber in Naßjahren, vor allem bei Überschneidung mehrerer Hochwasserwellen, Schwierigkeiten, weil kein echter Trockenperiode-Tiefpunkt entsteht. In solchen Fällen sind Einzelpunkte der A_u -Linie zu konstruieren (näheres s. NATERMANN 1958, Arbeitskreis Grundwasserneubildung 1977: Abb. 29). Quellschüttungsbeobachtungen oder hydrochemische Messungen im Vorfluter, die etwa die gleichen Schwankungen zeigen wie der unterirdische Abfluß, liegen im Arbeitsgebiet nicht vor, bzw. konnten nicht in den erforderlichen kurzen Intervallen durchgeführt werden.

Trotz allem jedoch werden auch hiermit, besonders in niederschlagsreichen Perioden, die abfließenden Grundwassermengen nur annähernd wiedergegeben.

4.1.4.3. Der langjährige A_u -Abfluß des Gesamtgebietes

Für das Gesamtgebiet wurden die Grundwasserabflüsse anhand der vorliegenden amtlichen Pegel­daten (1958 — Feb. 1980) nach dem MoMNQ-Verfahren bestimmt (Abb. 8). Es ist nach Untersuchungen des Arbeitskreises Grundwasserneubildung (1977: 70) für eine überschlägige Ermittlung des A_u -Abflusses sehr geeignet (vgl. auch WALTER 1974: 57 — 58). Zur Kontrolle der über das WUNDTsche Verfahren bestimmten Werte wurde für ausgesuchte Jahre der A_u -Abfluß auch nach NATERMANN bestimmt.

Allgemein liefert das MoMNQ-Verfahren nach WUNDT dem A_u -Linien-Verfahren vergleichbare Werte (Tab. 6). Die bestimmten A_u -Abflüsse nach NATERMANN liegen aber i. a. etwas höher als die MoMNQ-Werte. Die größten Unterschiede ergeben sich in den Trockenjahren. Der Grund ist folgender: Auftretende zu hohe Werte in nassen Monaten gleichen sich bei Betrachtung der Jahresbilanz in Jahren mit einem ausgeglichenen Wasserhaushalt insofern aus, als die in Trockenmonaten bestimmten MoMNQ-Werte als untere Grenzwerte anzusehen sind.

Das 22jährige Mittel des A_u -Abflusses (149,1 mm) beträgt 39 % des mittleren Gesamtabflusses. Mit 285 mm erreicht der Maximalwert im Jahre 1965 75 % des langjährigen mittleren Gesamtabflusses. Die geringsten A_u -Abflüsse sind mit 32,1 mm 1977 und 39,5 mm 1978 zu verzeichnen.

Setzt man den Grundwasserabfluß in Beziehung zum Gesamtabfluß, so beträgt der Anteil des A_u im Winterhalbjahr 35,5 % vom Gesamtabfluß. Er steigt im Sommerhalbjahr auf 48,6 % an.

4.1.5. Die mittlere Grundwasserneubildung

4.1.5.1. Berechnung über den langjährigen Grundwasserabfluß

Liegen für ein Gebiet langjährige Abflußmessungen vor, so läßt sich aus dem Grundwasserabfluß (MoMNQ) die mittlere Grundwasserneubildungsrate direkt angeben, da die Vorratsänderung sowohl in der Bodenzone wie im Aquifer selbst vernachlässigbar ist. Dies setzt aber voraus, daß Niederschlags- und Grundwassereinzugsgebiet übereinstimmen.

Für das Gesamtgebiet errechnet sich eine mittlere jährliche Grundwasserneubildung von 149,1 mm, dies entspricht 16,0 % des langjährigen Niederschlags. Der so gewonnene Wert ist jedoch als Minimalwert anzusehen.

4.1.5.2. Berechnung über die erweiterte Wasserbilanz

Die Wasserhaushaltsgleichung

$$N = A + V$$

gilt nur für lange Zeiträume. Für kurze Beobachtungszeiten muß sie erweitert werden. Dann gilt die Gleichung:

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

Hierin bedeuten R = die Rücklage und B = den Verbrauch von Grundwasser. Da diese Werte aber meistens auch nicht erfaßt werden können, muß die Formel nochmals erweitert werden. Im folgenden wird der Ausdruck $R - B = S$ (S = Vorratsänderung) gesetzt. A , V und S werden weiterhin nach EINSELE et al. (1969: 40) folgendermaßen aufgegliedert:

$$A = A_o + A_u \quad \begin{array}{l} A_o = \text{Oberirdischer Abfluß} \\ A_u = \text{Unterirdischer Abfluß (abfließendes Grund- und Quellwasser, das an der Pegelstelle voll erfaßt wird)} \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 V &= V_o + V_u & V_o &= \text{Verdunstungsanteil aus Niederschlag und Bodenwasser} \\
 & & V_u &= \text{Verdunstung von Grundwasser aus dem tieferen Untergrund} \\
 S &= S_o + S_u & S_o &= \text{Vorratsänderung der durchwurzelten Bodenzone} \\
 & & S_u &= \text{Vorratsänderung im tieferen Untergrund}
 \end{aligned}$$

Die Wasserhaushaltsgleichung lautet dann:

$$N = A_o + A_u + V_o + V_u + S_o + S_u$$

Setzt man für die Vorratsänderung im tieferen Untergrund:

$$\begin{aligned}
 S_u &= I_u - A_u - V_u \\
 I_u &= \text{Infiltration in den tieferen Untergrund für eine bestimmte Zeit-} \\
 &\quad \text{spanne} = \text{Grundwasserneubildung}
 \end{aligned}$$

so geht die Gleichung über in:

$$N = A_o + A_u + V_o + V_u + S_o + I_u - A_u - V_u$$

oder

$$N = A_o + V_o + S_o + I_u$$

Von diesen Gliedern ist I_u gesucht. A_o wird nach dem Verfahren von WUNDT bestimmt. V_o und V_u sind für größere Flächen außerordentlich schwer zu bestimmen. Da aber der Grundwasserspiegel im Arbeitsgebiet meist unter dem Wurzelbereich der Pflanzen liegt, kann nach EINSELE et al. (1969: 40) V_u vernachlässigt werden. Dann wird $V_o = V =$ aktuelle Verdunstung.

Die Bilanzgleichung lautet dann:

$$N = A_o + V + S_o + I_u$$

oder nach Einsetzen der Vorratsänderung in der durchwurzelten Bodenzone in vorstehender Gleichung (SCHRAFT 1981)

$$N = A_o + V + [nF_{(m)} - nF_{(m-1)}]^* + I_u$$

Die Versickerung zum Grundwasserleiter (= Grundwasserneubildung) ergibt sich somit nach folgender Formel:

$$I_u = N - A_o - V - [nF_{(m)} - nF_{(m-1)}]$$

Für die Berechnung der Grundwasserneubildung wurde im folgenden mit dieser Gleichung gearbeitet.

Obwohl die Verdunstungswerte nach HAUDE nach der Methode von RENGER et al. (1974) korrigiert wurden, die nach PENMAN, THORNTWHAITE und TURC aber nach PFAU (1966), stimmen die monatlich ermittelten Werte für die Grundwasserneubildung in etwa überein. Die I_u -Werte nach RENGER sind, entsprechend der höheren ET_{reell} in den Sommermonaten, etwas geringer als die nach PFAU, im Mittel aber nur 5%.

Die monatliche Verteilung der Grundwasserneubildung zeigt allerdings die Unterschiede, die sich aus den verschiedenen Verdunstungshöhen nach den einzelnen Verfahren ergeben: So entspricht z. B. der zu geringen Verdunstung nach THORNTWHAITE in den Wintermonaten eine zu hohe Grundwasserneubildungsrate in dieser Zeit. Dadurch können Fehler bis zu 10% der gesamten tatsächlichen Grundwasserneubildung auftreten.

* m-1 deutet an, daß die nF des Vormonats gemeint ist.

Tab. 7. Grundwasserneubildung [mm]
(ET_{reil} nach verschiedenen Methoden)

Jahr	HAUDE	THORN.	PENMAN	TURC	Mittel
1958	152,6	150,9			151,8
1959	101,9	99,7			100,8
1960	116,6	122,1			119,4
1961	267,8	242,7			255,3
1962	160,9	168,5			164,7
1963	38,1	50,9			44,5
1964	112,7	120,3			116,5
1965	296,2	285,6			290,9
1966	236,6	240,9	294,1	292,8	266,1
1967	209,9	215,0	242,4	245,5	228,2
1968	246,1	247,3	252,4	252,5	249,6
1969	191,4	177,2	219,4	220,8	202,2
1970	227,9	241,7	211,1	210,3	222,8
1971	43,5	20,3	32,5	20,9	29,3
1972	39,4	65,2	54,5	65,2	56,1
1973	93,6	92,1	76,3	77,7	84,9
1974	257,3	245,4	202,6	199,3	226,2
1975	148,2	137,1	222,0	203,6	177,7
1976	129,6	106,1	132,0	128,0	123,9
1977	0,0	27,2	0,0	7,0	8,6
1978	116,0	58,8	108,3	109,6	98,2
1979	149,6	201,8	149,0	145,8	161,6
Mittel	151,6	150,8	156,9	155,6	153,6

Bei der Betrachtung der jährlichen Grundwasserneubildungsraten ist es i. a. aber nur von untergeordneter Bedeutung, ob die Verdunstung nach HAUDE, PENMAN, THORNTHWAITE oder TURC berechnet wurde (Tab. 7). Die Grundwasserneubildungsrate schwankt beträchtlich von Jahren fast ohne Neubildung (1977) bis zu Werten von 290 mm (1965).

Im langjährigen Mittel liegt die durchschnittliche Grundwasserneubildung bei rund 153,6 mm/a oder 16,5 % des Niederschlags. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem langjährigen A_u -Abfluß (149,1 mm) überein.

4.1.6. Die Vorratsänderung

Will man die während einer Meßperiode im Untergrund gespeicherte oder aufgebrauchte Wassermenge berechnen, so ist von der Grundwasserneubildungsrate I_u der unterirdische Abfluß A_u abzuziehen.

$$\text{Vorratsänderung } S_u = I_u - A_u$$

Grundwasser, das im Einzugsgebiet gefördert und dem Vorfluter vollständig zugeführt wird, beeinflußt diesen Rechengang nicht. Es wird einerseits der Speicherung entzogen, andererseits aber dem unterirdischen Abfluß hinzugefügt.

$$S_u - G = I_u - (A_u + G)$$

$$G = \text{Fördermenge}$$

daraus wird wieder

$$S_u = I_u - A_u$$

Zuleitungen aus Fremdräumen müßten vom unterirdischen Abfluß abgezogen werden; sie sind mengenmäßig unbedeutend (u. a. aus der Neckaraue bei Diedesheim).

Die jährlichen Vorratsänderungen im Aquifer lassen sich aus dem Vergleich von Grundwasserneubildung und A_u -Abfluß ersehen (Abb. 10). Danach wechseln Zeiten mit Speicherung und zunehmendem Aufbrauch ab, wobei sich beide Wasserhaushaltsgrößen während eines Speicherungs-Aufbrauchs-Zyklus mengenmäßig sehr gut ausgleichen. Dies spricht gegen mehrjährige Abflußverzögerungen sowie für ein schwaches Retentionsvermögen der Speicherräume im Arbeitsgebiet (Kap. 4.1.2.1). Der etwas ausgeglichenerer Gang des A_u -Abflusses weist i. a. nur Verzögerungen von einigen Monaten gegenüber der Grundwasserneubildung auf. Dies macht sich besonders dann bemerkbar, wenn nach einer Periode stärkerer Grundwasserneubildung (1974 — 1976 oder 1963 — 1964) ein Trockenjahr folgt.

Bei langjähriger Betrachtung des Wasserhaushalts kann die Vorratsänderung unberücksichtigt bleiben, sie gleicht sich über längere Zeiträume aus. Da bei allen vier Methoden der Verdunstungsberechnung die Wasserbilanz eine berechnete Rücklage aufweist, muß gefolgert werden, daß Grundwasser unterirdisch abfloß (Kap. 4.1.7 und 4.1.7.1).

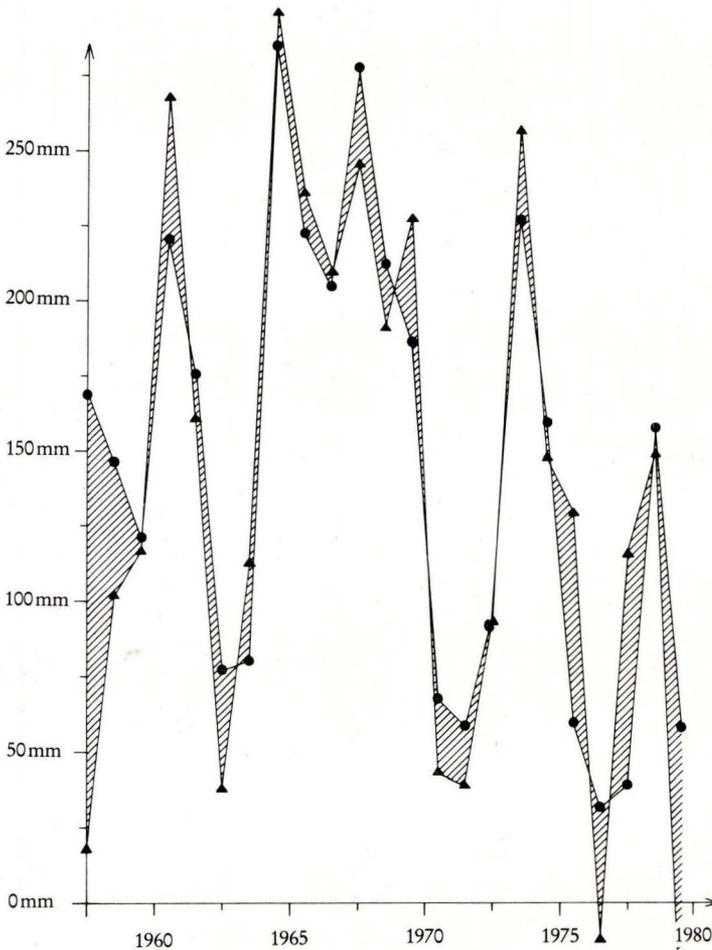


Abb. 10. Grundwasserneubildung (▲) und A_u -Abfluß (●) 1958 — 1979
(schraffiert: Vorratsänderung, ET_{reell} nach HAUDE/RENGER).

