

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS  
SERVICE GÉOLOGIQUE

---

PUBLICATIONS DU SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG  
VERÖFFENTLICHUNGEN DES LUXEMBURGER GEOLOGISCHEN DIENSTES

VOLUME XXI

HYDROGEOLOGISCHE  
UND HYDROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN  
IM LUXEMBURGER SANDSTEIN

von  
MICHAEL v. HOYER

LUXEMBOURG 1971  
SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS  
SERVICE GÉOLOGIQUE

---

PUBLICATIONS DU SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG  
VERÖFFENTLICHUNGEN DES LUXEMBURGER GEOLOGISCHEN DIENSTES

VOLUME XXI

HYDROGEOLOGISCHE  
UND HYDROCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN  
IM LUXEMBURGER SANDSTEIN

von  
MICHAEL v. HOYER

LUXEMBOURG 1971  
SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG

Anschrift des Verfassers:

M. v. HOYER, Geological Survey, Private Bag 112  
Pretoria, South Africa

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Abstract . . . . .	7
Résumé . . . . .	8
Zusammenfassung . . . . .	9
Vorwort . . . . .	11
Benutzte Abkürzungen . . . . .	12
A. GEOLOGISCHER TEIL	
I. Der Untere Lias Luxemburgs . . . . .	13
II. Lagerung und Tektonik des Luxemburger Sandsteins . . . . .	16
B. HYDROGEOLOGISCHER TEIL	
I. Der Grundwasserträger . . . . .	17
1. Grundwasserbewegung und Tektonik . . . . .	17
2. Grundwasserfließvorgänge im klüftigen Luxemburger Sandstein . . . . .	21
3. Folgerungen für die Festlegung von Schutzzonen . . . . .	22
II. Oberirdischer und unterirdischer Abfluß . . . . .	24
1. Meßverfahren für den Gesamtabfluß . . . . .	24
2. Abflußverhalten von Einzugsgebieten mit verschiedenen Deckschichten und unterschiedlichem geologischem Untergrund . . . . .	26
3. Bestimmung des oberirdischen und unterirdischen Abflusses . . . . .	30
4. Unterirdischer Abfluß . . . . .	30
III. Die Grundwasserneubildung . . . . .	34
1. Allgemeines . . . . .	34
2. Faktoren der Grundwasserneubildung . . . . .	34
2.1. Das Niederschlagsdargebot . . . . .	34
2.2. Verdunstung . . . . .	35
3. Werte zur Grundwasserneubildung . . . . .	40
3.1. Berechnung der Grundwasserneubildung . . . . .	40
3.2. Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz . . . . .	41
3.3. Vergleich langjähriger Werte verschiedener Einzugsgebiete . . . . .	42
3.4. Vergleich der Grundwasserneubildung und Grundwasserspeicherung verschiedener Einzugsgebiete in den hydrologischen Jahren 1968 und 1969 . . . . .	43
4. Praktische Folgerungen für die bestehende und zukünftige Grundwasserentnahme . . . . .	46
C. HYDROCHEMISCHER TEIL	
I. Allgemeines . . . . .	47
II. Normaltyp der Wässer des Luxemburger Sandsteins . . . . .	47
III. Typmäßig veränderte Wässer im Luxemburger Sandstein . . . . .	55
IV. Qualität der Wässer des Luxemburger Sandsteins in hygienischer und technischer Hinsicht . . . . .	56
V. Quelltemperaturen . . . . .	56
VI. Analysenverzeichnis . . . . .	57
D. LITERATUR	
	59



## ABSTRACT

The Liassique « Sandstone of Luxembourg » (li2) is the most important aquifer of Luxembourg. It attains a thickness between 0 and 100 meters. Besides some local exceptions this aquifer is not separated in stages. The marls at its basis (Psilonotenschichten, li1) form an impermeable strata.

If the Sandstone of Luxembourg is not covered by younger marlous sediments this calcereous sandstone is heavily weathered. By this process first of all the calcereous cement is mobilized. Therefore storage of groundwater can occur both in pore space and in joints. By that the aquifer can absorb large amounts of ground water during wet years, which are given to springs only in small quantities and with delay of one year.

Joints drain the aquifer down to its basis. If the impermeable strata lies above river level, underground flow follows the surface of the impermeable strata. Experiments with tracers state velocities of ground water streams within the joints of sandstone.

By long-term values of discharge of a river system recharge of ground water is evaluated. For the determination of important items in the hydrological balance sheet two methods were used: the separation of the total runoff into surface flow and groundwater flow including interflow according to NATERMANN and the calculation of the potential evapotranspiration after HAUDE and EINSELE.

The recharge of ground water of several catchment areas during the hydrological years 1968 and 1969 are evaluated and compared. The recharge of ground water depends on portion of marlous sediments in a catchment.

With the aid of the new data protection areas can be delimited and areas for new well fields can be determined.

By hydrochemical investigations the ground water of the Sandstone of Luxembourg can be classified: if the sandstone is not completely covered by marlous sediments the ground water is rich in oxygen and predominant constituents are calcium- and magnesiumcarbonates; if the sandstone is completely covered by the younger marlous sediments the ground water is reduced. There are close connections between the mineralisation of ground water and the petrographical composition of the aquifer. Also pollution of ground water caused by encroachment by man can be seen.

## RÉSUMÉ

Le Grès de Luxembourg (li2), épais à 100 m, est la principale nappe aquifère du Luxembourg. Quelques exceptions locales mises à part, il n'existe pas des étages différents dans cette nappe aquifère. Les couches marneuses à *Psiloceras* (li1) du mur forment une couche imperméable idéale. Là où le Grès de Luxembourg n'est pas couvert par des sédiments plus jeunes à prédominance marneuse, ce grès calcaireux est sujet à une désagrégation en profondeur qui enlève surtout le ciment calcaireux. Voilà pourquoi le stockage d'eau souterraine peut se faire dans les diaclases aussi bien qu'au sein même de la roche. Pendant des années humides, cette nappe poreuse et diaclasée peut emmagasiner de considérables quantités d'eau qui, après un interval d'une année, sont rendues fortement amoindries aux cours d'eau.

Les diaclases font le drainage de toute la nappe aquifère jusqu'à sa base. Si la couche imperméable est située au-dessus du niveau des cours d'eau, alors les directions d'écoulement des eaux souterraines sont déterminées exclusivement par le relief de la couche imperméable. Des essais de coloration ont fourni des données sur les vitesses d'écoulement dans les diaclases du grès.

Sur la base des jauges d'écoulement relevées pendant de longues années on établit la recharge d'eau souterraine d'un système fluvial moyen. Pour évaluer des données importantes du bilan hydrologique on se base avant tout sur deux procédés, à savoir: l'évaluation de l'écoulement superficiel et de l'écoulement souterrain d'après NATERMANN, ainsi que le calcul de l'évapo-transpiration potentielle corrigée d'après HAUDE et EINSELE.

A l'aide des résultats fournis par quelques jauges d'écoulement nouvellement installées, on compare la recharge d'eau souterraine de différentes aires d'alimentation au cours des années hydrologiques 1968 et 1969. Il s'y manifeste une dépendance marquée du recouvrement du grès par des couches marneuses.

Les résultats des recherches permettent de fixer des directives concernant l'étendue des zones de protection pour les captages d'eau souterraine ainsi que la désignation de certaines régions en vue d'une optimisation des ressources à l'aide de forages captages.

Des recherches hydrochimiques permettent une subdivision des eaux souterraines du Grès de Luxembourg en différents types: Si le grès n'est pas complètement recouvert par des sédiments plus jeunes, on parle d'un type normal, riche en oxygène; les eaux sont à ranger dans une catégorie où les carbonates de calcium et de magnésium prédominent. Un recouvrement complet du grès engendre une variante réduite du type normal. Il existe des relations étroites entre le caractère pétrographique de la nappe aquifère et le chimisme des eaux souterraines. On reconnaît des modifications des caractéristiques des eaux dues aux influences anthropogènes.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der bis zu 100 m mächtige Luxemburger Sandstein (li2) ist der wichtigste Grundwasserträger Luxemburgs. Von lokalen Ausnahmen abgesehen besitzt dieser Grundwasserträger keine Stockwerksgliederung. Die liegenden mergeligen Pylonotenschichten (li1) bilden einen vollkommenen Stauhizont. Sofern der Luxemburger Sandstein nicht durch jüngere, vorwiegend mergelige Sedimente überdeckt ist, unterliegt dieser Kalksandstein einer tiefgreifenden Verwitterung, wobei vor allem das kalkige Bindemittel abgeführt wird. Die Grundwasserspeicherung kann dadurch sowohl im Kluftraum als auch im Porenraum vor sich gehen. Dieser poröse und klüftige Wasserträger kann in Naßjahren beträchtliche Wassermengen aufnehmen, die nur stark gedämpft und mit einjähriger Verzögerung wieder an die Vorfluter abgegeben werden.

Die Klüfte drainieren den gesamten Speicher bis zu seiner Basis. Liegt der Stauhizont über Vorfluterniveau, so werden die Grundwasserfließrichtungen allein vom Relief des Stauhizontes bedingt. Markierungsversuche brachten Angaben über die Fließgeschwindigkeiten im Kluftraum des Sandsteins.

Anhand langjähriger Pegelmessungen wird die Grundwasserneubildung eines mittleren Flußgebietes bestimmt. Zur Ermittlung wichtiger Posten der Wasserbilanz stehen zwei Verfahren im Vordergrund: Die Bestimmung des oberirdischen und des unterirdischen Abflusses nach NATERMANN und die Berechnung einer korrigierten potentiellen Verdunstung nach HAUDE und EINSELE.

Durch Auswertung einiger neu eingerichteter Bachmeßstellen wird die Grundwasserneubildung verschiedener Einzugsgebiete während der hydrologischen Jahre 1968 und 1969 miteinander verglichen. Dabei zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Grad der Überdeckung des Sandsteines durch mergelige Schichten.

Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen die Festlegung von Richtlinien zur Erstreckung von Schutzzonen für Grundwasserfassungen, sowie die Bestimmung von Gebieten für eine erweiterte Grundwasserentnahme durch Tiefbohrungen.

Hydrochemische Untersuchungen ermöglichen eine Typisierung der Grundwässer des Luxemburger Sandsteines: Ist der Sandstein nicht vollständig durch jüngere Sedimente überdeckt, liegt ein sauerstoffreicher Normaltyp vor; die Wässer sind als «normal erdalkalische, überwiegend hydrogenkarbonatische Süßwässer» einzustufen. Unter geschlossener Überdeckung des Sandsteins liegt ein reduzierter Typ des Normaltypes vor. Enge Beziehungen bestehen zwischen der petrographischen Beschaffenheit des Grundwasserträgers und dem Grundwasserchemismus. Veränderungen der Beschaffenheit der Wässer durch anthropogene Beeinflussung sind erkennbar.



## VORWORT

Der Luxemburger Sandstein ist der bedeutendste Grundwasserträger des Großherzogtums Luxemburg. 90% des Trink- und Brauchwasserbedarfes des Landes werden aus diesem Wasserträger gedeckt. Wegen des Jahr für Jahr steigenden Wasserverbrauches ist, für die Zukunft eine erweiterte Wassergewinnung aus dem Luxemburger Sandstein geplant. Da bisher keine speziellen hydrogeologischen Untersuchungen vorlagen, entstand das Bedürfnis durch systematische Untersuchungen Aufschluß über das ober- und unterirdische Abflußverhalten sowie die Grundwasserneubildung und -speicherung zu erhalten.

Als engeres Untersuchungsgebiet wurde das Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz im Osten des Landes ausgewählt. Hier lagen langjährige Abflußbeobachtungen vor, und der geologische Aufbau des Gebietes war durch Spezialkartierungen im Maßstab 1 : 10 000, die während der letzten Jahre durchgeführt wurden, sehr genau bekannt. Der Aufbau dieses Einzugsgebietes und die hydrogeologische Situation entsprechen zudem den Verhältnissen, wie sie auch in anderen Teilen des Landes vorliegen, so daß grundlegende Untersuchungsergebnisse auch auf andere Landesteile mit Luxemburger Sandstein übertragen werden können.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. R. Schönenberg, danke ich für die Vermittlung dieser Arbeit und sein stetes Interesse an ihrem Fortgang.

Ganz besonders möchte ich Herrn J. Bintz, dem Leiter des Service Géologique du Luxembourg, danken für seine überaus großzügige materielle und finanzielle Unterstützung und für sein großes Interesse an allen Fragen und Problemen, die im Verlauf der Arbeit auftraten.

Herrn J. Barthel, dem Leiter des Laboratoire des Eaux, Luxembourg, und allen Mitarbeitern dieses Institutes danke ich für fachlichen Rat und die Ausführung der zahlreichen Wasseranalysen.

Herr Engels, der Leiter des Service Météorologique et Hydrographique du Luxembourg, stellte meteorologische und hydrologische Daten zur Verfügung. Ihm sei dafür an dieser Stelle gedankt.

Meinem Kollegen Herrn Chr. Neumann danke ich für seine Mithilfe bei Arbeiten im Gelände und für manche den Fortgang der Arbeit fördernde Diskussion.

Für fachlichen Rat und Unterstützung sei Herrn A. Hary, Herrn J. Wagner vom Service Agricole und Herrn Reiter, Direktor des Syndicat des Eaux Koerich, gedankt.

## BENUTZTE ABKÜRZUNGEN

Zum Teil nach DIN 4049; nähere Erläuterungen siehe dort. Aus drucktechnischen Gründen werden die als Suffixe gedachten Kleinbuchstaben auf gleicher Höhe wie die Großbuchstaben geschrieben.

- A = Gesamter Abfluß in l/s bzw. als Abflußspende in l/s.km<sup>2</sup> oder als Abflußhöhe in mm.
- Ao = Oberirdischer Abfluß nach NATERMANN (= unmittelbar durch Niederschläge hervorgerufener Teil des Gesamtabflusses eines Einzugsgebietes).
- Au = Nach dem Verfahren von NATERMANN gemessener unterirdischer Abfluß (im ursprünglichen Zustand der Teil des Gesamtabflusses, der dem Vorfluter als Grund- oder Quellwasser zufließt).
- Eo, Eu = Oberirdisches, unterirdisches Einzugsgebiet in km<sup>2</sup>.
- Ga = In Fremdräume abgeleitetes Grundwasser.
- I = Infiltration, Versickerung von Niederschlagswasser in den Boden für eine bestimmte Zeitspanne in mm bzw. als Infiltrations- oder Sickerspende in l/s.km<sup>2</sup>.
- Io = Infiltration von Niederschlagswasser in den durchwurzelten Boden.
- Iu = Infiltration von Niederschlagswasser in den tieferen Untergrund für eine bestimmte Zeitspanne (Durchsickerung, Grundwasserneubildung).
- N = Niederschlag in mm bzw. als Niederschlagsspende in l/s.km<sup>2</sup>.
- S = Vorratsänderung, positive oder negative Speicherung (Rücklage minus Aufbrauch) in mm.
- So = Vorratsänderung des Bodenwassergehaltes in der durchwurzelten Zone in mm.
- Su = Änderung des Wasservorrates im tieferen Untergrund in mm.
- V = Aktuelle (tatsächliche) Gesamtverdunstung in mm bzw. als Verdunstungsspende in l/s.km<sup>2</sup>.
- Vo = Verdunstungsanteil aus Niederschlag und Bodenwasser (Wurzelbereich).
- Vu = Verdunstungsanteil durch aufsteigendes Grundwasser.
- Vp = Potentielle Verdunstung nach HAUDE.
- Vpk = Korrigierte potentielle Verdunstung nach HAUDE.
- Hydrologisches Jahr = Zeitraum vom 1. November bis 31. Oktober (= Abflußjahr).

## A. GEOLOGISCHER TEIL

### I. Der Untere Lias Luxemburgs

Eine ausführliche Darstellung der Geologie des Unteren Lias in Luxemburg hat LUCIUS (1948) gegeben. Detaillierte Bearbeitungen folgten von BINTZ & MULLER (1966) und MULLER (1967). Weitere Spezialuntersuchungen werden zur Zeit von beiden letztgenannten Autoren im Luxemburger Sandstein durchgeführt.

Im folgenden soll deshalb nur insoweit über Schichtenfolge und Tektonik berichtet werden, wie es für das Verständnis der hydrogeologischen Vorgänge notwendig erscheint.

#### *Unteres Hettangien (li1)*

Das Untere Hettangien, die Psilonotenschichten, besteht aus einer Wechselfolge von schwarz-grauen Mergeln und grauen Kalken. Die Mächtigkeiten schwanken zwischen 5 und 15 m. In dieser Folge überwiegen die Mergel; die Kalkbänke werden selten mächtiger als 0,50 m.

Für den überlagernden Grundwasserträger des Luxemburger Sandsteins bilden die Psilonotenschichten einen vollkommenen Stauhohizont. Alle bedeutenden Grundwasseraustritte liegen an dieser Grenzfläche. (Näheres s. S. 17)

#### *Oberes Hettangien, Luxemburger Sandstein (li2)*

Die Bezeichnung « Luxemburger Sandstein » ist ein Faziesbegriff. Sie umfaßt den Sandsteinkörper, der im Unteren Lias den mergelig-kalkigen Sedimenten der schwäbisch-lothringischen Normalfazies eingelagert ist. Wie die schematische Darstellung in Abb. 1 zeigt, rückt die sandige Fazies nach W hin in stratigraphisch höhere Horizonte hinauf, so daß westlich Arlon das Obere Hettangien und das Sinémurien in kalkig-mergeliger Normalfazies vorliegen. Die sandige Fazies greift hier ins Lotharingien über.

Dem auf den geologischen Karten Luxemburgs und in dieser Arbeit verwendeten Symbol li2 (= Luxemburger Sandstein) kommt also keine biostratigraphische Bestimmung zu. Es umfaßt lediglich die petrographische Einheit des Sandsteinkörpers im Unteren Lias Luxemburgs. (eine ausführliche Darstellung geben BINTZ & MULLER, 1966).

Innerhalb Luxemburgs erreicht der Sandstein Mächtigkeiten bis 100 m. Im Bereich des Unterlaufes der Schwarzen Ernzt liegen die Mächtigkeiten zwischen 55 und 60 m.

Der Luxemburger Sandstein ist in vollständig unverwittertem Zustand ein grauer Kalksandstein. Lokal kann das kalkige Bindemittel durch kieseliges ersetzt sein, wie in der Gegend Beaufort/Dillingen. Die graublau Farbe rührt von fein verteiltem Pyrit her. Wegen der leichten

### Der Sandsteinkörper im Unteren Lias von Luxemburg

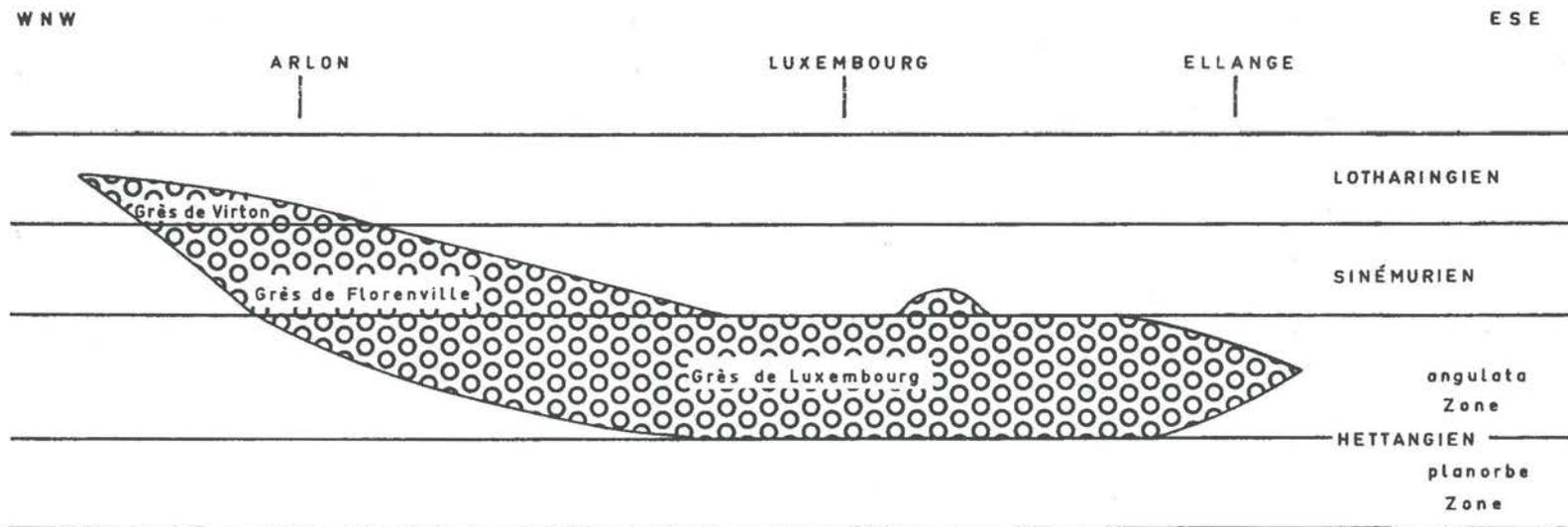


Abb. 1 (nach MULLER, 1967)

Oxydierbarkeit des Pyrits ist der Sandstein auch in tiefen Aufschlüssen und Bohrkernen entfärbt und ist dann weiß bis gelb. (Näheres s. S. 52). Die Schichtung ist gut ausgeprägt, Schrägschichtung eine häufige Erscheinung (s. BINTZ & MULLER, 1966). Lokal sind dem Sandstein Mergel eingeschaltet, die jedoch nicht auf größere Entfernungen durchhalten. Sie bilden unvollkommene Stauhohizonte und sind deshalb für die Regeneration des Grundwassers im tieferen Untergrund von geringer Bedeutung. (Näheres s. S. 17)

Sofern der Sandstein nicht durch jüngere Sedimente überdeckt ist, unterliegt er einer tiefgreifenden Verwitterung. Dabei wird durch die Sickerwässer vor allem das kalkige Bindemittel abgeführt. Aus Bohrungen ist bekannt, daß diese Auslaugung bis zu 40 m Tiefe vorgreifen kann. In Zonen stärkerer Klüftung können diese Vorgänge noch tiefer wirken. Sehr schön ist dies im Hauptabwasserstollen unter der Stadt Luxemburg zu beobachten.

Die Verwitterungsdecke des Luxemburger Sandsteins bilden mineralarme Lockersande, die das Anstehende mit Mächtigkeiten von 1 bis 5 m verhüllen. Es sind nahezu reine Feinsande; 65-70% der Sandfraktion haben Korngrößen von 0,1-0,25 mm.<sup>1</sup> Die auf den Lockersanden entwickelten Braun- und Parabraunerden haben einen recht konstanten Lehmanteil von etwa 20%.<sup>2</sup>) Laborversuche zur Bestimmung der Versickerungsgeschwindigkeiten ergaben an ungestörten, im Gelände entnommenen Proben Mittelwerte zwischen 12,5 und 25,0 cm/h oder 2,8-4,1 mm/Min.<sup>3</sup>) Lokal liegen über dem Sandstein auch äolische Lehme mit Mächtigkeiten von 0,40-1,50 m. Ihre Datierung ist bisher noch umstritten.