4.1.7. Die Bilanz

Für ein geschlossenes Einzugsgebiet lautet die Gleichung des Wasserhaushalts:

$$N = A + V \pm S$$

mit den Bezeichnungen: N = Niederschlag, A = Abfluß, V = Verdunstung, S = Vorratsänderung (positiv bei Rücklagen, negativ bei Aufbrauch).

Die Bestimmung der einzelnen Bilanzfaktoren ist oftmals mit großen Unsicherheiten behaftet (Kap. 4.3). Die nachstehende Aufschlüsselung der langjährigen Wasserhaushaltsfaktoren zeigt jedoch (Anhang 6.9), daß die Ergebnisse im Mittel recht gut übereinstimmen.

	HAUDE	THORNTHWAITE	PENMAN	TURC
Niederschlag	933 mm	933 mm	933 mm	933 mm
Abfluß	382 mm	382 mm	382 mm	382 mm
Verdunstung	509 mm	541 mm	514 mm	507 mm
Rücklage	42 mm	10 mm	37 mm	44 mm

Sind, wie im vorliegenden Fall, langjährige Meßreihen von Niederschlag und Abfluß vorhanden, so läßt sich die aktuelle Verdunstung auch als Differenz dieser beiden Größen mit hinreichender Genauigkeit berechnen aus:

$$V = N - A$$

Danach ergeben sich für den Zeitraum von 1958 — 1979 für das Einzugsgebiet der Elz folgende Durchschnittswerte der Wasserhaushaltsfaktoren:

Bilanz	Wi		So		Jahr	
	mm	l/s · km ²	mm	l/s · km ²	mm	l/s · km ²
Niederschlag	479	30,4	454	28,8	933	29,6
Abfluß	281	17,8	101	6,4	382	12,1
Verdunstung	198	12,6	353	22,4	551	17,5

Aus der allgemeinen Form der Bilanzgleichung des Wasserhaushalts $V = N - A$ errechnet sich für die Jahre 1958 — 1979 ein Verdunstungswert von 551 mm. Dieser Wert wird jedoch von keinem der angegebenen Mittelwerte erreicht (Kap. 4.1.3.2.1). Die höchsten Verdunstungsmengen erbrachte die Berechnung nach THORNTHWAITE (541 mm/a). Die Bilanzgleichung weist also eine minimale Differenz von 10 mm zwischen der über die Wasserbilanz bestimmten Verdunstung ($N - A$) und der aus Formeln berechneten auf. Dieser Fehlbetrag ist als Abflußwert dem am Pegel in Neckarelz gemessenen Gesamtabfluß hinzuzufügen, um zu einer ausgeglichenen Wasserbilanz zu gelangen. Er ist als Gebietsverlust an Grundwasser zu interpretieren, das wahrscheinlich dem Einzugsgebiet der Schefflenz (im SE) zufließt; d. h. ober- und unterirdische Wasserscheiden zwischen Elz und Schefflenz fallen nicht zusammen. Das (unterirdische) Einzugsgebiet der Schefflenz greift in das Niederschlagsgebiet der Elz ein (Kap. 4.1.7.1).

4.1.7.1. Berechnung des unterirdischen Einzugsgebietes über die Wasserbilanz

Über die Gleichung

$$F_E = F_N \cdot \frac{\text{gemessener Abfluß (am Pegel) (l/s oder mm)}}{\text{berechneter Abfluß (über Wasserbilanz) (l/s oder mm)}}$$

läßt sich die Größe des unterirdischen Einzugsgebiets nach folgender Überlegung abschätzen:

Der langjährige Mittelwert des Abflusses am Pegel Neckarelz beträgt 382 mm.

Bei einem mittleren Niederschlag von 933 mm und einer berechneten ET_{reell} von etwa 510 mm (Mittelwert der langjährigen mittleren ET_{reell} nach HAUDE/RENGER, PENMAN/PFAU und TURC/PFAU) ergibt sich eine berechnete Abflußhöhe von 423 mm.

Über das Verhältnis von gemessenem zu berechnetem Abfluß (0,90) und einem Niederschlagsgebiet von 157 km² errechnet sich die Größe des unterirdischen Einzugsgebiets zu 142 km².

Ein Blick auf die Schichtlagerungskarte (Abb. 3) legt die Vermutung nahe, daß Grundwasser aus dem Arbeitsgebiet nach SE in das Einzugsgebiet der Schefflenz abfließt (Kap. 4.1.7). Eine Korrektur der Größe des Niederschlagsgebiets auf jene des unterirdischen Einzugsgebiets wäre in diesem Teil des Arbeitsgebiets am sinnvollsten.

Bei diesem Verfahren müssen Ab- und Zuleitungen von Wasser in das Bilanzgebiet bekannt sein.

4.2. Einjährige Wasserbilanz (März 1979 — Februar 1980)

4.2.1. Hydrologische Vorarbeiten

Ziel der hydrogeologischen Geländeaufnahmen war sowohl die Aufstellung einer detaillierten einjährigen Wasserbilanz der Odenwälder Elz als auch ihrer Teileinzugsgebiete sowie die quantitative Erfassung des abfließenden Grundwassers (Niedrigwasserabfluß NQ).

4.2.1.1. Abflußmessungen

Die Messungen zur Aufstellung einer einjährigen Wasserbilanz der Elz sowie ihrer Teileinzugsgebiete erfolgten in der Zeit von März 1979 — Februar 1980 in etwa 14 — 18tägigem Abstand, zuerst an 15, später an 23 ausgesuchten Meßstellen.

Um die Grundwasserabflußverhältnisse im Arbeitsgebiet ermitteln zu können, wurden im September und Oktober 1979 in 2 — 4tägigem Abstand an zehn der Meßstellen zusätzliche Niedrigwasser-(Trockenwetter-)Abflußmessungen durchgeführt. Die geringen Niederschläge in diesen beiden Monaten lassen eine Interpretation des in den Wasserläufen des Arbeitsgebietes abgeflossenen Wassers als Grundwasser zu.

Die Auswahl der Meßstellen erfolgte nach hydrogeologischen Gesichtspunkten. Voraus ging eine sorgfältige Prüfung der Gewässersohlen- und -uferbeschaffenheit auf der Grundlage der Richtlinien für Abflußmessungen (1971: 11 — 13).

Des weiteren wurden die einzelnen Meßpunkte so gewählt, daß möglichst jeder größere Bach separat untersucht werden konnte und die Möglichkeit bestand, den Abflußzuwachs von Elz und Trienz zu untersuchen.

4.2.1.1.1. Meßmethoden

Je nach Größe und Wasserführung der zu untersuchenden Gewässer boten sich für die Abflußbestimmung zwei Meßmethoden an: das Flügelmeßverfahren und die Gefäßmessung.

4.2.1.1.1.1. Flügelmessungen

Die Durchführung der Flügelmessungen erfolgte nach den Richtlinien für Abflußmessungen (1971). Angewandt wurde das Amerikanische Zwei-Punktmeßverfahren. Als Meßgeräte dienten ein OTT-Meßflügel, Typ Arizona und ein Laborflügel Typ C2,,10.150“ desselben Herstel-

lers. Die Messungen wurden immer an den gleichen Stellen durchgeführt. Die geometrischen Daten des Bachprofils wurden jeweils neu ermittelt. Die Anzahl der Meßlotrechten richtete sich nach der Gewässerbreite. Als Mindestanzahl jedoch wurden fünf Meßlotrechten verwendet. Die Abstände beliefen sich bei breiteren Bächen auf max. 1 m, bei schmaleren 30 cm und weniger. Gewässer bis zu 5 cm Tiefe (Schraubendurchmesser) konnten mit dem Laborflügel noch gemessen werden.

Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten erfolgte durch Zählung von Schaufelumdrehungen pro 50 Sekunden mit einem Zählgerät der Fa. OTT.

4.2.1.1.1.2. Gefäßmessungen

Nur bei einigen kleinen Bächen — und da auch nur nach längerer Trockenheit — wurde das Verfahren der Gefäßmessung angewandt. Hierzu wurde das Wasser möglichst quantitativ in einen größeren Plastiksack geleitet und die Füllzeit bestimmt. Die Messung erfolgte durch Ausschöpfen mit einem Meßgefäß.

4.2.1.1.2. Korrektur der Trockenwetterabflußmessungen

Die gemessenen Trockenwetterabflüsse und die daraus errechneten Abflußspenden beziehen sich nur auf die Abflußverhältnisse im Meßzeitraum. Da aber auch Trockenwetterperioden gewissen abflußwirksamen Schwankungen unterliegen, müssen die Meßergebnisse auf eine einheitliche Niedrigwassercharakteristik reduziert werden. Grundlage für die Reduzierung der Meßergebnisse bildete die Ermittlung eines geeigneten Reduktionsfaktors.

In diesen Faktor müssen sowohl die Abflußschwankungen während des Meßzeitraums eingehen als auch ein repräsentativer Niedrigwasserabflußwert. Zur Ermittlung des letzteren standen die mittleren Tagesabflußwerte einer 22jährigen Meßreihe (Pegel Neckarelz) zur Verfügung; daraus ergaben sich die benötigten niedrigsten Monatsabflüsse (Tagesmittel) der letzten 22 Jahre (1958 — 1979) (Anhang 6.3).

Zur Korrektur wurden die Angaben über das mittlere Niedrigwasser der Sommerhalbjahre (SoMNQ) als Bezugswert ausgewählt. Nach WUNDT (1958: 48) stellt das SoMNQ den Abfluß dar, der das ganze Jahr hindurch, unabhängig vom Witterungsverlauf, vorhanden ist und das ständig verfügbare Abflußminimum bildet (mittlerer kleinster Grundwasserabfluß). Für die Jahresreihe 1958 — 1979 errechnete sich ein SoMNQ-Wert, bezogen auf den Pegel Neckarelz, von 0,29 m³/s.

Die Reduzierung der Abflüsse, d. h. die Umrechnung der gemessenen Abflüsse auf eine einheitliche Niedrigwassercharakteristik, erfolgte nach der Formel (SCHUBUTH 1973: 125, GANGEL 1975: 128):

$$Q_{\text{red}} = Q \frac{\text{SoMNQ}}{Q_p} \quad \langle 1/s \rangle$$

Q = gemessener Abfluß

Q_p = mittlerer Tagesabfluß am Pegel Neckarelz für das jeweilige Meßdatum

Die Größe der ermittelten Korrekturfaktoren ist vom mittleren Tagesabfluß am Pegel Neckarelz abhängig. Ihre Werte lagen an den Meßtagen bei 1,04 (29. 9. 79) und 1,00 (3. 11. 79). Am 29. 9. überschritt der Abfluß am Pegel Neckarelz den SoMNQ-Wert der Meßreihe. Hierdurch wird der Korrekturfaktor > 1 , die korrigierten Werte lagen höher als die tatsächlich gemessenen.

Aufgrund des raschen Wasserumsatzes im Arbeitsgebiet (geringe Retention, vergl. 4.1.2 und 4.1.6) kann davon ausgegangen werden, daß die Abflußschwankungen im Untersuchungszeitraum weitgehend von den während dieser Zeit auftretenden Niederschlägen abhängen. Aufgrund der Niederschlagsverteilung im Beobachtungszeitraum können für das Arbeitsgebiet relativ gleichartige Abflußverhältnisse angenommen werden. Die Reduktionsfaktoren können deshalb für die Berechnungen im gesamten Untersuchungszeitraum als weitgehend gültig erachtet werden.

4.2.2. Abgrenzung der Niederschlags- und Einzugsgebiete

Die den einzelnen Meßstellen zuzuordnenden Niederschlagsgebiete (F_N) wurden nach den oberirdischen Wasserscheiden abgegrenzt (Abb. 11). Die planimetrische Integration der Flächen anhand der topographischen Karten 1:25 000 ergaben die in Tab. 8 wiedergegebenen Größen.

Durch einen Vergleich der Abflußspenden der Teilniederschlagsgebiete ist es möglich, vom oberirdischen Niederschlagsgebiet F_N ausgehend, das unterirdische Einzugsgebiet F_E zu berechnen. Dabei wird davon ausgegangen, daß bei Gebieten mit ähnlichem geologischem Aufbau, etwa gleicher Größe und Lage zum Vorfluter, die Abflußspenden keine größeren Abweichungen besitzen sollten. Aufgrund der insgesamt etwa einheitlichen Grundwasserneubildung „müssen Gebiete mit hohen Spenden unabhängig von der Größe des Niederschlagsgebietes auch entsprechend große (unterirdische) Einzugsgebiete haben, Gegenden mit kleinerer Spende entsprechend kleinere Einzugsgebiete“ (MATTHESS & THEWS 1959: 425).

Die Ermittlung des unterirdischen Einzugsgebiets geschieht mit Hilfe des Abflusses und der durchschnittlichen Grundwasserspende gemäß der Formel (MATTHESS & THEWS 1959: 425):

$$F_E = \frac{Q}{q}$$

Es bedeuten:

F_E = Einzugsgebiet (km^2)

Q = Abfluß der Teilniederschlagsgebiete (l/s)

q = mittlere Grundwasserspende der Teilniederschlagsgebiete ($\text{l/s} \cdot \text{km}^2$)

Die durchgeführten Berechnungen erstrecken sich streng genommen¹ nur auf die nördlichen und westlichen Bereiche des Arbeitsgebietes, in denen im wesentlichen der Obere Buntsandstein ansteht. Sie beziehen sich auf die auf eine einheitliche Niedrigwassercharakteristik (SoMNQ) umgerechneten Trockenwetterabflüsse (bzw. Abflußspenden).

Bei Annahme einer mittleren Gebietsabflußspende ($2,0 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) zeigte sich, daß zwischen Niederschlags- und Einzugsgebieten oftmals beträchtliche Abweichungen vorhanden sind. Einzelne Teilniederschlagsgebiete sind bis zu sechs mal (Teilniederschlagsgebiet 4) größer als die berechneten Einzugsgebiete, andererseits aber können die Einzugsgebiete auch mehr als fünf mal größer sein als die betreffenden Niederschlagsgebiete (Teilniederschlagsgebiet 8).