#### *Sinemurien, « Kalke und Mergel von Strassen » (li3)*

Eine ausführliche Darstellung über die « Mergel und Kalke von Strassen », ihre Ausbildung, Sedimentologie und biostratigraphische Stellung gibt MULLER (1967).

Mit Mächtigkeiten bis zu 20 m überdecken sie mit einer Folge von dunkelgrauen Mergeln und Kalken den Luxemburger Sandstein in weiten Teilen des Landes. Auf ihnen sind tonige und schwere tonige Braunerden entwickelt. Die Entkalkung der Böden wechselt stark schon auf geringe Entfernungen. Mit abnehmendem Kalkgehalt nimmt die Vergleyung zu und Stau-nässe tritt auf.<sup>4</sup>) Diese schwer durchlässigen Böden verhindern ein Eindringen von Sickerwässern in den liegenden Grundwasserträger.

#### *Lotharingien (li4)*

Unter dem Symbol li4 werden auf der geologischen Spezialkarte 1 : 25 000 von Luxemburg die « Fossilarmen Tone », die « Dudressier-Schichten » und die « Raricostaten-Schichten » zusammengefaßt. Petrographisch umfaßt die Schichtenfolge dunkelgraue, sandige Tonmergel, graue Mergel und Kalke.

Für Sickerwässer sind sie gleichermaßen schlecht durchlässig wie die « Mergel und Kalke von Strassen ».

---

<sup>1</sup>), <sup>2</sup>), <sup>3</sup>), <sup>4</sup>) nach freundlicher Mitteilung von Herrn Wagner, École Agricole de l'Etat, Ettelbruck

## II. Lagerung und Tektonik des Luxemburger Sandsteins

Der Sandsteinkörper zeigt innerhalb Luxemburgs muldenförmige Lagerung. Die Muldenachse verläuft in etwa NE-SW Richtung, wobei sie gegen SW hin abtaucht. Bei Echternach an der mittleren Sauer im NE des Landes liegt die Basis des Sandsteins bei + 221 m ü. NN, im Bohrlch Differdange im SW Luxemburgs bei - 100 m u. NN.

Sowohl im Nord- wie im Südflügel der Hauptmulde sind flache Nebenmulden eingeschaltet, die der Hauptmuldenachse parallel verlaufen. Diese flachwellige, in NW-SE-Richtung sich aufreihende Muldenfolge wird durch senkrecht zu den Muldenachsen verlaufende Aufwölbungszonen in einzelne flache Schüsseln aufgeteilt.

Wie bedeutsam die Lagerung des Sandsteins und damit das Relief des Stauhizontes an seiner Basis für die Bewegung des Grundwassers ist, wird näher auf den Seiten 17 bis 21 dargestellt werden.

Störungen folgen generell der NE-SW-Richtung. Seltener sind NW-SE verlaufende Verwerfungen. In allen Fällen handelt es sich um durch Zerrung hervorgerufene Brüche, also Abschiebungen. Dort wo Abschiebungen lediglich Schollen von Luxemburger Sandstein gegeneinander versetzt haben, sind sie für Grundwasserbewegungen von keiner Bedeutung. Offensichtlich sind die Bewegungsflächen nicht verlehmt, so daß die Sickerwässer ungehindert von einer Scholle in die andere übertreten können. Über weite Strecken ist der Sandstein jedoch gegen die abdichtenden Keupermergel versetzt. In dieser Situation kommt es zu einem Grundwasseranstau und zur Ausbildung von Überlaufquellen entlang der Verwerfung. (s. S. 19)

BERG (1965) hat sich ausführlich mit der Klüftung im Luxemburger Sandstein beschäftigt. Nach seinen Beobachtungen ist der Sandstein stets gut geklüftet. Die Klufthäufigkeit bleibt innerhalb des Aufschlußbereiches gleich, zeigt jedoch auf größere Entfernungen starke Schwankungen. Die Kluftrosen weisen zwei Hauptmaxima der Kluftrichtungen aus bei  $30^{\circ}$  bis  $50^{\circ}$  und  $130^{\circ}$  bis  $150^{\circ}$ . Nebenmaxima liegen um  $20^{\circ}$  und bei  $80^{\circ}$  bis  $100^{\circ}$ . Eine von BERG (1965) durchgeführte Talrichtungsstatistik macht deutlich, daß zwischen Hauptkluftrichtungen und Talrichtungen enge Beziehungen bestehen. Die Verfolgung der Klüfte durch die Talerosion ist gut aus dem Bachnetz innerhalb des Luxemburger Sandsteins zu erkennen. (z.B. Consdorferbach, Aesbach, Lauterbornerbach)

Laufen Kluft- und Talrichtung parallel und ist der Vorfluter bis in den Keuper eingetieft, so gleiten Sandsteinschollen auf dem plastischen Untergrund der Pylonotenschichten am Talhang ab. Aus den dadurch zu klaffenden Spalten erweiterten Klüften entstehen kleinere Höhlensysteme. Bekannt ist z.B. die «Keltenhiel» bei Müllerthal. Wasserstandsmarken, die auf eine frühere Wasserführung schließen lassen könnten, sind nicht gefunden worden. Auch heute sind diese Höhlen vollständig trocken, von unbedeutenden Tropfwässern abgesehen. Kleinere Tropfsteinbildungen aus dem mobilisierten kalkigen Bindemittel des Sandsteins sind nicht selten.

Über die Bedeutung der Klüftung für die Grundwasserbewegung soll näher in Abschnitt B. I. berichtet werden.

## B. HYDROGEOLOGISCHER TEIL

### I. Der Grundwasserträger

Im unverwitterten Zustand ist der Luxemburger Sandstein als Kalksandstein anzusprechen. Nutzbarer Porenraum ist in einem solchen Gestein nicht vorhanden. Grundwasserspeicherung kann daher nur im Kluftraum vor sich gehen.

Aus Tagesaufschlüssen und Bohrungen ist jedoch bekannt, daß dieser Kalksandstein einer tiefgreifenden Verwitterung unterliegt. Das Bindemittel wird mehr oder weniger vollständig abgeführt (s. auch Hydrochemischer Teil). Zurück bleibt ein fein- bis mittelkörniger Sandstein, dem nunmehr auch ein nutzbares Porenvolumen zugesprochen werden muß. (Korngrößen zu 80-90% zwischen 0,177 und 0,42 mm) Größenordnungsmäßig dürfte dieser nutzbare Porenraum dem für Feinsande gültigen entsprechen. Sofern der Luxemburger Sandstein nicht durch überdeckende Schichten vor der Verwitterung geschützt ist, geht die Grundwasserspeicherung sowohl im Poren- wie im Kluftraum vor sich. Die Drainage des gesamten Speichers verläuft über stärker geöffnete Klüfte bzw. Zonen größerer Klufintensität.

Durch die schlecht durchlässigen Mergel der jüngeren jurasischen Schichten wird eine intensive Verwitterung des Sandsteins verhindert. Zwar schreitet von Sickerwässern durchflossenen Klüften aus die Lösung des Bindemittels voran, aber dabei wird wohl kaum ein größerer nutzbarer Porenraum entstehen. Als Speicherraum dürfte hier im wesentlichen nur der Kluftraum zur Verfügung stehen.

#### I. 1. Grundwasserbewegung und Tektonik

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis einer hydrologischen Kartierung des Gebietes zwischen Sauer und Schwarzer Ern. Eingetragen sind sämtliche Quellen und Bäche, dazu der Ausstrich der Grenze Sandstein - Pylonotenschichten, d.h. des Hauptstauhizontes. Es fällt auf, daß mit wenigen Ausnahmen sämtliche Quellaustritte an den Stauhizont der Pylonotenschichten gebunden sind. Stellen bedeutender Grundwasserzutritte in den Bachläufen liegen ebenfalls in der Nähe der Sandsteinbasis.

Am 19.7.69 wurde der Niedrigwasserabfluß an Ober-, Mittel- und Unterlauf aller Bäche gemessen. Nach vorangegangener wochenlanger Trockenheit führten die Bäche an diesem Tag nur noch Grundwasser ab. Wie in jedem Sommer nach langer Trockenheit lagen die Bäche auch an diesem Tag in ihren Oberläufen nahezu trocken. Erst nach Passieren des Stauhizontes der Pylonotenschichten und damit des Grundwasserspiegels war eine sprunghafte Zunahme des Abflusses festzustellen.

An den Oberläufen des Halsbach und des Lauterbornerbaches treten auch im oberen Teil des Grundwasserträgers kleinere Quellen zu Tage. Sie sind bedingt durch Mergel- einlagerungen im Sandstein, die zur Ausbildung lokaler, unbedeutender Stauhizonte führen. Zumeist versickern diese Wässer im Bachbett (z.B. Halsbach) und treten in das tiefere Hauptstockwerk über. Dies gilt auch für die Quellen am oberen Gluebach. Durch eine etwas mergeligere Fazies des



Luxemburger Sandsteins hat sich hier ein zweites unvollkommenes Stockwerk ausgebildet. In den Sommermonaten ist das Wasser der Quellen bis zum Mittellauf des Baches vollständig versickert.

Eine Sonderstellung nehmen die Quellen ein, die entlang der Abschiebung des Sandsteins gegen die Mergel des Mittleren Keupers (km) austreten. Sie sind keine Schichtquellen wie alle anderen, sondern Überlaufquellen.

Abbildung 3 zeigt nun noch für das gleiche Gebiet die Lagebeziehung der Quellen zum Relief der Basis des Sandsteins, d.h. zum Relief des Stauhorizontes. Starke Grundwasseraustritte ordnen sich eindeutig im Muldentiefsten an, während Muldenflügel und Beulen wasserarm sind.

Der Zusammenhang zwischen Klüftung und Grundwasserzirkulation zeigt sich eindrucksvoll bei einer Begehung des Hauptabwasserstollens der Stadt Luxemburg.

Der Stollen verläuft etwa horizontal in einer Tiefe von 60 m unter der Stadt vom Petrusse- zum Alzettetal. Die Stollensohle liegt 20 m über der Sandsteinbasis und etwa 1-2 m über dem Grundwasserspiegel.

Im Bereich der ersten 150 m hinter dem Stolleneingang sind, bedingt durch die Nähe des Talhanges, die Klüfte noch bis zu 10 cm geöffnet und mit leicht lehmigem Feinsand verfüllt. An den Ulmen tritt Wasser aus. Nach dieser Zone beginnen sich die Klüfte zu schließen. Der Stollen ist hier vollkommen trocken. Dies bleibt unverändert, bis der Stollen auf einer Länge von etwa 100 m eine Zone intensiver Klüftung durchfährt. An First und Ulmen tritt aus bis 2 cm geöffneten Spalten Wasser aus. An dieser Stelle hatte man beim Stollenbau mit starkem Wasserandrang zu kämpfen. Bei vollkommen geschlossenen Klüften bleibt im weiteren Verlauf der Stollen trocken.

Alle aufgezählten Beobachtungen erlauben nachstehende Schlußfolgerungen:

- Der «Grundwasserträger Luxemburger Sandstein» besitzt, von lokalen Ausnahmen abgesehen, keine Aufgliederung in Grundwasserstockwerke. Es besteht nur ein geschlossener Grundwasserträger. Die liegenden Psilotenschichten bilden einen vollständigen Stauhorizont.
- Poren- und Klufttraum sind die tragenden Faktoren der Grundwasserspeicherung.
- Erweiterte Klüfte und Kluftzonen drainieren den gesamten Grundwasserspeicher bis zu seiner Basis. Grundwasserzirkulation auf Schichtfugen spielt nur eine untergeordnete Rolle.
- Liegt der Stauhorizont über Vorfluterniveau, so folgen die Grundwasserfließrichtungen dem Relief des Stauers.

Damit wird klar, daß für die Grundwasserzirkulation im Luxemburger Sandstein die Tektonik von entscheidender Bedeutung ist. LUCIUS (1948) kam anhand zahlreicher Beobachtungen und durch seine ausgezeichnete Landeskenntnis zum gleichen Ergebnis.

Die absolute Zahl der Klüfte, ihre Weite und Dichte hängt neben dem Gesteinsmaterial und der Bankung in erster Linie vom tektonischen Beanspruchungsplan ab. Zahlreiche und stark erweiterte Klüfte liegen außerdem an den Talhängen vor, wo der Gesteinsverband durch talwärts gerichtete Gleitvorgänge zerrissen wird. Wasserwegsam sind in erster Linie die Zonen größerer Kluftdichte. Als Drainagestränge der einzelnen Speicherräume durchziehen sie den Grundwasserträger. SEILER (1968) konnte die gleichen Verhältnisse auch im Buntsandstein des Saarlandes feststellen. Nach EISSELE (1966) vollziehen sich im Buntsandstein des Nord-schwarzwaldes die wesentlichen Grundwasserbewegungen ebenfalls im Kluftsystem. Wie im Abschnitt Geologie schon ausgeführt, scheinen Verwerfungen innerhalb des Sandsteinkörpers auf die Grundwasserbewegung keinen Einfluß zu haben. Es ist jedoch anzunehmen, daß die im Ver-

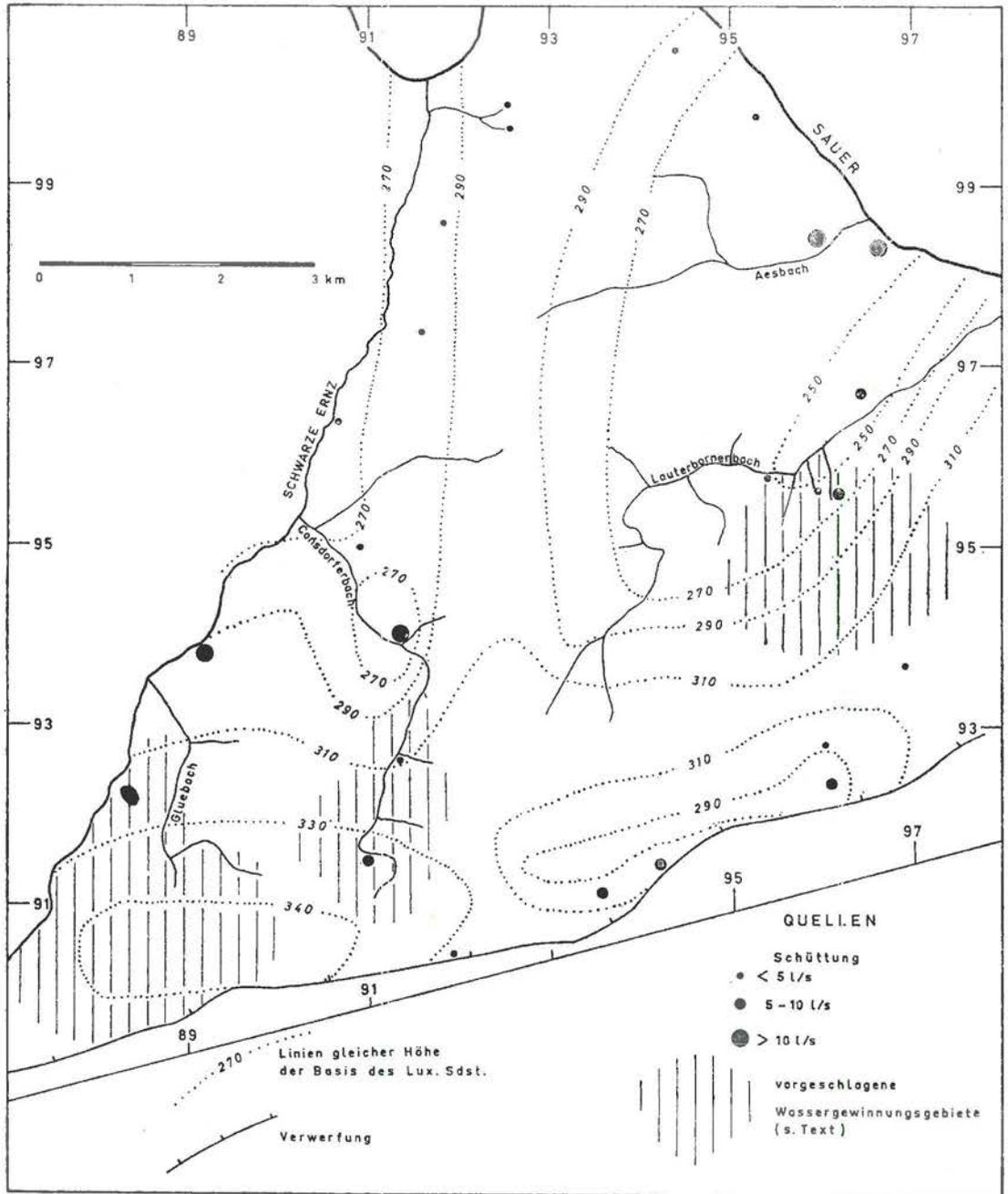


Abb. 3. Lagebeziehungen zwischen Quellaustritten und der Lagerung des Grundwasserträgers. Außerdem sind Gebiete eingetragen, in denen eine erweiterte Grundwasserförderung durch Tiefbrunnen möglich ist. (Näheres s. Text Abschnitt B. III. 4.)

lauf von Verwerfungen erhöhte Kluftdichte zur Ausbildung wasserwegsamere Zonen führt. Zu dieser Frage konnten jedoch im Untersuchungsgebiet keine Beobachtungen gemacht werden.

## I. 2. Grundwasserfließvorgänge im klüftigen Luxemburger Sandstein

Zur Ergründung der Grundwasserfließvorgänge im Kluftraum des Luxemburger Sandsteins wurden einige Färbe- und Salzungsversuche durchgeführt.

Bei zwei Markierungsversuchen wurde der Farbstoff Uranin in flachen Gruben direkt in die Lockersande eingegeben. Binnen weniger Stunden (1-2 Stunden) war in beiden Fällen die gesamte aufgelöste Farbmenge mit mehreren Kubikmetern Spülwasser im Boden versickert. Beide Versuche verliefen negativ. Es konnte trotz langfristiger Beobachtungen aller in Frage kommenden Quellen kein Austritt von Uranin nachgewiesen werden.

Die Lockersande vermögen offensichtlich innerhalb kurzer Zeit große Wassermengen aufzunehmen, die sie nur zögernd und über größere Zeiträume verteilt an das tieferliegende Grundwasser abgeben. Eingespülte Farbtracer werden daher in stark verdünntem Maße und mit großer Verzögerung an den Austrittsstellen des Grundwassers erscheinen. Bei den weiteren Markierungsversuchen wurde deshalb nach Punkten gesucht, die eine Eingabe direkt in den Kluftraum, möglichst in der Nähe des Grundwasserspiegels, ermöglichten.

### *Salzungsversuch Colbette (im Einzugsgebiet des Gluebaches)*

In einen 3 m tiefen Wiesenbrunnen bei Colbette wurden 100 kg KCl (= 52,4 kg K<sup>+</sup>) eingegeben. Der Brunnen steht hier in dem schwebenden Stockwerk, das durch eine mergelige Sonderfazies des Luxemburger Sandsteins gebildet wird. (s. S. 17)

Der Salzaustritt konnte in der Quelle Waschbrunnen Stoppelhaff nachgewiesen werden. Der Nachweis erfolgte anhand der elektr. Leitfähigkeit und durch flammenphotometrische Bestimmung des Kaliums. Proben wurden stündlich entnommen.

Entfernung:           Eingabepunkt — Austrittspunkt       =   200 m  
Höhenunterschied: Eingabepunkt — Austrittspunkt       =    10 m  
Schüttung der Quelle:   5,5 l/s

Nachweis der ersten erhöhten K<sup>+</sup>-Konzentration 5 Stunden nach Eingabe des Salzes. Das entspricht einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 40 m/h oder 11,1 cm/s.

### *Färbeversuch Wiersch/Dondelange*

(Näheres bei v. HOYER, 1969)

Der Dondeler Bach fließt in seinem Oberlauf über anstehenden, klüftigen Sandstein. Bei Niedrigwasser während Trockenperioden versickert der Bach völlig. In das Bachbett wurden bei trockenem Wetter 2 kg Uranin mit 4,5 Kubikmeter Spülwasser eingebracht. Der Farbstoff trat in der Quellengruppe Wiersch wieder aus.

Entfernung:           Eingabepunkt --- Austrittspunkt   =   400 m  
 Höhenunterschied: Eingabepunkt --- Austrittspunkt   =   15 m  
 Schüttung der Quellengruppe:   22,5 l/s

Proben wurden alle 2 Stunden entnommen und analysiert. 4 Stunden nach Eingabe des Farbstoffes konnte das erste Uranin in der Quelle nachgewiesen werden. Das entspricht einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 100 m/h oder 27,8 cm/s.

*Färbeversuch Bohrungen Bafelt/Koerich*

Beim Syndicat des Eaux du Sud Koerich stehen zwei Bohrungen rund 30 m tief im Luxemburger Sandstein: Bohrung Bafelt I und Bafelt II. In Bohrung Bafelt II wurden 3,5 kg Uranin eingegeben und die Wassersäule durch Umwälzung mit einer Pumpe durchmischt. Gleichzeitig wurde aus Bafelt I mit einer Leistung von 11/l/s gefördert. Proben wurden stündlich an Bafelt I entnommen. 20 Stunden nach Eingabe des Tracers in Bohrung Bafelt II wurde in Bohrung Bafelt I das erste Uranin gefördert.

Entfernung:           Bohrung Bafelt II --- Bafelt I           =   300 m  
 Förderleistung in Bafelt I = 11 l/s   =   rund 40 m<sup>3</sup>/h  
 Die maximale Fließgeschwindigkeit berechnet sich zu 15 m/h oder 4,17 cm/s.

Damit wurde im Vergleich zu den zwei zuvor beschriebenen Markierungsversuchen zwischen den beiden Bohrungen die geringste Fließgeschwindigkeit festgestellt. Nun konnte aber SEILER (1968) im Buntsandstein des Saarlandes feststellen, daß die horizontale Fließgeschwindigkeit bei Bohrungen von der Förderleistung abhängt. Bei Brunnen Bafelt I bestand nicht die Möglichkeit die Förderleistung zu variieren. Die ermittelte maximale Fließgeschwindigkeit kann also nur der Förderleistung von 40 m<sup>3</sup>/h zugeordnet werden.

**I. 3. Folgerungen für die Festlegung von Schutzzonen**

Bei Festlegung von Schutzzonen hat man sich in staatlichen Gutachten in den letzten Jahren auch in Luxemburg auf die « Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete » des DVGW von 1961 bezogen. Deshalb sollen auch bei den folgenden Erörterungen diese Richtlinien zu Grunde gelegt werden.

In Abschnitt IV, 2. der « Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete » erfolgt die Gliederung und Bemessung der Schutzzonen nach der Untergrundbeschaffenheit. Nach der Reinigungswirkung der Deckschichten und des Grundwasserleiters werden unterschieden:

- günstige Untergrundbeschaffenheit
- mittlere Untergrundbeschaffenheit
- ungünstige Untergrundbeschaffenheit

Für die Verhältnisse im Luxemburger Sandstein ist die Untergrundbeschaffenheit als « günstig » zu beurteilen. Das heißt, der Grundwasserleiter ist von wasserdurchlässigen, jedoch gut reinigenden oder von schwer durchlässigen unverletzten Deckschichten überlagert.