Eine auffällige Erscheinung bei der Betrachtung der Teilniederschlagsgebiete mit großen (unterirdischen) Einzugsgebieten (Tab. 8) ist eine mehr oder minder deutlich ausgeprägte Abhängigkeit der Fließrichtung des Vorfluters vom Einfallen der Buntsandsteinschichten (Teilgebiete 12, 15, 21). Dies stimmt mit Beobachtungen von EISSELE (1966: 108) über die Grundwas-

¹ In Teilniederschlagsgebieten, in denen Muschelkalk ansteht, ist, bedingt durch stark wechselnde Wasserführung und mit der Höhe des Grundwasserstandes sich ändernden Wasserscheiden, mit einem etwas größeren Fehler zu rechnen.

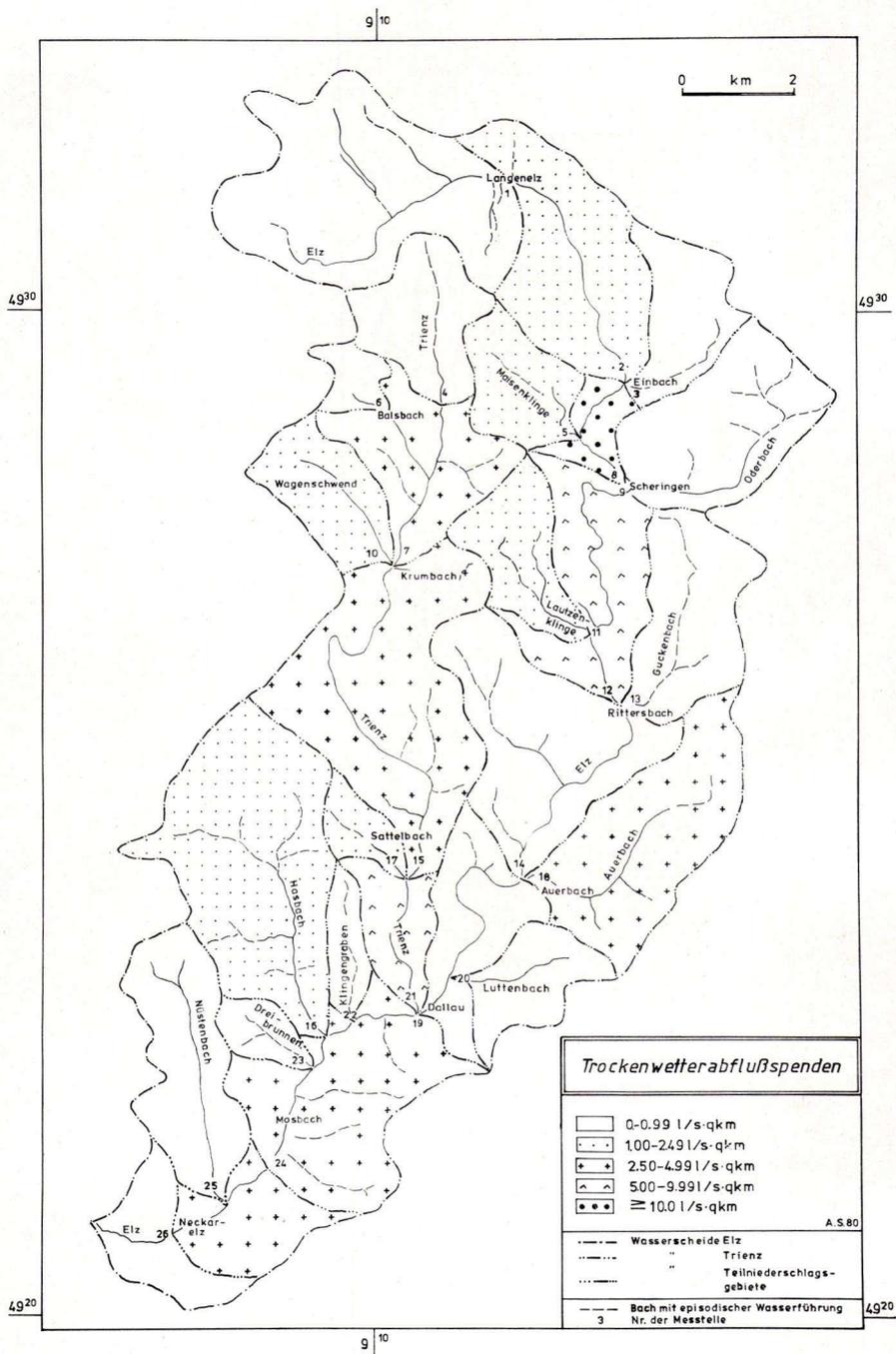


Abb. 11. Trockenwetterabflußspenden und Wasserscheiden der Teileinzugsgebiete.

Tab. 8. Größe der F_N und F_E aller untersuchten Teilniederschlagsgebiete

Meß- stelle	dQ_{red} [l/s]	F_N [km ²]	F_E [km ²]	$F_N:F_E$
1	10,0	13,6	5,0	2,72
2	10,0	9,1	5,0	1,82
3	trocken	4,1	—	—
4	1,5	4,7	0,8	6,27
5	5,0	3,7	2,5	1,48
6	1,0	1,4	0,5	2,80
7	22,5	6,0	11,3	0,53
8	15,0	1,4	7,5	0,19
9	5,5	7,9	2,8	2,87
10	10,0	4,1	5,0	0,82
11	10,0	4,1	5,0	0,82
12	44,5	6,4	22,3	0,29
13	trocken	6,4	—	—
14	10,0	10,2	5,0	2,04
15	45,0	13,8	22,5	0,61
16	20,0	13,8	10,0	1,38
17	2,0	1,6	1,0	1,60
18	30,0	9,5	15,0	0,63
19	-17,5	4,9	—	—
20	2,5	3,3	1,3	2,64
21	18,0	2,8	9,0	0,31
22	trocken	1,6	—	—
23	trocken	1,4	—	—
24	40,0	9,6	20,0	0,48
25	3,0	7,0	1,5	4,67

dQ_{red} Abflußzuwachs
 F_N Niederschlagsgebiet
 F_E Einzugsgebiet

serfließrichtung im Buntsandstein des nördlichen Schwarzwaldes überein. In 80 % der untersuchten Fälle erfolgte dort der unterirdische Abfluß in Richtung des generellen Schichtfallens. Nach MATTHESS (1970: 45) ist dies besonders bei Wechsellagerung von durchlässigen und weniger durchlässigen Gesteinen der Fall. Es kann angenommen werden, daß im Untersuchungsgebiet diesbezüglich ähnliche Abflußverhältnisse vorliegen.

In den Niederschlagsgebieten der Meßstellen 7, 8, 10 und 11 liegen die Verhältnisse aufgrund des tektonischen Bildes wesentlich komplizierter. Hier resultieren die Differenzen zwischen Niederschlags- und Einzugsgebiet vor allem aus der guten Wasserwegsamkeit entlang der SW—NE streichenden Neckargerach-Einbach-Hollerbach Störungszone (Abb. 1 und 3). Im Arbeitsgebiet tritt sie zwar nicht durch nennenswerte Versatzbeträge in Erscheinung, sie bewirkte jedoch eine intensive Zerklüftung des Oberen Buntsandsteins in diesen vier Einzugsgebieten. Offensichtlich stellt sie hydraulische Verbindungen zu den Nachbargebieten mit unterdurchschnittlichen Abflußspenden her.

Es muß daher angenommen werden, daß die Schichtlagerungsverhältnisse nur einen Teil- einfluß auf die Größe der unterirdischen Einzugsgebiete ausüben, während eine weitere Beeinflussung von den tektonischen Schwächezonen und den sie begleitenden Kluftsystemen ausgeht.

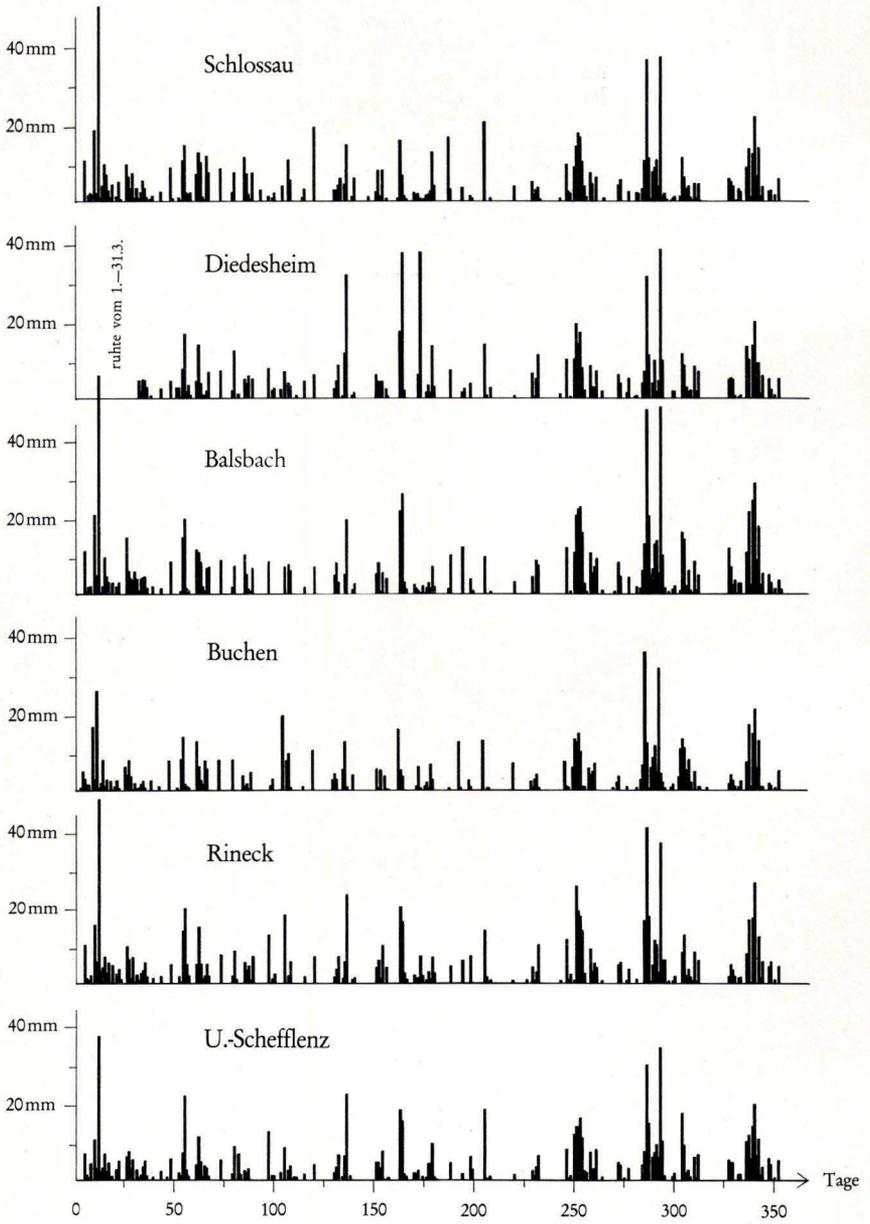


Abb. 12. Tägliche Niederschlagshöhen (1. 3. 1979 — 29. 2. 1980).

Tab. 9. Monatssummen von Niederschlag und Verdunstung [mm]

Monat	1	2	3	4
März	71,9	140,6	21,4	21,7
April	66,7	78,7	51,2	39,5
Mai	76,8	58,5	80,6	82,5
Juni	83,0	43,6	89,9	114,7
Juli	71,6	66,1	86,7	71,6
August	89,6	81,4	58,1	44,7
September	57,9	35,8	46,9	53,6
Oktober	59,4	32,4	23,7	28,0
November	90,8	115,9	11,8	8,6
Dezember	100,1	188,0	9,9	12,5
Januar	83,2	65,8	9,7	9,6
Februar	74,3	83,7	12,5	15,0
Jahr	933,0	990,5	509,0	501,9

1 Monatsmittel des Niederschlags (1958 — 1980).

2 Niederschlag März 1979 bis Februar 1980.

3 Monatsmittel der Gebietsverdunstung nach HAUDE (1958 — 1980).

4 Verdunstung März 1979 bis Februar 1980 nach HAUDE.

4.2.3. Die meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungszeitraum

Im Untersuchungszeitraum (März 1979 — Februar 1980) fielen an 183 Tagen (Abb. 12) insgesamt 990,5 mm Niederschlag: dieser Wert liegt 6,2 % über dem 22jährigen Mittel von 933 mm/a. Die Monatssummen des Niederschlags von Februar, März, April, November und Dezember liegen über dem langjährigen Mittel der entsprechenden Monate (Tab. 9).

Die ET_{reell} (nach HAUDE) entsprach mit 501,9 mm in etwa dem 22jährigen Mittelwert (509 mm). Die mittlere Monatsverdunstung überschritt in den Monaten Februar, März, Mai, Juni, September, Oktober und Dezember den entsprechenden 22jährigen Mittelwert. Demzufolge fielen die überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen überwiegend in den Monaten mit geringerer Verdunstung. Dies wirkte sich günstig auf die Grundwasserneubildung und den Grundwasserabfluß aus.

4.2.4. Das Abflußverhalten des Gesamtgebietes sowie das der Teileinzugsgebiete

Zur Bestimmung des Abflußverhaltens wurden im Untersuchungszeitraum in 14- bis 20tägigem Abstand die Abflüsse des Gesamtgebietes sowie die der einzelnen Niederschlagsteilgebiete bestimmt (Kap. 4.2.1.1). Über die mittleren Tageswerte des Elzpegels in Neckarelz wurden nach folgendem Verfahren die Monatssummen des Abflusses der Teileinzugsgebiete ermittelt:

Die Abflußwerte der privaten Meßstelle Mosbach sowie des amtlichen Pegels Neckarelz wurden jeweils mit denen der anderen 15 bzw. 23 Meßstellen korreliert.

Aufgrund hoher Korrelationskoeffizienten (i. a. $> 0,75$) war es zulässig, über die mittleren amtlichen Tageswerte des Pegels Neckarelz Tagesmittelwerte für die einzelnen Meßstellen zu bestimmen. Der Monatsabflußwert einer Meßstelle ergab sich durch Aufsummierung der jeweiligen Tageswerte. Eventuelle Ungenauigkeiten bei der Bestimmung einzelner Tageswerte wurden durch die Wiedergabe von Monatswerten kompensiert.