Für die reinen Lockersande liegt der Korndurchmesser zu 65-70% zwischen 0,1-0,25 mm, so daß sie als Feinsande einzustufen sind. In der Bodenzone ist ein gleichmäßiger Lehmanteil von 20%

vorhanden. In den Richtlinien wird für lehmige Sande und Feinsande eine flächenhaft durchgehende Mächtigkeit der Deckschichten von 2,5 m, bei höchstem Grundwasserstand, für Mittelsande (wirksame Korngröße kleiner als 0,4 mm) eine von 4 m gefordert.

Für große Teile des Luxemburger Sandsteins sind diese Bedingungen erfüllt, da zumeist das Vorfluterniveau unter dem Stauhohizont liegt und somit Deckschichten von 20 bis 30 m Mächtigkeit über dem Grundwasserspiegel liegen. Die Verwitterungszone mit Lockersanden nimmt davon 2 bis 5 m ein. Im oberen Teil des Sandsteinkörpers dürfte zudem ein Großteil der Klüfte mit Sand verfüllt sein.

Als schwer durchlässige Deckschichten haben die «Kalke und Mergel von Strassen» zu gelten, die weite Flächen des Sandsteins bedecken. (s. Abschnitt II. 2.) Gleichmaßen schwer durchlässig sind die im Hangenden folgenden jüngeren jurasischen Mergelabfolgen.

Das Schutzgebiet wird in Abschnitt IV. 3. der Richtlinien des DVGW gegliedert in:

- Fassungsbereich (Zone I)
- Engere Schutzzone (Zone II)
- Weitere Schutzzone (Zone III)

Zone I soll vor jeder Verunreinigung und sonstiger Beeinträchtigung geschützt werden. Am ehesten ist dies gewährleistet, wenn diese Flächen sich im Eigentum des Wasserversorgungsunternehmens bzw. der Gemeinden befinden. Die Ausdehnung der Zone I ist in erster Linie von Lage, Art und Ausbau der Wasserfassung abhängig. Die Festlegung dieser Zone ist von Fall zu Fall von einem Hydrogeologen nach dem Geländebefund festzulegen. Auf diese speziellen Fragen einzugehen, soll nicht Aufgabe dieser Arbeit sein.

Die Zone II soll den Schutz gegen die bakteriologische Verunreinigung und gegen Verunreinigungen, die durch die Reinigungskraft des Untergrundes nicht mehr beseitigt werden können, gewährleisten. Wie die Beobachtungen in Abb. 2 und der Färbeversuch Wiersch zeigen, bestehen eindeutige Wechselbeziehungen zwischen dem oberirdischen Gewässernetz und dem Grundwasser. Einerseits tritt Bachwasser dem Grundwasser zu, andererseits tritt Grundwasser in den Bachbetten aus. Beide Vorgänge laufen im Kluftraum ab. Eine maßgebliche Versickerung von Oberflächenwasser kann immer dann zustande kommen, wenn der klüftige Sandstein seiner reinigenden Deckschichten beraubt ist. Das ist vor allem in den Bach- und Flußbetten der Fall. Weit geöffnete Klüfte treten außerdem an den Talhängen auf. Hier ist zudem die Überdeckung durch Lockersande nur gering mächtig.

Die Ausdehnung der Zone II soll, gemäß den Richtlinien, in Richtung des ankommenden Grundwassers bis zu einer Linie erfolgen, von der aus das unterirdische Wasser 50 Tage bis zum Eintreffen in der Fassungsanlage benötigt. Die Markierungsversuche haben gezeigt, daß im Kluftraum des Sandsteins relativ hohe Fließgeschwindigkeiten herrschen. Sobald verunreinigte Wässer in den Kluftraum eingetreten sind, ist also eine Reinigung im Untergrund nicht mehr möglich. Die Aufenthaltsdauer dieser Wässer im Untergrund liegt weit unter der 50-Tage-Grenze. Für die Streckung der Zone II im Luxemburger Sandstein gilt deshalb: Die Zone II muß alle Punkte des Einzugsgebietes einer Wasserfassung umschließen, an denen der Sandstein seiner reinigenden bzw. schwer durchlässigen Deckschichten (Lockersande oder Mergel) beraubt ist.

Besondere Gefahrenzonen bilden tief eingeschnittene Bachläufe, die das Einzugsgebiet einer Grundwasserfassung queren, da die Bachwässer zumeist stark mit Abwässern belastet sind.

An Talhängen sollte die Begrenzungslinie der Zone II etwa auf 100 m vom Talrand gelegt werden, um den stark klüftigen Hangbereich mit einzuschließen.

Die Zone III soll den Schutz gegen weitreichende chemische und radioaktive Verunreinigungen und sonstige Beeinträchtigungen des Grundwassers gewährleisten.

Die Zone III sollte das gesamte Einzugsgebiet einer Wasserfassung umschließen. Die Ausdehnung des Einzugsgebietes richtet sich zunächst nach der Art der Wasserfassung.

Bei Tiefbrunnen ist die Ausdehnung des Absenkungstrichters zu berücksichtigen. Im Sandstein dürfte der Absenkungstrichter selten kreisförmig sein. Der Hauptzufluß erfolgt auf besonders wasserwegsamem Klüften bzw. Klüftzonen. Der Absenkungstrichter wird sich dementsprechend in Richtung des Hauptzuflusses erweitern. Zur Festlegung der Zuflußrichtung sind deshalb Kenntnisse über Klüftung und die allgemeine tektonische Lage unerlässlich. Spezielle hydrogeologische Untersuchungen sind jeweils unumgänglich. (s. dazu auch SEILER 1968)

Im Großteil des Landes liegt der Stauhorizont des Luxemburger Sandsteins über Vorfluterniveau. Die Erstreckung des Einzugsgebietes, der an dieser Grenze austretenden Quellen, richtet sich in erster Linie nach der Tektonik des jeweiligen Gebietes. Die Größe des Einzugsgebietes hängt von der Schüttung der Quelle sowie der Charakteristik des Einzugsgebietes ab. Einige Werte hierzu können dem Abschnitt III über die Grundwassererneuerung entnommen werden.

Ein Sonderfall liegt dann vor, wenn die Zone II einer Grundwasserfassung von einem Bachlauf gequert wird, der auch Oberflächenwässer aus den Sandstein überdeckenden Mergelgebieten abführt. Da die Gefahr der Versickerung der Bachwässer innerhalb der Zone II besteht, muß jegliche grundwassergefährdende Tätigkeit im Einzugsgebiet des Baches vermieden werden. Das bedeutet, daß in diesem Fall die Grenze der Zone III entlang der oberirdischen Wasserscheide dieses Baches zu legen ist.

## **B. II. Oberirdischer und unterirdischer Abfluß**

### **II. 1. Meßverfahren für den Gesamtabfluß**

Vor Beginn der Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit wurde in Ostluxemburg lediglich der Abfluß der Schwarzen Ern durch einen Lattenpegel erfaßt. Die Ablesungen erfolgten einmal täglich.

Im Herbst 1967 und teilweise noch 1968 wurden folgende Meßstationen neu eingerichtet (s. auch Abb. 10):

Aesbach: hier wurde zunächst ein Lattenpegel installiert (Ablesungen einmal täglich), der im Juni 1968 durch einen Schreibpegel ersetzt wurde.

Consdorferbach: hier wurde ein Lattenpegel angebracht, der gewöhnlich einmal täglich abgelesen wurde, bei starken Niederschlägen jedoch zwei- bis dreimal täglich. Zudem konnten diese Ablesungen bei ihrer Auswertung anhand der Aufzeichnungen des Schreibpegels Aesbach korrigiert werden, da beide Bäche ein gleiches Abflußverhalten zeigten.

Gluebach: im Herbst 1968 wurde ein Meßwehr mit auswechselbarem Einsatz (hyperbolisches Profil Nr I und II nach KESSLER 1959) errichtet. Die Ablesungen erfolgten einmal täglich.

Halsbach: im Sommer 1968 wurde ein Meßwehr mit auswechselbarem Einsatz eingebaut. (Einsätze wie Gluebach) Auch hier wurde einmal täglich der Wasserstand abgelesen.

Gocblange: dieser Bach wurde erst ab Februar 1970 beobachtet. Installiert wurde ein Schreibpegel in Kombination mit einem Überfallwehr mit rechteckigem Ausschnitt, ohne Seitenverengung (nach РЕНВОСК, 1929).

Die Aufstellung der Schlüsselkurven für alle nicht mit Meßwehren ausgerüsteten Wasserläufe erfolgte mit Meßflügeln.

In den ersten Monaten des Untersuchungszeitraumes erfolgten die Quellsmessungen wöchentlich. Der hohe Zeit- und Kostenaufwand zwang dann dazu, die Anzahl der Meßstellen zu reduzieren und den Beobachtungsintervall zu vergrößern. Wöchentliche Quellsmessungen wurden aber weiterhin am Widdeberg vorgenommen. Hier erfolgten die Schüttungsmessungen zum Teil auch mit eingebauten Wehren (Dreiecküberfall, 90°, nach THOMPSON).

Von den Quellen im Gebiet zwischen Sauer und Schwarzer Ernz wurden diejenigen ausgewählt, deren Schüttungsverhalten dem aller anderen in gleicher hydrogeologischer Situation liegenden Quellen, entsprach. Ihre Schüttung wurde alle zwei Wochen gemessen. Die Messungen an den restlichen Quellen, die nur jedes Vierteljahr vorgenommen wurden, können somit zumindest qualitativ eingeordnet werden.

Sämtliche Meßergebnisse enthalten die Abbildungen 2 und 4.

### “Widdeberg”

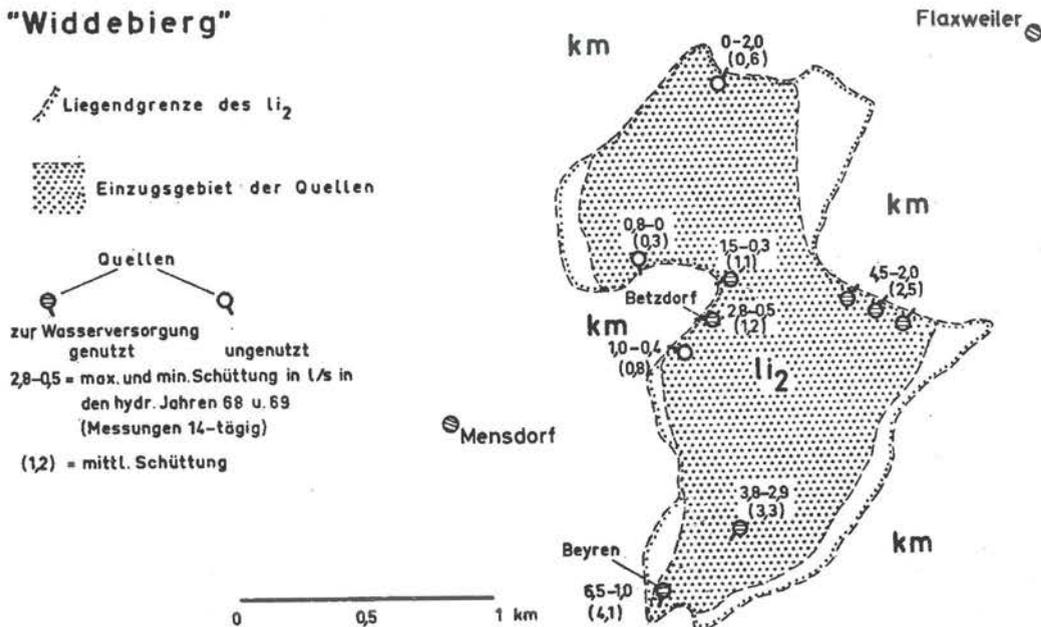


Abb. 4. Die «Luxemburger Sandstein-Insel» Widdeberg mit sämtlichen Quellaustritten. Angaben über mittlere, Minimal- und Maximalschüttungen in den hydrol. Jahren 1968 und 1969. Ausdehnung des unterirdischen Einzugsgebietes Eu.

## II. 2. Abflußverhalten von Einzugsgebieten mit verschiedenen Deckschichten und unterschiedlichem geologischem Untergrund

Nach NATERMANN (1951) zeigen Trockenwetterabflußlinien verschiedener Einzugsgebiete je nach deren Art und Aufbau charakteristische Unterschiede. Natürlich existieren für jeden Vorfluter eine ganze Reihe von Trockenwetterabflußlinien, da der Anteil des Abflusses vom Niederschlag ganz davon abhängt, wie aufnahmefähig die Deckschichten jeweils sind. So wird im Hochsommer bei geringen Bodenwassergehalten ein niedrigerer oberflächlicher Abfluß zustande kommen als im Winter bei hohen Bodenwassergehalten.

Am 21. und 22. April 1969 fielen mit gleichmäßiger Verteilung in Ostluxemburg 30-35 mm Niederschlag. Danach erfolgten nur noch ganz geringe Regenfälle, so daß in allen Bächen ein ungestörter Trockenwetterabfluß zustande kam.

Die Trockenwetterabflüsse nach dem 22. April für verschiedene Einzugsgebiete sind in Abb. 5 aufgetragen. Den höchsten Trockenwetterabfluß hat das Einzugsgebiet des Lenningerbaches (Le). In diesem Gebiet stehen Keupermergel und Oberer Muschelkalk (Dolomite) an.<sup>1)</sup> Den Verlauf dieser Abflußkurve bestimmen zwei Vorgänge: 1. die schlechte Durchlässigkeit der Deckschichten bewirkt einen raschen oberflächlichen Abfluß des Regenwassers. 2. die geringe Speichermöglichkeit des Untergrundes läßt die Sickerwässer schnell wieder aus dem Gebirge dem Vorfluter zutreten. Beide Vorgänge laufen zum Teil gleichzeitig ab. Der zweite ist jedoch der langfristige. Der unterirdische Abfluß des Lenningerbaches ist deshalb noch 10 Tage nach dem Starkregen wesentlich höher, als er vor dieser Niederschlagsperiode war.

Der Dosbach (Do) entwässert ein Gebiet mit Sinémurien-Mergeln (li3). Im Vergleich zum Lenningerbach ist hier der direkte oberflächliche Abfluß noch höher. Eine Speicherung erfolgt offensichtlich nur in oberflächennahen Zonen, denn der Abfluß geht nach Niederschlägen rasch zurück. Aus längeren Beobachtungen des Dosbaches ist bekannt, daß ein ständiger aber sehr geringer Abfluß nur in den niederschlagsreichen Wintermonaten, also bei hohen Bodenwassergehalten, zustande kommt. Während der Sommermonate bei hoher Verdunstung liegt er schon wenige Tage nach Regenfällen völlig trocken. Bessere Aussagen über die Abflüsse aus Juramergeln ermöglichen die Messungen an der Goeblange, die auf Seite 28 besprochen werden.

Einen wesentlich geringeren Trockenwetterabfluß haben die übrigen in Abb. 5 aufgeführten Bäche. Am Aufbau ihrer Einzugsgebiete ist Luxemburger Sandstein mit gut durchlässigen, sandigen Deckschichten beteiligt. Die genauen Flächenanteile können Tabelle 5 entnommen werden. In der Reihe Schwarze Ernzt (SE) - Aesbach (Ae) - Consdorferbach (Co) nimmt der Anteil an sandigen Deckschichten zu. In gleichem Maße geht der oberflächliche Abfluß zurück, das heißt die Versickerung nimmt zu. Eine gute Speichermöglichkeit des Untergrundes zeigt sich darin, daß sich Aesbach, Consdorferbach und Schwarze Ernzt bereits 8 Tage nach dem Starkregen auf die gleichen unterirdischen Abflußmengen eingepegelt haben, die sie vor dem Starkregen führten.

Eine gewisse Sonderstellung nimmt der Halsbach (Ha) ein. In seinem Einzugsgebiet sind nur Lockersande vertreten und sein Bachbett liegt hoch über dem Grundwasserspiegel. Sein Abfluß ist sehr gering und da die Sickerwässer in tiefere Bereiche absinken, fällt die Abflußkurve rasch auf einen sehr niedrigen Wert ab.

<sup>1)</sup> Die Werte des Lenningerbaches wurden mir freundlicherweise von Herrn NEUMANN zur Verfügung gestellt. Näheres s. NEUMANN, 1971.

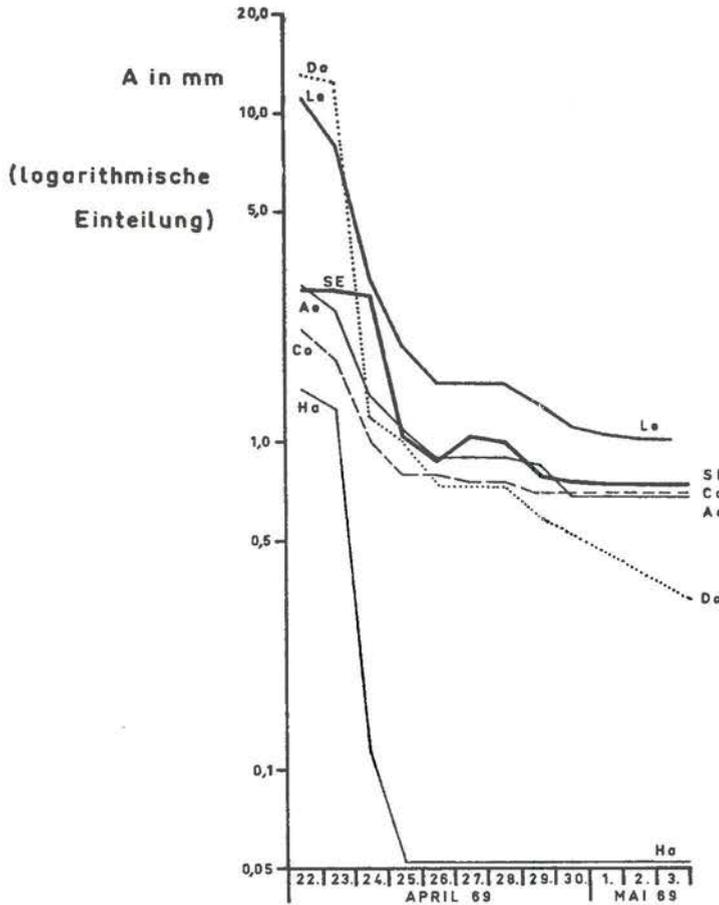


Abb. 5. Trockenwetterabflüsse verschiedener Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Deckschichten und unterschiedlichem geologischem Untergrund. (Le = Lenningerbach, Do = Dosbach, SE = Schwarze Ernz, Ae = Aesbach, Co = Consdorferbach, Ha = Halsbach)

In der zweiten Tageshälfte des 26. April fallen in allen Einzugsgebieten nochmals 3 mm Regen. Er bewirkt eine leichte Zunahme des Abflusses bzw. eine Verflachung der Trockenwetterabflußlinie. Bezeichnenderweise kommt im Halsbach (Ha) kein zusätzlicher Abfluß zustande. Die Lockersande vermögen offensichtlich den Niederschlag vollständig aufzunehmen. Von allen übrigen Bächen zeigt, wie zu erwarten, der Consdorferbach (Co) die geringste Reaktion auf den Regen.

Daß derartig geringe Niederschläge überhaupt zu einer Erhöhung des Abflusses führen, ist wohl darauf zurückzuführen, daß nach dem Starkregen die mergeligen Deckschichten hohe Bodenwassergehalte aufweisen und deshalb keine weiteren Regenwässer mehr aufnehmen können (HEITTELE 1968).

Die jährlichen Werte für den oberirdischen Abfluß bestätigen die aus der Betrachtung einer einzelnen Niederschlagsperiode gewonnenen Ergebnisse. In Tabelle 5 sind die oberirdischen Abflüsse (Ao) aller schon bekannten Einzugsgebiete für die hydrogeologischen Jahre 1968 und 1969 zusammengestellt. Einzugsgebiete mit hohem Anteil an schlecht durchlässigen Deckschichten haben den höchsten jährlichen oberirdischen Abfluß. Da die Versickerung entsprechend gering ausfällt, ist die jährliche Grundwasserneubildung dieser Gebiete kleiner als in Gebieten mit gut

durchlässigen, sandigen Deckschichten. (Näheres s. in Abschnitt III). Sind nur Lockersande in den Einzugsgebieten vertreten, so kommt nur ein ganz geringer oberirdischer Abfluß wie beim Gluebach oder gar kein oberirdischer Abfluß wie am Widdeberg zustande.

Um die Abflüsse aus rein aus Juramergeln aufgebauten Einzugsgebieten auch über einen längeren Zeitraum bestimmen zu können, wurde Anfang 1970 an der Goeblange bei Koerich, im Westen des Landes, ein Schreibpegel aufgestellt. Den Aufbau des geologischen Untergrundes des Einzugsgebietes zeigt Abb. 6. Auf dem Sandstein sind lehmige Braunerden entwickelt. Auf dem li3 und li4 liegen tonige und schwere tonige Braunerden, flächenhaft tritt Staunässe auf. Die Alluvionen im Talboden sind leicht sandige Lehme. Sie dichten das Bachbett vollständig zum liegenden Sandstein ab. Abwässer werden dem Bach nicht zugeleitet. Zur Berechnung der potentiellen Verdunstung wurden die Werte der Station Luxemburg/Stadt herangezogen. Diese Station liegt 334 m ü.NN. Das Einzugsgebiet der Goeblange bis zum Pegel erhebt sich von 300 bis auf 350 ü.NN. Die für die Station Luxemburg/Stadt berechnete potentielle Verdunstung dürfte also auch für dieses Gebiet gelten. (s. dazu auch Abschnitt III. 2.2.) Um den Niederschlag möglichst genau bestimmen zu können, wurde ein Regenschirm direkt am Schreibpegel aufgestellt.

In Tabelle 1 sind die monatlichen Werte für Niederschlag (N), potentielle Verdunstung (Vp), Gesamtabfluß (A) und die daraus errechnete Versickerung (I) zusammengestellt.

Dazu sind einige Anmerkungen zu geben:

In der letzten Februarwoche fielen alle Niederschläge als Schnee, der erst im März abtaute. Ein gewisser Anteil des Märzabflusses geht also noch auf Niederschläge des Februar zurück. Bei der Berechnung der Versickerung ergibt sich daher für den März ein sehr niedriger Wert, während der Februarwert dafür etwas zu hoch liegt.

Die vergleichsweise hohe Versickerungsrate im April dürfte wohl von der steigenden Verdunstung und der zunehmenden Wasserentnahme durch die Vegetation bedingt sein. Der sinkende Bodenwassergehalt macht die Deckschichten wieder aufnahmefähig für die Regenwässer.