Die monatlich bestimmten Abflußwerte geben nähere Hinweise auf das betreffende Teileinzugsgebiet. Zuvor jedoch wird das Verhalten des Gesamtgebiets erörtert, in dem sich die Einflüsse der Teilgebiete überlagern. Ein im Vergleich zum langjährigen Mittel zu hoher Niederschlag ließ auch den Gesamtabfluß, besonders zu Beginn und Ende des Untersuchungszeitraums, überdurchschnittlich stark anwachsen. Auf die im Mittel kaum erhöhten Niederschläge in den Sommermonaten reagierte der Gesamtabfluß, auch trotz der relativ hohen Verdunstung — sie entsprach in etwa dem langjährigen Mittel — mit nur einer ganz geringfügigen Abnahme. Ein Großteil des Abflusses entstammt dabei dem nach mehr als zwei Jahren erstmals wieder kräftig angestiegenen A_u -Abfluß (Abb. 8).

Zu Beginn des Untersuchungszeitraums im März 1979 erreichte der unterirdische Abfluß seinen höchsten Wert seit vier Jahren, bedingt durch hohe Niederschläge in diesen Monaten bei geringer Verdunstung. Bis Oktober generell abnehmende Niederschlagssummen führten auch zu einem kontinuierlichen Rückgang des A_u -Abflusses. Leicht ansteigende Niederschlagsmengen in den Monaten Juli, August wurden von der ebenfalls ansteigenden Verdunstung sofort aufgezehrt, so daß sie eine Auffüllung des Grundwasservorrats verhinderten. Erst die starken Niederschläge in den Wintermonaten ermöglichten bei einer geringen Verdunstungsrate, jedoch erst nach Regeneration des Bodenwassergehaltes (im November), eine Wiederauffüllung der unterirdischen Speicher und eine Zunahme des A_u -Abflusses. Der Gesamtabfluß im Untersuchungsjahr lag mit 443 mm um 15,9 % über dem langjährigen Mittel, der A_u -Abfluß mit 174 mm um 16,8 % über dem entsprechenden Mittelwert.

Gewisse Unterschiede lassen sich bei der Betrachtung des Abflußverhaltens der Teileinzugsgebiete erkennen. Im folgenden werden nur solche betrachtet, die eine geringe anthropogene Beeinflussung aufweisen. Signifikante Unterschiede im Abflußverhalten der Bäche in Abhängigkeit von der Geologie sind nicht festzustellen. Das kommt zum einen daher, daß lehmige Böden, z. T. aus Lößlehm oder verwitterten Röttonen — beide mit hydrogeologisch ähnlichen Eigenschaften — größere Teile des Arbeitsgebiets überdecken. Entscheidender ist die Schichtlagerung, die lokale Tektonik sowie Einflüsse aus Relief und Vegetation, die die geologisch bedingten Unterschiede im Abflußverhalten überprägen.

Aus dem Vergleich der Abflußmessungen verschiedener Teileinzugsgebiete (Tab. 10) untereinander ergeben sich Abhängigkeiten zwischen den erwähnten Einflüssen und dem Abflußgeschehen.

Tab. 10. Abflußdaten aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten

Meßstelle	A_{ges} [mm]	A_u [mm]	A_{ges} [%]	s [%]	m [%]	Wald [%]	Fläche [km ²]	Relief [%]
20	298,5	94,8	31,8	0	100	13	3,3	3,2
13	114,8	34,6	30,1	94	6	31	6,4	1,8
9	323,7	113,9	35,2	96	4	52	7,9	0,7
2	557,3	200,4	36,0	100	0	88	9,1	1,2
1	498,1	175,1	35,2	100	0	42	13,6	1,9
4	487,1	156,2	32,1	100	0	97	4,7	1,5
7	534,7	180,2	33,7	100	0	53	7,4	3,2
10	554,7	233,4	42,1	100	0	49	4,1	5,0

s Buntsandstein

m Muschelkalk

Alle Angaben sind Jahreswerte; Lage der Meßstellen in Abb.11.

Der A_u -Abfluß wurde über die Bezugskurven zum Pegel Elz/Neckarelz ermittelt.

- 1) Steile Morphologie verursacht hohe Abflußgeschwindigkeiten der Oberflächenwässer und einen erhöhten A_o -Anteil am Gesamtabfluß.
- 2) Der Einfluß des Waldes macht sich beim Grundwasserabfluß bemerkbar, da durch die Interception des Blätterdaches die Versickerung geringer ist.
- 3) Mit zunehmender Durchlässigkeit der Böden und Speichergesteine steigt der A_u -Anteil an der Gesamtabflußhöhe, da die Niederschläge sehr schnell versickern und dem Grundwasser zufließen können.
- 4) Lehmige Böden vergrößern das A_o/A_u -Verhältnis.
- 5) Bäche in einer Hauptkluftrichtung oder einer Störungszone dagegen sind durch ein kleines A_o/A_u -Verhältnis gekennzeichnet.

Da sich immer mehrere Einflüsse überlagern, ist es schwierig, ein bestimmtes Abflußverhalten auf nur einen dieser Faktoren zurückzuführen.

In Teilniederschlagsgebiet 20 wurde trotz des hohen Gefälles sowohl ein unterdurchschnittlicher A_o -Abfluß als auch ein für Muschelkalkgebiete zu geringer A_u -Abfluß bestimmt. Dieses Teileinzugsgebiet wird unterirdisch zur Schefflenz hin entwässert (Kap. 4.1.7).

Ohne Zweifel werden A_o und A_u im allgemeinen auch von der absoluten Feldkapazität der Böden beeinflusst. Wegen ihrer nicht allzu großen Mächtigkeit blieben diese Zusammenhänge aber unberücksichtigt.

4.2.5. Grundwasserneubildung und A_u -Abfluß

4.2.5.1. Der Abflußzuwachs von Elz und Trienz sowie die Abflußspenden der Teilgebiete

Die Abflußverhältnisse der Bäche oder Bachabschnitte in Trockenzeiten geben neben den geologischen Merkmalen Hinweise auf das Auftreten kluffreicher Zonen (MATTHESS & THEWS 1963: 231) sowie auf hydrogeologisch wirksame Horizonte (z. B. Tonlagen) in Bachniveau. Durch Messung der Niedrigwasserabflüsse nach einer längeren Trockenperiode (= Grundwasserabfluß, MATTHESS & THEWS 1959, 1963) können solche Wasserzutritte oder -verluste zwischen zwei Meßstellen als Abflußzuwachs festgestellt werden (MATTHESS & THEWS 1963: 231).

Durch Auswertung der amtlichen Pegeldata von Neckarelz und der eigenen Messungen an zehn Stellen im Herbst 1979 standen die Werte des mittleren Grundwasserabflusses A_u (MNq) und des mittleren kleinsten Grundwasserabflusses (SoMNq) nach WUNDT (1958) zur Verfügung. Da sich die gemessenen Abflüsse und die daraus errechneten Trockenwetter-Abflußspenden nur auf das Abflußverhalten im Meßzeitraum beziehen, wurden die Meßergebnisse über den SoMNQ auf eine einheitliche Niedrigwasser-Charakteristik reduziert (Kap. 4.2.1.1.3 und Abb. 11).

Durch die Analyse der durchgeführten Trockenwetter-Abflußmessungen konnten sowohl besonders grundwasserreiche Gebiete als auch Gewässerstrecken mit Abflußverlusten lokalisiert werden (Tab. 11).

Die Abflußspendenkarte weist in den Quellgebieten der Gewässer meist nur geringe Abflußspenden ($< 1 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) aus. Oft waren die Oberläufe sogar trocken. Den stärksten Zuwachs erfuhren Elz und Trienz aber noch im oberen Drittel ihres Laufes ($10,71 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ für das Niederschlagsgebiet 8 bzw. $3,75 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ für das Niederschlagsgebiet 7). Hierfür sind jedoch hauptsächlich tektonische Gegebenheiten verantwortlich (Kap. 4.2.2).

Tab. 11. Verzeichnis der reduzierten Trockenwetterabflußspenden

Meßstellen-Nr.	Abfluß Q_{red} [l/s]	Zuwachs dQ_{red} [l/s]	Gebietsgröße F_N [km ²]	Abflußspende q [l/s · km ²]
24, 26	285,0	40,0	13,8	2,90
25	3,0	3,0	7,0	0,43
16	20,0	20,0	13,8	1,45
23	trocken	trocken	1,4	—
22	trocken	trocken	1,6	—
19	125,0	-17,5	4,9	Entnahme
21	100,0	18,0	2,8	6,43
20	2,5	2,5	3,3	0,76
18	30,0	30,0	9,5	3,16
14	110,0	10,0	10,2	0,98
17	2,0	2,0	1,6	1,25
15	80,0	45,0	13,8	3,26
13	trocken	trocken	6,4	—
12	100,0	44,5	6,4	6,95
11	10,0	10,0	4,1	2,44
9	5,5	5,5	7,9	0,70
8	40,0	15,0	1,4	10,71
5	5,0	5,0	3,7	1,35
2	20,0	10,0	9,1	1,10
3	trocken	trocken	4,1	—
1	10,0	10,0	13,6	0,74
4	1,5	1,5	4,7	0,32
7	25,0	22,5	6,0	3,75
6	1,0	1,0	1,4	0,71
10	10,0	10,0	4,1	2,44

Lage der Meßstellen in Abb. 11.

Die höheren Zuwachsspenden in den Mittelläufen von Elz und Trienz ($6,95 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ bzw. $3,26 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ für Teilniederschlagsgebiet 12 bzw. 15) haben ihre Ursache in den Lagerungsverhältnissen (Kap. 4.2.2). Die hohe Abflußspende am Unterlauf der Trienz ($6,43 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) wird durch die Schichtlagerung begünstigt, die der Elz im Teileinzugsgebiet 24 ($4,17 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) durch eine vom Stadtkern Mosbach bis etwa zur Hasbachmündung verlaufenden Störzone.

Einige Teilniederschlagsgebiete (3, 13, 22) sowie viele kleine Bäche und Rinnsale zeigten im Herbst 1979 keinen oberirdischen Abfluß (Abb. 11). Für diese abflußlosen Flächen muß jedoch mit einem unterirdischen Abfluß zum Vorfluter gerechnet werden, wobei angenommen werden kann, daß sie einen Grundwasserabfluß wie das Gebietsmittel ($1,9 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) aufweisen. Danach errechnet sich ein unterirdischer Abfluß aus diesen Gebietsanteilen (Teilniederschlagsgebiete 3, 13, 22, 23) von $24,9 \text{ l/s}$.

Im Niederschlagsgebiet 19 traten starke Wasserverluste auf (negative Abflüsse). Hier fördert die Gemeinde Elztal (Zusammenschluß der Gemeinden Dallau, Neckarburken, Auerbach und Muckental) in der Elzschleife nördlich von Dallau aus 4 Tiefbrunnen bis zu 25 l/s .

Das Gesamtgebiet wies mit 285 l/s und 145 km^2 bis zur privaten Meßstelle in Mosbach eine Trockenwetterabflußspende von $1,97 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ auf. Der Trienzbach (bis Meßstelle 21 an seiner Mündung) bringt bei einer Größe des Einzugsgebietes von $34,5 \text{ km}^2$ und einem Trockenwetterabfluß von 100 l/s eine Trockenwetterabflußspende von $2,90 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ auf.

4. 2. 5. 2. Bestimmung der Grundwasserneubildung aus dem Entleerungsverhalten

In niederschlagsfreien Zeiten zeigt der Trockenwetterabfluß das ungestörte Auslaufen des Aquifers an.

Setzt man bei unterschiedlichen Füllungsgraden der einzelnen Speicher die Trockenwetterabflüsse der Abflußganglinie zusammen, so erhält man die Trockenwetterfalllinie (TWL) (NATERMANN 1951, WUNDT 1953). Sie gibt das durchschnittliche Leerlaufverhalten des Aquifers wieder. Je nach Rückhaltevermögen der Speichergesteine verläuft die TWL entweder flacher (hohe Retention) oder steiler (geringe Retention).

Durch Auswertung der Abflußmessungen bei Trockenwetterbedingungen kann für die ganzjährig gemessenen Teilniederschlagsgebiete die jeweilige TWL mit hinreichender Genauigkeit angegeben werden. Für die Bestimmung der TWL des Gesamtgebietes wurden noch die amtlichen Pegeldata von Neckarelz hinzugezogen.

Der Trockenwetterabfluß nimmt in niederschlagsfreien Zeitabschnitten annähernd exponentiell nach folgender Gleichung ab (CASTANY 1968):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Q_t = Abflußmenge nach t Tagen nach Beginn der Trockenperiode (m^3/s)

Q_0 = Abflußmenge zu Beginn der Trockenperiode (m^3/s)

α = spezifische Konstante des Einzugsgebietes ($1/d$)

t = Zeit (Tage), in der sich die Abflußmenge von Q_0 auf Q_t verringerte

e = EULERSche Zahl

Bei semilogarithmischer Auftragung mehrerer Abflußmessungen einer Trockenperiode [Zeit t (Tage) auf der linearen Ordinate, Abflußmengen Q auf der logarithmischen Abszisse] ergeben sich Q_0 und Q_t durch Extrapolation des geraden Ganglinienteils am Anfang bzw. am Ende der Trockenwetterperiode,

α ergibt sich als Steigung der Geraden:

$$\alpha = 2,303 (\lg Q_0 - \lg Q_t) / t$$

2,303 = Faktor für Umwandlung dekadischer in natürliche Logarithmen

t = Dauer der Trockenperiode in Tagen.

Durch Integration dieser Gleichung ergibt sich der noch frei aus dem Aquifer abflußfähige Vorrat zur Zeit t (t in Tagen):

$$S_t = \int_0^t Q dt = \frac{Q_t}{\alpha} \cdot 86400$$

Setzt man anstelle von Q_t Q_0 ein, so erhält man die insgesamt verfügbare Grundwassermenge bei gefülltem Speicher.

Die Vorratsminderung von Anfang (Abflußmenge Q_0) bis Ende (Abflußmenge Q_t) einer Periode ohne Grundwasserneubildung ergibt sich aus:

$$dS = \frac{86400}{\alpha} (Q_0 - Q_t)$$

$$dS = \text{Vorratsänderung (m}^3\text{)}$$

α, Q_0, Q_t = s. o.

86400 = Umrechnungsfaktor, wenn α aus Tageswerten ermittelt wird (s/d)

Die Division der Vorratsänderung durch das Grundwassereinzugsgebiet (F_{gw}) ergibt:

$$G = dS \cdot 10^{-3} / F_{gw} < \text{m}^3 / \text{km}^2 >$$

Dies entspricht — auf das Jahr verteilt — der Grundwasserneubildungsrate G (mm/a), vermindert um den bereits in der Neubildungsperiode abgeflossenen Anteil (vergl. auch Arbeitskreis Grundwasserneubildung 1977: 67 — 68).

Aufgrund der Niederschlagsverteilung im Gesamtgebiet kann angenommen werden, daß nach ca. 200 Tagen Auslauf aus dem Grundwasserspeicher die erneute Füllung einsetzt, d. h. nach ca. 200 Tagen ist der Auslauf aus dem nicht zwischenzeitlich erneut gespeisten Reservoir beendet.

Der zugehörige Abfluß nach 200 Tagen ergibt sich aus der Auslaufkurve zu:

$$Q_{200} = 0,255 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bei einem aus der Auslaufkurve interpolierten Abfluß Q_0 von $1,318 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ende der Niederschlagsperiode (Ende März: Beginn des Auslaufens) ergibt sich der dazugehörige minimal abflußfähige Anteil zu:

$$S_0 = \frac{86\,400 \cdot 1,318}{0,0121} = 9,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

und nach 200 Tagen:

$$S_{200} = \frac{86\,400 \cdot 0,255}{0,0121} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Innerhalb von 200 Tagen sind also mindestens $7\,600\,000 \text{ m}^3$ aus dem Gesamtgebiet ausgelaufen. Diese Menge entspricht der Vorratsänderung im Untersuchungszeitraum.

Durch Umrechnung dieses Wertes für die Vorratsänderung (= 48,4 mm) unter Berücksichtigung der Größe des Grundwassereinzugsgebietes (157 km^2) auf die Versickerungsspende läßt sich bei bekanntem unterirdischem Abfluß A_u (174 mm, Kap. 4.2.4) die **Grundwasserneubildungsrate** für den Untersuchungszeitraum mit 222 mm angeben.

Die Neubildungsraten der Teilgebiete sind Tab. 12 zu entnehmen. Sie schwanken in den von Grundwassergewinnungsmaßnahmen relativ unbeeinflussten Teilniederschlagsgebieten (alle untersuchten außer 14, 19, 20) zwischen 40,8 mm (Gebiet 13) und 306,5 mm (Gebiet 11 und 12).

Für die überdurchschnittlich hohen Grundwasserneubildungsraten (z. B. Trienzgebiet, Gebiet 11 und 12, Gebiet 3, 5 und 8) gilt sinngemäß das gleiche wie für die hohen Trockenwetter- (A_u)-Abflußmengen (Kap. 4.2.2 und 4.2.5.1), da sich die Neubildungsrate (I_u) aus Vorratsänderung und A_u -Abfluß zusammensetzt.

Die I_u -Bestimmung für Teilniederschlagsgebiet 19, 20 und 14 ist sicherlich zu gering und nur eine Folge der Grundwasserförderung in der Elzschleife N von Dallau (Kap. 4.2.5.1). Diese zu geringen Raten lassen aber, zumindest für diesen Bereich des Arbeitsgebiets, eine im wesentlichen von Norden nach Süden gerichtete Grundwasserströmung erkennen.

Tab. 12. Bestimmung der Grundwasserneubildung aus dem Auslaufverhalten

Meß- stellen- Nr.	F _N [km ²]	α-Wert	Q ₀ [l/s]	S ₀ [Mio. m ³]	Q ₂₀₀ [l/s]	S ₂₀₀ [Mio. m ³]	dS [$\frac{\text{Mio. m}^3}{\text{mm}}$]	A _u [$\frac{\text{Mio. m}^3}{\text{mm}}$]	I _u [$\frac{\text{Mio. m}^3}{\text{mm}}$]
22, 23 u. 24	12,6	0,00541 bis 0,0121	wegen starker Förderung nicht bestimmbar						
25	7,0	0,0198	89	0,04	2	0,00	0,40 57,1	1,03 146,5	1,43 203,6
16	13,8	0,0112	141	0,11	15	0,01	0,10 72,5	2,67 193,5	2,77 266,0
19 u. 20	8,2	0,00830 bis 0,0131	20	0,01	1	0,00	0,01 12,2	0,23 28,6	0,24 40,8
Trienz	34,5	0,00228 bis 0,0135	500	3,2	93	0,60	2,6 75,4	6,72 194,7	9,32 270,1
18	9,5	0,00317 bis 0,0175	170	0,84	76	0,14	0,70 73,7	1,77 186,1	2,47 259,8
14	10,2	0,0106	14	0,11	3	0,02	0,09 8,8	0,16 15,2	0,25 24,0
11 u. 12	10,5	0,0104	149	1,24	42	0,25	0,99 94,3	2,23 212,2	3,22 306,5
13	6,4	0,0220	46	0,18	0	0,00	0,18 28,2	0,22 34,6	0,40 62,8
3, 5 u. 8	9,2	0,0129	112	0,75	15	0,10	0,65 70,7	1,89 205,2	2,54 275,9
9	7,9	0,0146	61	0,36	3	0,02	0,34 43,0	0,90 114,1	1,24 157,0
2	9,1	0,0150	124	0,72	6	0,04	0,68 74,7	1,82 200,1	2,50 274,7
1	13,6	0,0150	134	0,77	6,8	0,04	0,73 53,7	2,38 175,0	3,11 235,6

I_u ist die Grundwasserneubildung.
Der A_u ist über die in Kap. 4.2.4 beschriebenen Bezugskurven ermittelt.
Lage der Meßstellen in Abb.11.

Unter der Voraussetzung, daß ober- und unterirdisches Einzugsgebiet übereinstimmen, läßt sich sogar ganz grob die geförderte Grundwassermenge angeben: Setzt man eine einheitliche mittlere Grundwasserneubildungsrate von 222 mm, einen mittleren A_u-Abfluß von 174 mm (Kap. 4.2.4) und somit eine mittlere Vorratsänderung von 48 mm im Untersuchungszeitraum an, so ergibt sich für die Gebiete 19 und 20 ein theoretischer Wert von 0,39 Mio. m³ für die Vorratsänderung, der einem reellen von 0,01 Mio. m³ gegenübersteht. Die geförderte Menge würde sich somit aus der Differenz beider Werte zu 0,38 Mio. m³ ergeben, für Teilgebiet 14 entsprechend 0,49 Mio. m³ (= 27,9 l/s, bezogen auf beide Gebiete).

Die in Abb. 13 dargestellten Auslaufkurven der Teileinzugsgebiete zeigen in Abhängigkeit von den im Niederschlagsgebiet anstehenden Gesteinen einen unterschiedlichen Verlauf. Die Schwankungsbereiche der α-Werte [von 0,00228 (hohe Retention) bis 0,0220 (geringe Retention)] spiegeln diese Abhängigkeiten wider. In Kalkgebieten lassen sich aus ihnen sogar halb-quantitative Aussagen über den Verkarstungsgrad der Speichergesteine treffen (HOHBERGER

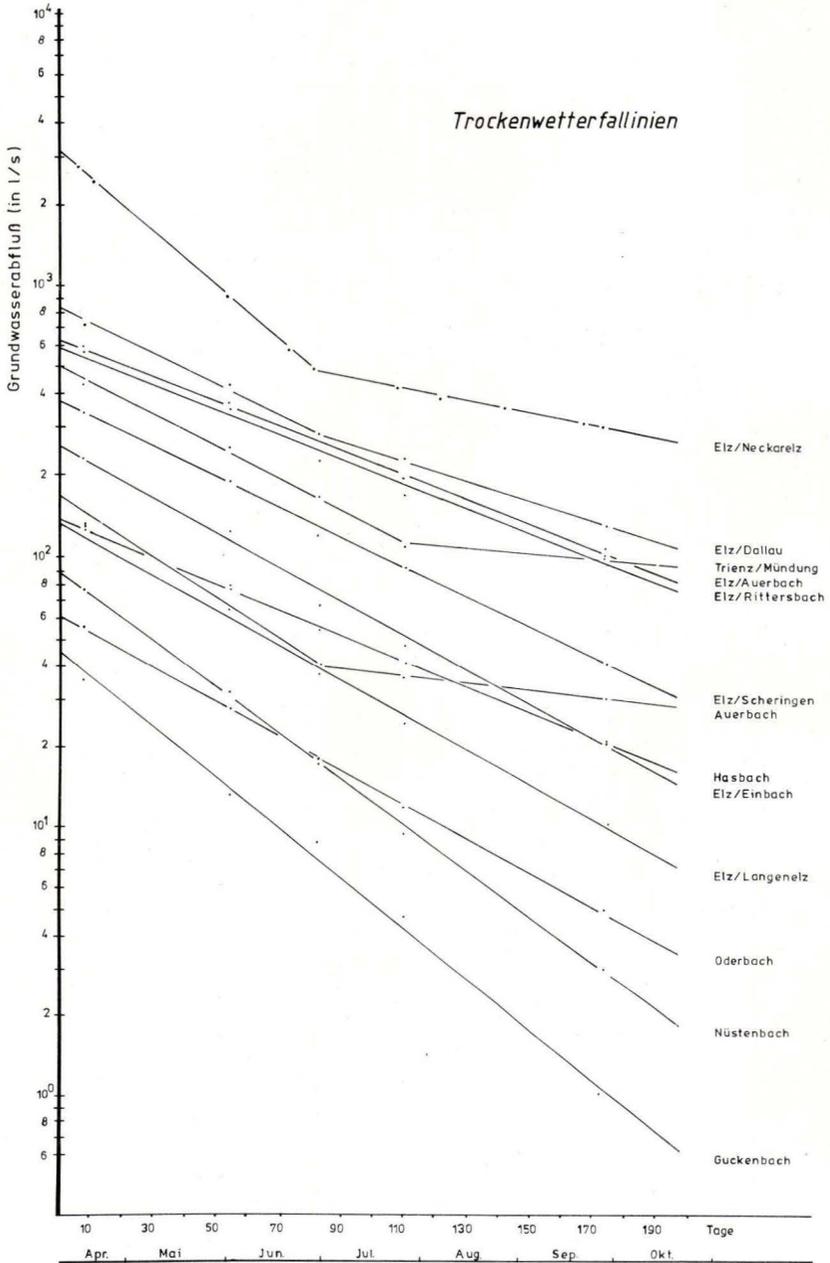


Abb. 13. Trockenwetterfalllinien.

1977: 84). Demzufolge würde im Teileinzugsgebiet 18 der Knickpunkt der TWL in der semilogarithmischen Darstellung anzeigen, daß ab einem Abfluß von $> 400 \text{ l/s}$ der Hauptanteil der Entwässerung über größere Gerinne oder offene Klüfte erfolgt.

Unterschiedliche α -Werte in der semilogarithmischen Darstellung einer TWL sprechen für geologisch-lithologische und/oder tektonische Inhomogenitäten im Einzugsgebiet. In den Buntsandsteingebieten (z. B. Teileinzugsgebiet Trienz) läßt sich dies durch eine Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit (MATTHESS 1970: 11) mit zunehmender Tiefe erklären: sie beruht auf einer Verringerung des Kluftvolumens, die durch die Abnahme des Lösungsvermögens der Sickerwässer zu erklären ist. Bei Niedrigwasser gelangt Grundwasser ausschließlich aus tieferen Bereichen mit geringem Kluftraum zum Abfluß. Dort ist die Fließgeschwindigkeit kleiner als in höheren Zonen. In den Muschelkalkarealen (z. B. Teileinzugsgebiet 18) kommt eine mit der Tiefe abnehmende Verkarstung hinzu. Dadurch nimmt das Kluftvolumen ab und die Verweildauer steigt ebenfalls.

4.2.6. Wasserbilanz

Zur Aufstellung der Bilanz wird die insgesamt dem Bilanzgebiet während des betrachteten Jahres zugeführte Wassermenge der ihm insgesamt entzogenen Wassermenge gegenüber gestellt:

Die zugeführte Wassermenge entspricht dem Gebietsniederschlag N . Die weggeführte Wassermenge enthält die Bestandteile aktuelle Gebietsverdunstung ET_{reell} und den Gesamtabfluß der Elz am Pegel Neckarelz A_{ges} .

Aufgrund der unterschiedlichen Größe und Lage von Niederschlags- und (unterirdischem) Einzugsgebiet muß auch mit einem unterirdischen Grundwasserzu- und -abstrom gerechnet werden. Diese Größen sind jedoch quantitativ nicht zu fassen; es muß vereinfachend angenommen werden, daß sie sich im Jahresmittel ausgleichen.

Bei Erhöhung der Grundwasserreserven während eines bestimmten Zeitraums ist der Ansatz für die aus dem Bilanzgebiet weggeführte Wassermenge um dR zu gering. Der Betrag der Reserveänderung muß deshalb zu den weggeführten Wassermengen addiert werden. Somit lautet die Bilanz von März 1979 — Februar 1980 für das 157 km^2 große Einzugsgebiet der Odenwälder Elz:

Zugeführt:	N	990,5 mm	(Kap. 4.2.3)	=	155,5 Mio. m^3
weggeführt:	ET_{reell} (HAUDE)	501,9 mm	(Kap. 4.2.3)	=	78,8 Mio. m^3
	A_{ges}	+ 443,4 mm	(Kap. 4.2.4)	=	69,6 Mio. m^3
		945,3 mm		=	148,4 Mio. m^3
	+ dR	+48,4 mm	(Kap. 4.2.5.2)	=	+7,6 Mio. m^3
		993,7 mm		=	156,0 Mio. m^3

Es ergibt sich ein Fehlbetrag von nur $0,5 \text{ Mio. m}^3$ für die zugeführte Wassermenge.

Für die einzelnen Teilniederschlagsgebiete² ergeben sich unter Zugrundelegung der Gebietsverdunstung nach HAUDE ($V = 501,9 \text{ mm}$ für das Bilanzjahr) die in Tab. 13 zusammengestellte

² Für Einzugsgebiete mit $F_E = F_N$ konnte die Wasserbilanz direkt aufgestellt werden. Wird F_E größer als F_N , müssen die Posten der Wasserbilanz, insbesondere der Abfluß, auf das unterirdische Einzugsgebiet korrigiert werden.