Im Mai herrschten sehr unausgeglichene klimatische Verhältnisse, denn 67% (= 58,3 mm) des Gesamtniederschlags dieses Monats fielen innerhalb von 48 Stunden. Das verursachte einen außerordentlichen hohen Abfluß bei gleichzeitig geringer Versickerung. Der restliche Niederschlag von nur 28,4 mm verteilt sich auf die übrigen 28 Tage des Monats. Ihm steht eine relativ hohe potentielle Verdunstung von 56,2 mm gegenüber. Aus der Bilanzrechnung für den Monat Mai ermittelt sich daher, natürlich nur als rein mathematische Größe, ein negativer Wert für die Versickerung.

Bei wenig Niederschlägen und hoher Verdunstung im Monat Juni lag die Goeblange völlig trocken.

Monat	N mm	Vp mm	A mm	I mm
Februar	130,5	4,5	115,0	11,0
März	69,5	10,5	58,9	0,1
April	90,1	26,0	49,2	14,9
Mai	86,7	56,2	37,3	- 6,8
Juni	36,9	91,5	0	0

$$1 \text{ mm/Monat} = 0,386 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$$

Tabelle 1: Niederschlag (N), potentielle Verdunstung (Vp), Gesamtabfluß (A), und Versickerung (I) im Einzugsgebiet der Goeblange bei Koerich für einige Monate des Jahres 1970.

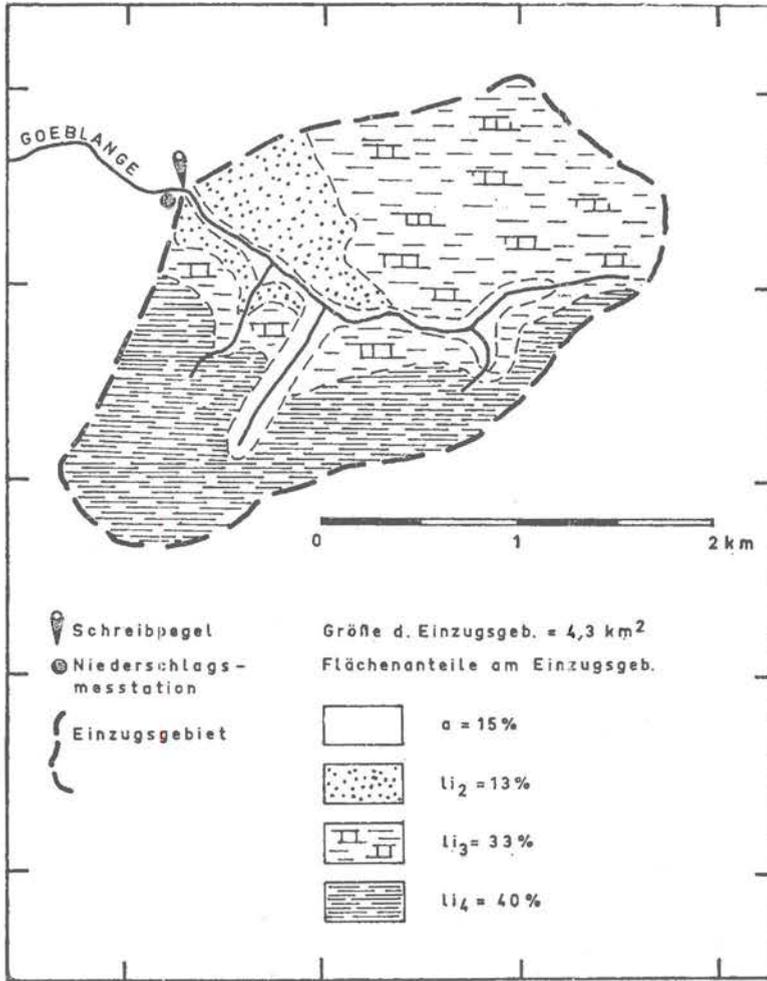


Abb. 6. Einzugsgebiet der Goebblange, Aufbau des geologischen Untergrundes.

Der oberirdische Abfluß aus diesem Mergelgebiet ist sehr hoch, nur ein geringer Teil der Niederschläge versickert. Ein dauernder unterirdischer Abfluß (Au) kommt nicht zustande. Lediglich in den Monaten Februar bis April führte die Goebblange auch in trockenen Perioden geringe Mengen « Grundwasser » ab. Hierbei handelt es sich wohl um Wässer aus oberflächennahen Zonen. Denn sobald die Vegetation beginnt, in erhöhtem Maße aus dem Bodenwasservorrat zu entnehmen und sowie die Verdunstung ansteigt, geht dieser Grundwasserabfluß rasch auf Null zurück. So lag die Goebblange bereits Anfang Mai während mehreren Tagen trocken, um dann Anfang Juni vollständig trocken zu fallen.

Es ist anzunehmen, daß ein gewisser Teil der versickerten Niederschläge aus den Mergeln in den liegenden Luxemburger Sandstein übertritt. Näheres ist jedoch bisher dazu nicht bekannt. Um zur Klärung dieses Problems zu kommen, hätte es einer Erweiterung des Untersuchungsprogrammes bedurft, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht beabsichtigt war.

### II. 3. Bestimmung des oberirdischen und unterirdischen Abflusses

Zur Aufgliederung des Gesamtabflusses  $A$  in einen oberirdischen und unterirdischen Anteil ( $A_o$  und  $A_u$ ) wird in der vorliegenden Arbeit das Verfahren von NATERMANN (1951) angewandt, da es den im Untersuchungsgebiet herrschenden Abflußverhältnissen am besten entspricht.

Nach diesem Verfahren wird der unterirdische Abfluß  $A_u$  dadurch ermittelt, daß die Trockenwetterpunkte (= Punkte reinen Grundwasserabflusses) der Gesamtabflußganglinie durch eine « Au-Linie » zu einer Kurve verbunden werden. Der Inhalt, der unter der Au-Linie liegenden Fläche, ergibt die abgeflossene Grundwassermenge innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit. Unsicherheiten treten bei diesem Verfahren dann auf, wenn über einen längeren Zeitraum reichlich Niederschläge fallen und sich deshalb kein echter Trockenwetterpunkt einstellen kann. Während der hydrologischen Jahre 1968 und 1969 konnten zur Kontrolle der Lage der Au-Linie während solcher Perioden die gemessenen Quellschüttungen herangezogen werden. Quellschüttungen müssen ja in etwa die gleichen Schwankungen aufweisen wie der gesamte unterirdische Abfluß. EINSELE (1969) verwendete dieses Verfahren recht erfolgreich bei seinen hydrologischen Untersuchungen im saarländischen Buntsandstein. Für die früheren Jahre standen leider solche Messungen nicht zur Verfügung. Für die langjährigen Bestimmungen des unterirdischen Abflusses der Schwarzen Ernз mußte deshalb an den kritischen Punkten die Au-Linie allein nach den in den Jahren 1968 und 1969 gemachten Erfahrungen gezogen werden.

Sehr günstig ist es, daß in keinem der bearbeiteten Einzugsgebiete Abwässer in größeren und wechselnden Mengen in die Gewässer abgeführt werden. Die Abflußganglinien sind also ungestört.

Mittels der Au-Linie kann natürlich nur das Grundwasser bestimmt werden, das oberhalb der Pegelstelle in das Gewässer eintritt. Ein Grundwasserstrom, der in sandigen oder kiesigen Alluvionen unter dem Bachbett das Einzugsgebiet verläßt, kann nach dem NATERMANN-Verfahren nicht erfaßt werden. Bei allen untersuchten Bachläufen dürfte auf diese Art nur sehr wenig Grundwasser verlorengegangen sein. Sämtliche Bachbetten verlaufen bereits schon mehrere hundert Meter oberhalb des Pegels in den abdichtenden Keupermergeln. Die Aufschüttung von Alluvionen sind nur gering mächtig.

### II. 4. Unterirdischer Abfluß

Tabelle 2 enthält die Jahreswerte des unterirdischen Abflusses  $A_u$  für die Schwarze Ernз. Anschaulicher werden diese Zahlen durch die Darstellung in Abbildung 7. Der unterirdische Abfluß der Schwarzen Ernз ist hier der jährlichen Grundwasserneubildung  $I_u$  dieses Einzugsgebietes gegenüber gestellt. (s. auch Abschnitt III). Am Oberlauf der Ernз wird aus Quellen ein wechselnder Anteil an Grundwasser in Fremdgebiete abgeführt. Zu  $A_u$  muß deshalb die Größe  $G_a$  addiert werden. Die jährlichen Werte dieser Grundwasserableitung sind in Tabelle 2 zu finden.

In den letzten 10 Jahren zeigte die Grundwasserneubildung recht kräftige Schwankungen. Der unterirdische Abfluß reagierte jedoch nur in stark abgeschwächtem Maße auf die wechselnden Angebote an Sickerwasser. Zudem verlaufen die Kurven von  $I_u$  und  $A_u$  nicht gleichsinnig. Auf die geringe Grundwasserneubildung des hydrologischen Jahres 1962 hin kam es erst ein Jahr später zu einem starken Rückgang des unterirdischen Abflusses, und die kräftige Grundwasserneubildung des Jahres 1965 wurde erst 1966 mit einem entsprechenden Anstieg von  $A_u$  beantwortet. Das Trockenjahr 1969 brachte wiederum keinen Rückgang des Grundwasserabflusses.

Der Grundwasserträger wirkt also als großer Speicher, der stark wechselnde Sickerwassermengen aufnimmt aber nur gering schwankende Grundwassermengen, dazu noch mit einjähriger Verzögerung, an den Vorfluter abgibt. Nach Trockenjahren müssen zunächst Speicherräume aufgefüllt werden, bevor es zu erhöhten Grundwasseraustritten kommt.

hydrol. Jahr	Jahreswerte									
	N mm	Ao mm	Ga mm	Au mm	Au+Ga mm	Vpk mm	Iu mm	Iu l/s.km <sup>2</sup>	Su + mm	Su - mm
1960	788	69	3	227	230	444	275	8,7	45	
1961	838	160	3	315	318	407	271	8,6		47
1962	656	143	3,5	265,5	269	469	44	1,4		225
1963	556	37	4,0	167	171	494	25	0,8		146
1964	575	58	5,0	155	160	481	36	1,1		124
1965	863	88	5,3	190,7	196	353	422	13,4	226	
1966	1078	223	5,8	242,2	248	464	391	12,4	148	
1967	963	108	6,0	216	222	496	359	11,4	136	
1968	976	157	6,7	223,3	230	438	381	12,1	150	
1969	626	80	8,7	211,3	220	495	51	1,6		169
Mittel	792	112	5,1	221	226	454	225	7,1	71	71

(1 mm/Jahr = 0,0317 l/s . km<sup>2</sup>)

Tabelle 2: Langjährige Meßreihen für die Wasserbilanz des Einzugsgebietes der Schwarzen Ernz. Eo = 103 km<sup>2</sup>; Eu = 80 km<sup>2</sup>; N, Ao, Vpk und Iu sind auf das oberirdische Einzugsgebiet bezogen, alle anderen Werte auf das unterirdische.