Tab. 13. Wasserbilanzfaktoren der Teilgebiete [mm]
($E_{T_{reell}}$ nach HAUDE = 501,9 mm)

Meßst.- Nr.	N	A_{ges}	A_o	A_u	(R - B)	I_u
Trienz	1039,5	452,7	258,0	194,7	84,9	279,6
25	960,5	402,4	255,9	146,5	56,2	202,7
16	985,3	507,1	313,6	193,5	-23,7	169,8
17 u. 21	921,2	317,1	181,3	135,8	102,8	238,6
20	855,4	298,5	203,7	94,8	55,0	149,8
18	908,3	378,4	192,3	186,1	28,0	214,1
12	970,2	408,8	196,6	212,2	59,5	271,7
11	1025,1	489,0	276,3	212,7	34,2	246,9
3 u. 8	986,3	447,1	241,9	205,2	37,3	242,5
9	890,4	323,7	209,6	114,1	64,8	178,9
5	1074,3	565,1	335,7	229,4	7,3	236,7
2	1021,6	557,3	357,2	200,1	-37,6	162,5
1	1031,3	498,1	323,1	175,0	31,3	206,3
4	1068,7	487,1	330,9	156,2	79,7	235,9
7	1104,3	534,7	354,5	180,2	67,1	247,3
10	1021,3	554,7	321,3	233,4	-35,3	198,1
15	1003,4	466,2	254,8	211,4	35,3	246,7

Lage der Meßstellen in Abb. 11.

ten Bilanzfaktoren. Da die überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen überwiegend in Monaten mit geringen Verdunstungsraten fielen (Kap. 4.2.3), weisen fast alle Teileinzugsgebiete eine Rücklagenbildung auf.

Die Grundwasserneubildungsraten der untersuchten Teilgebiete liegen im Mittel bei 210 mm. Zum Niederschlag weisen sie nicht immer einen synchronen Verlauf auf. Die Extremwerte zeigen jedoch einen klaren Zusammenhang. Diese über die Wasserbilanz ermittelten Grundwasserneubildungsraten sind mit den aus den MAILLETschen Auslaufkurven ermittelten Werten i. a. recht gut vergleichbar (Kap. 4.2.5.2).

4.3. Fehlerbetrachtung

Bei der Betrachtung der Bilanz (Kap. 4.2.6) stellt man eine recht gute Übereinstimmung der dem Bilanzgebiet zu- bzw. abgeführten Wassermengen fest. Dies darf jedoch nicht über meßtechnische und methodische Fehler hinwegtäuschen, die sich bei der Aufstellung der Bilanz teilweise wieder ausgleichen.

Mit einem relativ geringen Fehler sind die Daten der amtlichen Abflußmessungen behaftet. Das Wasserwirtschaftsamt Heidelberg, Außenstelle Buchen, überprüft in kürzeren Abständen die Bezugskurve des amtlichen Pegels in Neckarelz. Da das Bachbett an der Pegelstelle gut ausgebaut ist, dürfte der Meßfehler $\pm 5\%$ nicht überschreiten. Bei den eigenen Abflußmessungen sind, bedingt durch die unterschiedliche Qualität der Meßstellen, die Fehler etwas größer. Sie dürften mit $\pm 5\%$ bis zu $\pm 25\%$ (an der Meßstelle 14) anzusetzen sein. Dies ergab sich aus der Gegenüberstellung von Wiederholungsmessungen mit anderen Meßlotrechten.

Einen größeren relativen Fehler dürfte der Gebietswert der Niederschlagshöhe aufweisen. Nach JOHANNSEN & KUMM (1978: 5) ist er mit etwa $\pm 10\%$ anzusetzen. Ein zusätzlicher Fehler entsteht dadurch, daß, um zu Gebietswerten für die Niederschlagsmengen zu gelangen, die Niederschlagshöhen auf die Bilanzgebietsfläche umgerechnet werden müssen. Meist deutlich

ausgeprägte oberirdische Wasserscheiden erlauben die Bestimmung der Größe des Bilanzgebietes auf $< \pm 2\%$ genau. Somit ist die dem Bilanzgebiet zugeordnete Niederschlagsmenge mit einem Fehler von etwa 12% behaftet.

In die Berechnung der reellen Evapotranspiration gehen sowohl zahlreiche Meßwerte als auch nur grob abschätzbare Faktoren (Albedowerte oder nutzbare Feldkapazität) ein. Es ist daher kaum möglich, für alle diese Ausgangsdaten Fehlergrenzen anzugeben. Nach LILLICH, KUCKELKORN & HOFMANN (1973: 62) kann die ET_{reell} einen Fehler bis zu 25% aufweisen. Somit ergeben sich für die einzelnen Mittelwerte der Bilanzgrößen (Kap. 4.1.7) folgende absolute *maximale* Fehler:

$$N \quad 933,1 \text{ mm} \pm 112,0 \text{ mm} = 146,5 \text{ Mio. m}^3 \pm 17,6 \text{ Mio. m}^3$$

$$A_{\text{ges}} \quad 382,2 \text{ mm} \pm 19,1 \text{ mm} = 60,0 \text{ Mio. m}^3 \pm 3,0 \text{ Mio. m}^3$$

$$ET_{\text{reell}} \quad 509,2 \text{ mm} \pm 127,3 \text{ mm} = \underline{79,9 \text{ Mio. m}^3 \pm 19,9 \text{ Mio. m}^3}$$

$$A_{\text{ges}} + ET_{\text{reell}} \quad = 139,9 \text{ Mio. m}^3 \pm 22,9 \text{ Mio. m}^3$$

Der relative Gesamtfehler für ein durchschnittliches Jahr liegt also zwischen 10 und 15% . Diese Fehlerquote gibt eine Vorstellung über die erreichte Genauigkeit und muß nach LILLICH, KUCKELKORN & HOFMANN (1973: 63) als recht befriedigend angesehen werden.

5. Schriftenverzeichnis

- Arbeitskreis Grundwasserneubildung der Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. — Geol. Jb., C 19: 3—98, 30 Abb., 9 Tab.; Hannover.
- BECKSMANN, E. (1952): Zur Frage der Schutzmaßnahmen für den Kirchbrunnen in Auerbach (Krs. Mosbach). — Unveröff. Gutachten Geol. L.-Amt Baden-Württemberg, Tgb. Nr. 1075/52; Heidelberg.
- (1956): Die Ergebnisse der Wasserbohrung Neckarburken 1956 und die natürlichen Grundlagen der Wasserversorgung im Raum Mosbach-Auerbach. — Unveröff. Gutachten Geol. L.-Amt Baden-Württemberg, Tgb. Nr. 5307/56; Heidelberg.
- CARLÉ, W. (1960): Gutachten zur Erschließung weiteren Trinkwassers für die Stadt Mosbach (Bl. 6620 Mosbach 1:25 000). — Unveröff. Gutachten Geol. L.-Amt Baden-Württemberg, Nr. IV/3-793/60; Freiburg.
- CASTANY, G. (1968): Prospection et exploitation des eaux souterraines. — 717 S.; Paris (Dunod).
- DAMMANN, W. (1965): Meteorologische Verdunstungsmessung, Näherungsformeln und die Verdunstung in Deutschland. — Wasserwirtschaft, 55: 315—321, 2 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Sonderhefte für das Land Baden-Württemberg, Abflußjahre 1958 — 1978, herausgeg. von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe.
- DIN 4049, Teil 1 (1979): Hydrologie, Begriffe quantitativ. Deutsche Normen; Berlin, Köln (Beuth).
- DISKIN, M. H. (1969): THIESSEN Coefficients by a Monte Carlo Procedure. — J. Hydrology, 8: 323 — 335, 5 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- EINSELE, G., BOZORGZAD-ARBAB, D., HEITEL, H., KLOCK, M., & SEILER, H. P. (1969): Hydrogeologische Untersuchungen in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. — Geol. Mitt., 9: 1 — 74, 24 Abb., 15 Tab.; Aachen.
- EISSELE, K. (1966): Über Grundwasserbewegung in klüftigem Sandstein. — Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemberg, 8: 105 — 111, 2 Abb.; Freiburg.
- FINDEISEN, H. K. (1970): Industrierwassererschließung im Ostteil der Gemarkung Neckarelz, Landkreis Mosbach. — Unveröff. Gutachten Geol. L.-Amt Baden-Württemberg, Nr. IV/1-1465/67; Freiburg.
- GANGEL, L. (1975): Beziehungen zwischen Grundwasserabfluß und tektonischem Bau im Buntsandstein des nördlichen Odenwaldes. — Unveröff. Inaug.-Diss., 177 S., 31 Abb., 11 Tab.; Frankfurt a. M.
- GRAY, D. M. (1970): Handbook on the principles of hydrology. — Secretariat Canadian Nat. Com. internat. Hydrol. Decade; Ottawa.
- HÖBERGER, K. (1977): Grundwasserbilanz, Chemismus und Stoffaustrag im Einzugsgebiet der Tauber oberhalb von Bad Mergentheim. — Diss., 188 S., 51 Abb., 26 Tab.; Tübingen.
- JOHANNSEN, H. H., & KUMM, H. (1978): Monatliche und jährliche Gebietsniederschlagshöhen im deutschen Donaugebiet von 1931 — 1960. — Dt. Wetterdienst, 71 S.; Offenbach (unveröff.).
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Grundwasserabflüsse. — Z. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol., Hydrochem.: 89 — 95, 6 Abb.; Hannover.
- Klimaatlas von Baden-Württemberg (1953). — 75 Kt., 9 Diagr., Erl.; Bad Kissingen.
- LILICH, W., KÜCKELKORN, K., & HOFMANN, W. (1973): Untersuchungen zum Grundwasserhaushalt im repräsentativen Lockergesteinsgebiet Fuhrberger Feld Hannover — Bilanzjahre 1967 und 1968. — Beih. geol. Jb., 107: 1 — 67, 37 Abb., 1 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- MATTHESS, G. (1970): Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. — Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., 58, 105 S., 20 Abb., 18 Tab., 4 Taf.; Wiesbaden.
- & THEWS, J.-D. (1959): Erfahrungen bei der hessischen hydrogeologischen Spezialkartierung 1:25 000 in den Jahren 1957 und 1958. — Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 87: 417 — 428, 4 Abb.; Wiesbaden.
- — (1963): Der Abflußzuwachs als Hilfsmittel bei der Beurteilung von Wassererschließungsmöglichkeiten. — Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 91: 231 — 236, 2 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.

- NATERMANN, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflußlinie (TWL). — Mitt. Bundesanst. Gewässerkd., 22: 24 — 29, 3 Abb.; Koblenz.
- (1958): Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem Au-Linien-Verfahren. — 44 S., 20 Abb., 15 Taf.; Düsseldorf (Minist. Ernährung, Landwirtsch. u. Forsten, Nordrhein-Westfalen).
- PEPPLER, W. (1922): Die Niederschlagsverhältnisse in Baden, dargestellt aufgrund 30jähriger Beobachtungen (1888 — 1917). — Veröff. bad. Landeswetterwarte, 16 S., 9 Tab.; Karlsruhe.
- PFAU, R. (1966): Ein Beitrag zur Frage des Wassergehaltes und der Beregnungsbedürftigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden im Raume der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft. — Meteorol. Rdsch, 19, 2: 33 — 46, 11 Abb., 8 Tab.; Berlin.
- RENGER, M., STREBEL, O., & GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten, 4. Grundwasserneubildung. — Z. Kulturtechn. u. Flurberein., 15: 353 — 366, 3 Abb., 3 Tab.; Berlin, Hamburg.
- Richtlinien für Abflußmessungen (1971). — Hrsg. Gewässerkdl. Anst. d. Bundes u. d. Länder; Koblenz.
- SCHRAFT, A. (1981): Wasserhaushalt, Chemismus und Stoffbilanz der Odenwälder Elz (südöstlicher Odenwald/Bauland). — Unveröff. Inaug.-Diss., 199 S., 58 Abb., 25 Tab., 19 Taf.; Heidelberg.
- (1982): Ein FORTRAN IV-Programm zur Konstruktion von THIESSEN-Polygonen. — Geol. Jb. Hessen, 110: 257 — 266, 1 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- (1983): Statistische Untersuchungen zu Stoffbestand und Genese von Grundwässern im südöstlichen Odenwald und Bauland. — Geol. Jb., C 35: 3 — 49, 17 Abb., 8 Tab.; Hannover.
- SCHUBUTH, H. (1973): Beziehungen zwischen Grundwasserabfluß und tektonischem Bau im Buntsandstein des Mainvierecks zwischen Lohr und Aschaffenburg im Spessart. — Inaug.-Diss., 179 S., 24 Abb., 13 Tab.; Frankfurt a. M.
- UHLIG, S. (1954): Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. — Mitt. dt. Wetterdienst, 1 (6): 1 — 24; Bad Kissingen.
- (1959): Wasserhaushaltsbetrachtungen nach THORNTHWAITE. — Z. Acker- u. Pflanzenbau, 109,4: 384 — 407, 6 Abb., 10 Tab.; Berlin, Hamburg.
- VILLINGER, E. (1969): Karsthydrologische Untersuchungen auf der Reutlinger Alb (Schwäbischer Jura). — Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemberg, 11: 201 — 277, 22 Abb.; Freiburg.
- WALTER, H. (1974): Hydrogeologie und Wasserhaushalt im oberen Horlofftal (westlicher Vogelsberg). — Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., 69: 1 — 104, 13 Abb., 17 Tab., 2 Taf.; Wiesbaden.
- WECHMANN, A. (1964): Hydrologie. — 523 S.; München, Wien (Oldenburg).
- WROBEL, J. P. (1971): Abflußspendenvergleiche an süddeutschen Flüssen unter besonderer Berücksichtigung der Geologie ihrer Einzugsgebiete. — Geologica bavarica, 64: 242 — 253, 2 Abb., 2 Tab.; München.
- WUNDT, W. (1953): Gewässerkunde. — 320 S., 185 Abb., 7 Tab.; Berlin (Springer).
- (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. — In: KELLER, R., GRAHMANN, R., & WUNDT, W.: Das Wasserdargebot in der Bundesrepublik Deutschland, Tl. II: GRAHMANN, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. — Forsch. dt. Landeskd., 105: 47 — 54, 2 Abb.; Remagen.

Manuskript eingegangen am 25. 2. 1982

Anschrift des Verfassers:

Dr. ADALBERT SCHRAFT

Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Leberberg 9, 6200 Wiesbaden

6.7 Potentielle Verdunstung

Potentielle Verdunstung nach HAUDE (mm)

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1958	12,1	12,4	15,6	46,7	80,0	92,5	106,4	94,2	59,1	23,1	11,7	10,9
1959	10,6	13,5	25,6	56,4	94,1	113,4	168,1	109,3	111,5	42,0	11,1	12,2
1960	12,0	12,2	24,6	54,0	79,5	108,8	87,3	66,2	44,9	23,9	15,9	9,9
1961	10,7	15,1	28,9	44,6	54,1	79,4	85,1	90,7	63,0	32,1	13,4	11,7
1962	12,9	12,4	16,4	58,1	64,8	127,9	100,0	125,3	56,7	34,2	12,2	9,8
1963	10,5	10,7	19,2	57,7	86,5	91,6	134,3	86,2	60,0	28,3	17,3	8,9
1964	6,7	14,2	17,2	60,5	100,4	131,6	196,6	119,1	63,2	29,3	16,4	10,1
1965	9,4	10,7	18,9	37,5	66,1	84,5	86,7	84,0	39,6	30,1	12,2	13,0
1966	11,6	16,7	17,2	45,9	83,1	96,3	79,7	76,9	52,2	26,2	9,5	11,0
1967	8,9	15,4	22,2	48,3	83,4	72,6	134,3	97,1	43,1	31,6	11,3	8,4
1968	8,8	11,2	23,5	64,8	65,2	87,5	91,9	57,0	43,1	29,4	13,1	9,6
1969	9,6	9,8	19,2	47,5	87,3	84,2	126,3	94,5	58,5	29,6	18,1	8,7
1970	8,4	10,9	16,1	36,6	78,6	126,2	99,9	97,9	60,9	26,0	13,7	9,2
1971	9,2	11,3	17,9	68,5	108,5	71,7	168,4	133,5	64,8	39,9	10,2	9,5
1972	8,3	11,8	25,6	44,3	61,6	83,1	111,2	85,1	43,5	32,3	10,0	11,8
1973	8,4	11,5	25,2	45,1	99,1	105,4	115,6	146,0	79,7	30,8	16,0	10,3
1974	11,9	15,7	24,1	69,2	79,3	90,1	96,1	105,7	60,1	13,3	11,9	12,4
1975	13,2	14,8	26,6	57,5	84,1	75,0	96,4	94,7	46,9	16,6	8,7	6,5
1976	7,4	11,3	19,8	47,9	94,7	124,7	160,2	116,6	43,5	23,7	10,5	6,9
1977	5,2	11,2	24,3	38,4	83,6	72,5	127,7	79,9	45,4	24,0	11,7	7,9
1978	10,6	9,6	21,1	57,9	60,6	88,6	97,4	92,5	45,4	21,0	8,3	9,2
1979	6,0	10,6	21,7	39,5	82,5	114,7	117,3	81,9	60,1	37,3	10,9	12,5
1980	9,6	15,0										

Potentielle Verdunstung nach THORNTHWAITE (mm)

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1958	0,3	9,5	0,0	32,8	93,2	101,5	119,1	110,1	77,4	38,5	17,7	7,5
1959	0,0	0,0	32,0	51,8	84,5	109,9	134,1	105,7	72,2	34,8	9,4	8,5
1960	0,0	3,9	28,4	47,9	88,5	115,6	106,6	100,5	63,4	40,9	22,3	3,2
1961	0,3	16,4	29,6	61,8	68,9	104,8	102,0	100,2	86,0	46,6	12,5	1,1
1962	7,1	1,3	3,8	54,1	70,7	106,5	110,7	109,8	68,5	43,2	9,2	0,0
1963	0,0	0,0	13,4	52,9	81,6	107,9	124,3	100,5	74,1	34,7	26,4	0,0
1964	0,0	5,2	8,5	52,8	92,5	117,3	131,2	100,7	69,8	32,3	19,3	0,5
1965	5,7	0,0	18,0	43,6	81,5	111,8	109,2	97,2	65,9	38,5	9,8	14,0
1966	0,0	21,8	15,3	56,1	87,4	112,7	105,0	97,7	70,1	51,5	6,1	7,7
1967	1,8	11,6	26,3	40,1	84,2	100,2	131,6	103,1	68,6	50,2	11,2	0,0
1968	0,0	6,1	22,5	53,4	77,3	108,8	113,1	98,7	70,6	46,9	12,2	0,0
1969	1,9	0,0	13,6	42,9	90,2	99,2	129,6	103,4	72,3	42,1	18,3	0,0
1970	0,0	0,0	8,0	34,8	79,9	121,3	112,4	109,7	72,2	42,0	22,0	0,0
1971	0,0	4,5	5,7	54,0	98,6	94,5	129,2	113,4	62,7	38,4	10,3	8,6
1972	0,0	10,1	18,9	47,0	78,6	101,5	126,7	102,7	59,3	33,1	15,7	0,0
1973	0,0	2,4	18,0	32,5	89,3	111,6	119,5	116,3	77,1	33,5	12,7	0,0
1974	12,9	13,2	33,9	48,9	77,5	99,3	108,4	109,2	71,3	23,0	14,6	14,0
1975	13,2	6,6	18,4	42,9	80,7	103,0	126,1	119,1	80,7	30,8	10,9	0,8
1976	6,2	2,7	11,6	41,6	89,5	121,4	136,1	101,7	63,5	43,8	15,4	0,0
1977	1,9	15,0	33,5	34,6	78,2	105,8	118,6	102,5	63,8	51,7	17,4	4,4
1978	3,6	0,0	29,8	48,5	81,0	103,9	112,2	98,1	67,1	39,5	10,8	4,2
1979	0,0	1,4	26,0	37,6	81,2	117,8	113,7	96,1	71,1	43,9	14,1	14,2

6.8 Korrigierte potentielle Verdunstung

Korrigierte potentielle Verdunstung nach HAUDE (mm)

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1958	12,1	12,4	15,6	46,7	80,0	92,5	106,4	92,8	59,1	23,1	11,7	10,9
1959	10,6	13,5	25,6	56,4	94,1	104,7	48,3	34,7	58,6	12,0	8,4	11,3
1960	12,0	12,2	24,6	54,0	79,5	108,8	54,0	58,2	44,9	23,9	15,9	9,9
1961	10,7	15,1	28,9	44,6	54,1	79,4	85,1	90,7	63,0	32,1	13,4	11,7
1962	12,9	12,4	16,4	58,1	64,8	127,9	52,3	66,0	19,5	29,9	8,6	8,4
1963	10,5	10,7	19,2	57,7	86,5	56,4	129,7	27,3	60,0	28,3	17,3	8,9
1964	6,7	14,2	17,2	60,5	100,4	131,6	43,4	33,7	43,7	29,3	16,4	10,1
1965	9,4	10,7	18,9	37,5	66,1	84,5	86,7	84,0	39,6	30,1	12,2	13,0
1966	11,6	16,7	17,2	45,9	83,1	96,3	79,7	76,9	52,2	26,2	9,5	11,0
1967	8,9	15,4	22,7	48,3	83,4	72,6	134,3	37,0	35,5	31,6	11,3	8,4
1968	8,8	11,2	23,5	64,8	65,2	87,5	91,9	57,0	43,1	29,4	13,1	9,6
1969	9,6	9,8	19,2	47,5	87,3	84,2	126,3	74,2	58,5	29,5	15,8	8,7
1970	8,4	10,9	16,1	36,6	78,6	126,2	82,0	77,8	30,4	21,1	13,7	9,7
1971	9,2	11,3	17,9	68,5	108,5	68,9	135,5	26,7	47,9	13,6	6,1	9,5
1972	8,3	11,8	25,6	44,3	61,6	83,1	111,2	72,6	41,4	31,4	10,0	11,8
1973	8,4	11,5	25,2	45,1	99,1	105,4	91,7	89,2	23,5	9,4	16,0	10,3
1974	11,9	15,7	24,1	69,2	76,0	79,2	85,2	105,7	51,3	11,5	11,9	12,4
1975	13,2	14,8	26,6	57,5	84,1	73,4	96,4	91,3	37,1	15,2	8,6	6,5
1976	7,4	11,3	19,8	47,9	94,7	48,6	42,9	45,6	17,6	23,2	10,3	6,9
1977	5,2	11,2	24,3	38,4	83,6	62,5	117,4	74,1	40,9	21,0	11,7	7,9
1978	10,6	9,6	21,1	57,9	60,6	88,6	97,4	92,5	44,7	21,0	8,3	9,2
1979	6,0	10,6	21,7	39,5	82,5	114,7	71,6	44,7	53,6	28,0	8,6	12,5
1980	9,6	15,0										

Korrigierte potentielle Verdunstung nach THORNTHWAITE (mm)

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1958	0,3	9,5	0,0	32,8	93,2	101,3	104,7	110,1	72,2	38,5	12,7	7,5
1959	0,0	0,0	32,0	51,8	76,1	88,4	64,8	90,1	13,7	34,8	9,4	8,5
1960	0,0	3,9	28,4	46,8	88,4	83,3	92,1	100,5	35,9	40,9	22,3	3,2
1961	0,3	16,4	29,6	61,8	68,9	104,8	102,0	98,4	70,3	46,6	12,5	1,1
1962	7,1	1,3	3,8	54,1	70,7	85,2	80,4	64,2	68,5	16,0	9,2	0,0
1963	0,0	0,0	13,4	50,8	60,4	107,9	81,2	100,5	56,9	34,7	26,4	0,0
1964	0,0	5,2	8,5	52,2	92,5	102,0	63,6	73,1	69,8	32,3	19,3	0,5
1965	5,7	0,0	18,0	43,6	81,5	111,8	109,2	94,5	65,9	35,3	9,8	14,0
1966	0,0	21,8	15,3	56,1	87,3	112,4	101,1	97,7	67,7	51,5	6,1	7,7
1967	1,8	11,6	26,3	40,1	84,2	90,8	86,1	84,6	68,6	50,2	11,2	0,0
1968	0,0	6,1	22,5	53,4	77,2	107,5	98,5	98,7	70,6	46,9	12,2	0,0
1969	1,9	0,0	13,6	42,9	90,2	99,1	105,0	103,4	52,3	22,4	18,3	0,0
1970	0,0	0,0	8,0	34,8	79,9	105,0	95,8	71,1	63,3	42,0	22,0	0,0
1971	0,0	4,5	5,7	53,0	96,9	94,5	92,2	84,4	26,4	34,0	10,3	8,6
1972	0,0	10,1	18,9	47,0	78,6	101,5	107,6	97,5	54,7	33,1	15,7	0,0
1973	0,0	2,4	18,0	32,5	86,1	97,0	104,4	71,9	35,1	33,5	12,7	0,0
1974	12,9	13,2	33,9	45,1	73,4	92,4	108,4	92,9	61,3	23,0	14,6	14,0
1975	13,2	6,6	18,4	42,9	73,8	103,0	105,8	86,1	64,7	30,8	10,9	0,8
1976	6,2	2,7	11,6	38,1	66,8	61,4	65,7	51,8	63,5	31,6	15,4	0,0
1977	1,9	15,0	33,5	34,6	64,8	98,2	78,6	91,7	43,6	51,7	17,4	4,4
1978	3,6	0,0	29,8	45,7	81,0	98,8	112,2	74,7	67,1	39,5	10,8	4,2
1979	0,0	1,4	26,0	37,6	79,2	90,3	84,4	85,8	44,4	34,7	14,1	14,2

6.9 Wasserbilanz (alle Angaben jeweils in mm/km²)

Jahressummen der hydrologischen Jahre
(Verdunstung nach HAUDE/RENGER)

Jahr	V	(R-B)	N	A	d nF
1959	481,09	-78,77	634,70	313,26	-80,88
1960	491,72	66,99	804,90	165,31	80,88
1961	529,66	-12,87	1078,70	577,05	-15,14
1962	485,48	-64,68	855,00	505,55	-71,35
1963	503,40	-8,90	736,10	177,06	64,54
1964	506,83	20,33	721,20	179,19	14,85
1965	494,03	157,92	1222,60	591,27	-20,62
1966	531,05	78,14	1239,20	609,38	20,63
1967	509,73	45,50	1070,50	515,27	0,0
1968	501,99	131,49	1287,60	654,12	0,0
1969	568,75	-85,85	871,70	454,79	-65,99
1970	512,55	14,32	1156,40	563,53	66,00
1971	530,97	106,25	707,30	166,44	-96,36
1972	512,04	61,16	741,70	111,71	56,79
1973	530,95	6,68	749,20	211,89	-0,32
1974	556,33	25,46	1017,40	396,64	38,97
1975	534,01	9,08	938,10	438,61	-43,60
1976	374,13	79,10	598,70	148,37	-2,90
1977	445,95	187,94	913,60	265,32	14,39
1978	523,68	106,10	1080,80	418,91	32,11
1979	490,33	36,58	853,50	403,78	-77,19

Jahressummen der hydrologischen Jahre
(Verdunstung nach THORNTHWAITTE/PFAU)

Jahr	V	(R-B)	N	A	d nF
1959	476,94	59,13	634,70	313,26	-96,37
1960	538,21	5,00	804,90	165,31	96,38
1961	624,49	-78,35	1078,70	577,05	-44,49
1962	464,86	-54,91	855,00	505,55	-60,50
1963	514,88	7,31	736,10	177,06	36,85
1964	525,64	-7,59	721,20	179,19	23,96
1965	585,25	27,74	1222,60	591,27	18,34
1966	634,76	-9,65	1239,20	609,38	4,71
1967	558,22	13,73	1070,50	515,27	-16,72
1968	592,55	3,07	1287,60	654,12	37,86
1969	543,17	-49,51	871,70	454,79	-76,75
1970	518,78	33,36	1156,40	563,53	40,73
1971	513,70	92,45	707,30	166,44	-65,29
1972	567,97	19,71	741,70	111,71	47,31
1973	496,53	30,71	749,20	211,89	10,07
1974	569,38	2,43	1017,40	396,64	48,95
1975	574,10	16,74	938,10	438,61	-91,35
1976	411,09	49,12	598,70	148,37	-9,88
1977	529,05	112,11	913,60	265,32	7,12
1978	574,13	47,79	1080,80	418,91	39,97
1979	498,71	-7,22	853,50	403,78	-46,77

Jahressummen der hydrologischen Jahre
(Verdunstung nach PENMAN/PFAU)

Jahr	V	(R-B)	N	A	ü n f
1967	529,78	25,45	1070,50	515,27	0,0
1968	518,87	114,60	1287,60	654,12	0,0
1969	548,40	-96,65	871,70	454,79	-34,84
1970	543,98	14,04	1156,40	563,53	34,85
1971	551,31	83,64	707,30	166,44	-94,09
1972	540,29	4,89	741,70	111,71	84,81
1973	511,96	60,87	749,20	211,89	-35,52
1974	567,25	8,70	1017,40	396,64	44,81
1975	559,88	2,20	938,10	438,61	-67,59
1976	396,51	52,48	598,70	148,37	1,34
1977	442,49	121,08	913,60	265,32	34,71
1978	482,25	153,08	1080,80	418,91	76,56
1979	464,75	52,55	853,50	403,78	67,58

Jahressummen der hydrologischen Jahre
(Verdunstung nach TURC/PFAU)

Jahr	V	(R-B)	N	A	ü n f
1967	540,40	28,96	1070,50	515,27	-14,13
1968	540,84	78,51	1287,60	654,12	14,13
1969	525,67	50,19	871,70	454,79	-58,57
1970	499,88	51,87	1156,40	563,53	41,12
1971	508,42	116,27	707,30	166,44	-83,83
1972	516,81	52,24	741,70	111,71	60,94
1973	477,42	49,93	749,20	211,89	9,96
1974	517,07	73,30	1017,40	396,64	30,39
1975	541,74	33,61	938,10	438,61	-25,86
1976	390,52	69,00	598,70	148,37	-9,19
1977	474,23	152,08	913,60	265,32	21,97
1978	506,27	92,53	1080,80	418,91	63,09
1979	475,99	70,26	853,50	403,78	-96,53

- 29: BAUER, G., u. a.: Beitrag zur Geologie der Mittleren Siegener Schichten. 1960. 363 S., 85 Abb., 10 Tab., 22 Taf., DM 36,-.
- 30: BURRE, O.: Untersuchungen über die Berechnung der dem Grundwasser von den Niederschlägen zu-gehenden Wassermengen aus den Bewegungen des Grundwasserspiegels. 1960. 68 S., 1 Abb., 8 Tab., 5 Taf., DM 8,60.
- 31: RÜDER, D. H.: Ulmen-Gruppe in sandiger Fazies (Unter-Devon, Rheinisches Schiefergebirge). 1960. 66 S., 4 Abb., 1 Tab., 7 Taf., DM 8,-.
- 32: ZAKOSEK, H.: Durchlässigkeitsuntersuchungen an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleye, 1960. 63 S., 12 Abb., 1 Tab., 2 Taf., DM 11,-.
- 33: KREBS, W.: Stratigraphie, Vulkanismus und Fazies des Oberdevons zwischen Donsbach und Hirzenhain (Rheinisches Schiefergebirge, Dill-Mulde). 1960. 119 S., 21 Abb., 7 Tab., 11 Taf., DM 14,80.
- 34: STOPPEL, D.: Geologie des südlichen Kellerwaldgebirges. 1961. 114 S., 21 Abb., 2 Tab., 4 Taf., DM 14,-.
- 35: MATTHES, G.: Die Herkunft der Sulfat-Ionen im Grundwasser. 1961. 85 S., 3 Abb., 31 Tab., DM 7,60.
- 36: STENGER, B.: Stratigraphische und gefügetektonische Untersuchungen in der metamorphen Taunus-Südrand-Zone (Rheinisches Schiefergebirge). 1961. 68 S., 20 Abb., 4 Tab., 3 Taf., DM 9,-.
- 37: ZAKOSEK, H.: Zur Genese und Gliederung der Steppenböden im nördlichen Oberrheintal. 1962. 46 S., 1 Abb., 19 Tab., DM 6,80.
- 38: ZIEGLER, W.: Taxionomie und Phylogenie Oberdevonischer Conodonten und ihre stratigraphische Bedeutung. 1962. 166 S., 18 Abb., 11 Tab., 14 Taf., DM 22,60.
- 39: MEISCHNER, KL.-D.: Rhenaer Kalk und Posidonienkalk im Kulm des nordöstlichen Rheinischen Schiefergebirges und der Kohlenkalk von Schreufa (Eder). 1962. 47 S., 15 Abb., 2 Tab., 7 Taf., DM 11,60.
- 40: HOLTZ, S.: Sporen-stratigraphische Untersuchungen im Oligozän von Hessen. 1962. 46 S., 1 Abb., 6 Taf., DM 9,-.
- 41: WALLISER, O. H.: Conodonten des Silurs. 1964. 106 S., 10 Abb., 2 Tab., 32 Taf., DM 12,-.
- 42: KUTSCHER, F.: Register für die Notizblatt-Bände der 5. Folge, Hefte 1—20, erschienen 1916—1939. 1963. 58 S., 1 Taf., DM 7,60.
- 43: EINSELE, G.: Über Art und Richtung der Sedimentation im klastischen rheinischen Oberdevon (Fa-menne). 1963. 60 S., 8 Abb., 7 Tab., 5 Taf., DM 7,60.
- 44: JACOBSHAGEN, E., HUCKRIEDE, R. & JACOBSHAGEN, V.: Eine Faunenfolge aus dem jungpleistozänen Löß bei Bad Wildungen. 1963. 105 S., 9 Abb., 2 Tab., 14 Taf., DM 12,-.
- 45: KÜMMERLE, E.: Die Foraminiferenfauna des Kasseler Meeressandes (Oberoligozän) im Ahnetal bei Kassel (Bl. Nr. 4622 Kassel-West). 1963. 72 S., 1 Abb., 2 Tab., 11 Taf., DM 9,40.
- 46: SCHENK, E.: Die geologischen Erscheinungen der Subfussion des Basaltes. 1964. 31 S., 6 Abb., 2 Tab., 16 Taf., DM 7,60.
- 47: HÖLTING, B. & STENGER, W.: Beiträge zur Tektonik des nordwestlichen Vorlandes des basaltischen Vogelsberges, insbesondere des Amöneburger Beckens. 1964. 37 S., 2 Taf., DM 5,60.
- 48: DIEDERICH, G., LAEMMLEN, M. & VILLWOCK, R.: Das obere Biebental im Nordspessart. Neugliederung des Unteren Buntsandstein, Exkursionsführer und geologische Karte. 1964. 34 S., 2 Abb., 5 Tab., 4 Taf., 1 Kte., DM 7,20.
- 49: KUTSCHER, F.: Register für die Notizblatt-Bände der 4. Folge, Hefte 1—35, erschienen 1880—1914. 1965. 56 S., 1 Taf., DM 6,60.
- 50: ZAKOSEK, H., u. a.: Die Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete. 1967. 82 S., 1 Abb., 17 Tab., 1 Atlas, DM 10,-.
- 51: MATTHES, G.: Zur Geologie des Ölschiefervorkommens von Messel bei Darmstadt. 1966. 87 S., 11 Abb., 10 Tab., DM 10,-.
- 52: BERG, D. E.: Die Krokodile, insbesondere *Asiatosuchus* und aff. *Sebecus*?, aus dem Eozän von Messel bei Darmstadt/Hessen. 1966. 105 S., 11 Abb., 6 Taf., DM 11,20.
- 53: HÖLTING, B.: Die Mineralquellen in Bad Wildungen und Kleinern (Landkreis Waldeck, Hessen). 1966. 59 S., 7 Abb., 9 Tab., DM 7,-.
- 54: SOLLE, G.: Hederelloidea (Cyclostomata) und einige etenostome Bryozoen aus dem Rheinischen Devon. 1968. 40 S., 1 Tab., 5 Taf., DM 5,-.
- 55: SCHNEIDER, J.: Das Ober-Devon des nördlichen Kellerwaldes (Rheinisches Schiefergebirge). 1969. 124 S., 24 Abb., 1 Taf., DM 15,-.
- 56: HORST-FALKE-Festschrift. 1970. 228 S., 71 Abb., 10 Tab., 23 Taf., 1 Bild, DM 14,-.
- 57: MEISEL, S.: Petrologische Studien im Grenzbereich Diagenese-Metamorphose. 1970. 93 S., 70 Abb., 2 Tab., DM 11,-.

- 58: MATTHES, G.: Beziehungen zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. 1970. 105 S., 20 Abb., 18 Tab., 4 Taf., DM 12,-.
- 59: SOLLE, G.: *Brachyspirifer* und *Paraspirifer* im Rheinischen Devon. 1971. 163 S., 1 Diagr., 20 Taf., DM 30,-.
- 60: HEINZ-TOBIEN-Festschrift. 1971. 308 S., 58 Abb., 12 Tab., 32 Taf., 1 Bild, DM 24,-.
- 61: WIRTZ, R.: Beitrag zur Kenntnis der Paläosole im Vogelsberg. 1972. 159 S., 2 Abb., 21 Tab., DM 19,-.
- 62: BUGGISCH, W.: Zur Geologie und Geochemie der Kellwasserkalke und ihrer begleitenden Sedimente (Unteres Oberdevon). 1972. 68 S., 19 Abb., 6 Tab., 13 Taf., DM 16,-.
- 63: THEWS, J.-D.: Zur Typologie der Grundwasserbeschaffenheit im Taunus und Taunusvorland. 1972. 42 S., 27 Abb., 7 Tab., 2 Taf., DM 12,-.
- 64: STEPHAN-HARTL, R.: Die altmiozäne Säugetierfauna des Nordbassin und der Niederräder Schleusen-kammer (Frankfurt/M., Hessen) und ihre stratigraphische Stellung. 1972. 97 S., 16 Abb., 11 Tab., 24 Taf., DM 21,-.
- 65: BOY, J. A.: Die Branchiosaurier (Amphibia) des saarpfälzischen Rotliegenden (Perm, SW-Deutschland). 1972. 137 S., 70 Abb., 2 Tab., 2 Taf., DM 17,-.
- 66: BARTH, H.: Petrologische Untersuchungen im Felsberg-Zug (Bergsträßer Odenwald). 1972. 85 S., 16 Abb., 11 Tab., 8 Taf., DM 12,-.
- 67: KUSTER-WENDENBURG, E.: Die Gastropoden aus dem Meeressand (Rupelium) des Mainzer Tertiärbeckens. 1973. 170 S., 8 Taf., DM 21,-.
- 68: NEUFFER, FR. O.: Die Bivalven des Unteren Meeressandes (Rupelium) im Mainzer Becken. 1973. 113 S., 13 Taf., DM 25,-.
- 69: WALTER, H.: Hydrogeologie und Wasserhaushalt im oberen Horlofftal (westlicher Vogelsberg). 1974. 104 S., 13 Abb., 17 Tab., 2 Taf., DM 25,-.
- 70: AZIMI, M. A., HILALI, E.-A., HUSCHMAND, A., KRÜGER, H., PICKEL, H.-J., SCHARPFF, H.-J., SCHEWE, L., WAGNER, H.-R.: Beiträge zur Hydrogeologie von Hessen. 1974. 198 S., 60 Abb., 37 Tab., 2 Taf., DM 35,-.
- 71: BAHLO, E.: Die Nagetierfauna von Heimersheim bei Alzey (Rheinessen, Westdeutschland) aus dem Grenzbereich Mittel-/Oberligozän und ihre stratigraphische Stellung. 1975. 182 S., 43 Abb., 11 Tab., DM 25,-.
- 72: MATHEIS, J.: Kartographische Bearbeitung geologischer und bodenkundlicher Karten. Von der Manuskriptkarte zur Druckvorlage. 1975. 68 S., 22 Abb., 3 Taf., 5 Beil., DM 24,-.
- 73: GOLWER, A., KNOLL, K.-H., MATTHES, G., SCHNEIDER, W., WALLHÄUSSER, K. H.: Belastung und Verunreinigung des Grundwassers durch feste Abfallstoffe. 1976. 131 S., 23 Abb., 34 Tab., 2 Taf., DM 20,-.

Geologische Abhandlungen Hessen

- 74: SOLLE, G.: Oberes Unter- und unteres Mitteldevon einer typischen Geosynklinal-Folge im südlichen Rheinischen Schiefergebirge. Die Olkenbacher Mulde. 1976. 264 S., 11 Abb., 2 Taf., 1 Kt., DM 45,-.
- 75: BOENIGK, W., et al.: Jungtertiär und Quartär im Horloff-Graben/Vogelsberg. 1977. 80 S., 17 Abb., 6 Tab., 8 Taf., DM 16,-.
- 76: MOAYEDPOUR, E.: Geologie und Paläontologie des tertiären „Braunkohlenlagers“ von Theobaldshof/Rhön (Miozän, Hessen). 1977. 135 S., 7 Abb., 5 Tab., 21 Taf., DM 32,-.
- 77: SOBOTH, E.: Lang- und kurzperiodische Änderungen der Grundwasserbeschaffenheit und der Quellschüttung während 20jähriger Beobachtungen in der Frankenger Bucht (Hessen). 1978. 39 S., 17 Abb., 5 Tab., 6 Taf., DM 9,-.
- 78: JANSSEN, R.: Revision der Bivalvia des Oberligozäns (Chattium, Kasseler Meeressand). 1979. 181 S., 1 Abb., 4 Taf., DM 33,-.
- 79: HOMRIGHAUSEN, R.: Petrographische Untersuchungen an sandigen Gesteinen der Hörre-Zone (Rheinisches Schiefergebirge, Oberdevon—Unterkarbon). 1979. 84 S., 16 Abb., 5 Tab., 13 Taf., DM 27,-.
- 80: WITTEN, W.: Stratigraphie, Sedimentologie und Paläogeographie der Kieselkalke im Unterkarbon II γ / δ bis III α des nordöstlichen Rheinischen Schiefergebirges. 1979. 132 S., 26 Abb., 12 Tab., 4 Taf., DM 23,-.
- 81: EHRENBERG, K.-H., et al.: Forschungsbohrungen im Hohen Vogelsberg (Hessen), Bohrung 1 (Flösser-Schneise), Bohrung 2/2a (Hasselborn). 1981. 166 S., 89 Abb., 17 Tab., 9 Taf., DM 40,-.
- 82: BOTTKE, H., & POLYSOS, N.: Die Altenbürener Störungszone und der nördliche Teil der Briloner Scholle im tektonischen Photolineationsmuster des nördlichen Sauerlandes (Rheinisches Schiefergebirge). 1982. 50 S., 21 Abb., 2 Taf., DM 10,-.
- 83: WEBER, J., & HOFMANN, U.: Kernbohrungen in der eozänen Fossilagerstätte Grube Messel bei Darmstadt. 1982. 58 S., 3 Taf., DM 12,-.
- 84: KOWALCZYK, G.: Das Rotliegende zwischen Taunus und Spessart. 1983. 99 S., 48 Abb., 2 Tab., 8 Taf., DM 24,-.