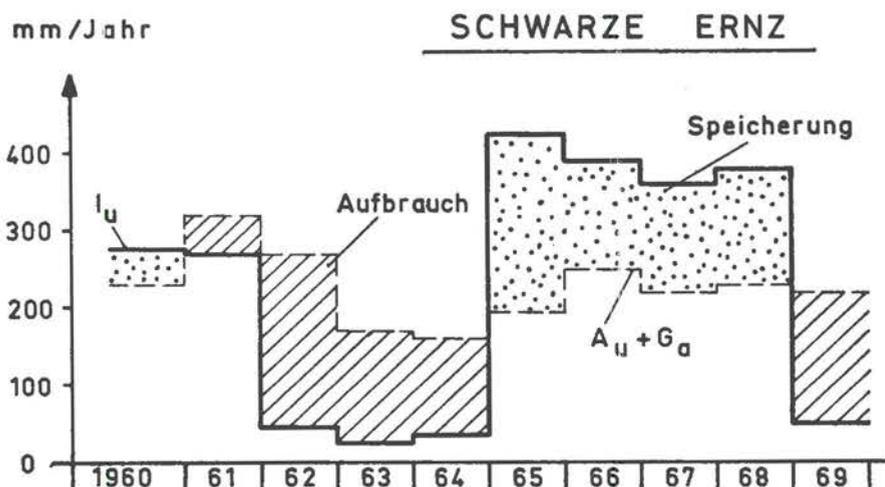


Abb. 7. Jährlicher unterirdischer Abfluß Au der Schwarzen Ernz in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung Iu.  
Ga = in Fremdgebiete abgeleitetes Grundwasser.  
Iu ist auf das oberirdische Einzugsgebiet bezogen, die anderen Werte auf das unterirdische.  
(genaue Werte s. Tabelle 2)

Die größere Pufferwirkung bei diesen Vorgängen dürfte dem Porenraum, die geringere dem Kluftraum zukommen (SEILER 1968). Eine Trennung des Kluft- und Porenwasseranteils am unterirdischen Abfluß ist anhand zweijähriger Untersuchungen nicht möglich. Langjährige Beobachtungen, die zu diesem Problem Angaben bieten könnten, sind in Luxemburg nicht vorhanden.

Gewisse Anhaltspunkte lassen sich aus der Betrachtung von Quellganglinien gewinnen. Je nach Anteil des Kluftwassers an der Gesamtschüttung einer Quelle wird das Schüttungsverhalten mehr oder weniger gedämpft verlaufen.

Abbildung 8 stellt die Ganglinien vier verschiedener Quellen gegenüber. Die unruhige Ganglinie der Quelle Melick repräsentiert einen Quelltyp mit relativ starker Beeinflussung durch Kluftwasser. Die Ganglinie ist durch eine ausgeglichene Grundsättung aus dem Porenraum unterlagert. Diese Grundsättung ist in der Darstellung durch eine gestrichelte Linie angedeutet. In ihrem Verlauf gleicht sie den Ganglinien der Quellen Widdeberg und Melerbour, bei denen die Beeinflussung durch Kluftwässer nur gering ist. Die Schüttung aus dem Porenraum hat ihr Maximum im Winterhalbjahr und ihr Minimum im Spätsommer.

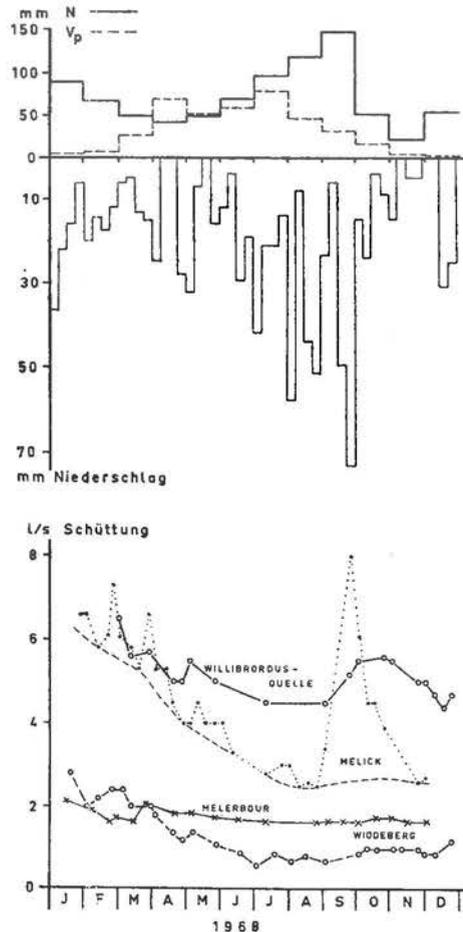


Abb. 8. Schüttungsganglinien von vier Quellen mit unterschiedlichem Anteil an Kluftwasser für das Jahr 1968. Zum Vergleich die wöchentlichen Niederschlagssummen der Station Altrier. Dazu der Verlauf der potentiellen Verdunstung (Monatssummen) berechnet nach den Werten der Station Halsdorf (nach HAUDE 1954 und 1963) im Vergleich zu den monatlichen Niederschlagssummen der Station Altrier.

Die Quelle Willibrordusbour nimmt eine Zwischenstellung ein.

Nach Trockenperioden muß offenbar der Kluftraum erst aufgefüllt werden, bevor es zu erhöhtem Grundwasserabfluß kommt. Obwohl im August 1968 bereits eine kräftige Grundwasserneubildung einsetzte, nimmt die Schüttung der Quelle Melick erst im September deutlich zu. Zur nachhaltigen Auffüllung des Porenraumes reichten die August- und Septemberriederschläge nicht aus, so daß die Quellen Melick und Willibrordusbour Ende November ihre alte Grundschüttung wieder erreicht haben.

Den unterirdischen Abfluß des Widdeberges in den hydrologischen Jahren 1968 und 1969 bringt die Abbildung 9. Der Grundwasserabfluß verzögert sich gegenüber niederschlagsreichen oder trockenen Perioden um 2 bis 3 Monate. Die hohe Grundwasserneubildung der Monate November und Dezember 1967 bringt eine rasche Auffüllung des Speicherraumes und dadurch bereits im Januar 1968 eine Erhöhung des unterirdischen Abflusses. Durch die geringe Neubildung im Winter 1968/69 werden für diesen Vorgang 3 Monate benötigt, so daß erst im März 1969 die Quellschüttungen ansteigen und ihr Maximum erst im April erreichen. Auf die Grundwasserneubildung der Monate August und September 1968 reagieren nur Quellen mit höherem Anteil an Kluftwasser wie die als Beispiel aufgetragene Quelle Beyren.

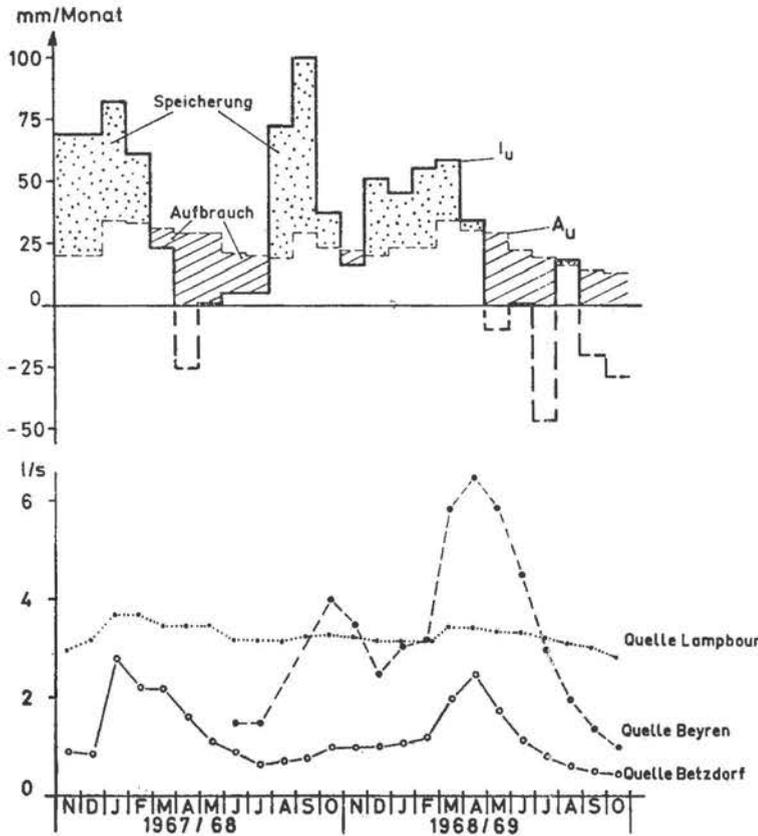


Abb. 9. Oben: Monatlicher unterirdischer Abfluß  $A_u$  an der «Luxemburger Sandstein-Insel» Widdeberg in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung  $I_u$ .

$E_o = E_u$ :  $1,6 \text{ km}^2$  (Negative Werte für  $I_u$  = Verdunstung aus der Bodenfeuchte)

Unten: Schüttungsgang von drei Quellen mit unterschiedlichem Anteil an Kluftwasser für die hydrolog. Jahre 1968 und 1969.

## B. III. Die Grundwasserneubildung

### III. 1. Allgemeines

Der Trink- und Brauchwasserbedarf Luxemburgs wird zur Zeit zu 90% aus dem Luxemburger Sandstein gedeckt (BINZ 1965). Zum überwiegenden Teil wird das Wasser durch Fassung von Quellen gewonnen. Bohrbrunnen sind nur in ganz geringer Zahl vorhanden. Mit der Inbetriebnahme des Trinkwasserstausees Esch/Sauer Ende 1969 ist der vorauszusehende Mehrverbrauch für die kommenden Jahre gedeckt. Es ist jedoch zu erwarten, daß bereits in den Jahren 1975-1980 durch den weiter steigenden Wasserverbrauch in Industrie, Landwirtschaft und Haushalt ein neuer Engpaß in der Wasserversorgung des Landes entstehen wird. Die Erschließung neuer Wasservorräte aus dem Luxemburger Sandstein durch Tiefbohrungen ist deshalb für die Zukunft ins Auge gefaßt worden (BINZ 1965). Die Bestimmung der Grundwasserneubildung und ihrer Faktoren ist unter diesen Gesichtspunkten ein wichtiger Teil dieser Arbeit.

### III. 2. Faktoren der Grundwasserneubildung

#### 2. 1. Das Niederschlagsdargebot

Von Westen und Nordwesten über Belgien und Nordfrankreich einströmende Luftmassen bringen Luxemburg den Großteil seines Niederschlags. Die Verteilung der Niederschläge innerhalb des Landes zeigt eine generelle Abhängigkeit von der Seehöhe, wobei mit der Höhe die Niederschlagssummen zunehmen. Die Talbereiche von Mosel, Sauer und Alzette erhalten die geringsten Niederschläge.

Kontinuierliche Niederschlagsmessungen werden in Luxemburg seit 1949 durchgeführt. Gemäß internationaler Vereinbarung erfolgen die Messungen täglich um 7<sup>00</sup> Uhr Ortszeit; als Meßgeräte sind Hellmann-Regenmesser mit 200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche in Gebrauch. Im Arbeitsgebiet, im Osten Luxemburgs, standen Niederschlagsmessungen von drei amtlichen Stationen zur Verfügung. Um die Genauigkeit der Niederschlagsbestimmungen zu erhöhen, wurden im Herbst 1967 die Station Widdeberg und im Sommer 1968 die Station Berdorf eingerichtet.

Im langjährigen Mittel (hydrol. Jahre 1950-1969) fallen in Ostluxemburg 750-850 mm Niederschlag im hydrologischen Jahr (s. Abb. 10). Dabei liegen die Niederschläge der Sommerhalbjahre etwas höher als die der Winterhalbjahre. Für die Grundwasserneubildung wäre das umgekehrte Verhältnis günstiger, zumal in den Einzeljahren die Unterschiede beträchtlich sein können. Zum Beispiel fielen im hydrologischen Jahr 1968 im Sommerhalbjahr 100-150 mm mehr Niederschlag als im Winterhalbjahr. Für die hydrologischen Untersuchungen war es ein günstiger Zufall, daß das Jahr 1968 mit 930-990 mm Jahresniederschlag ein Naßjahr war, während 1969 mit rund 600 Millimeter zu einem Trockenjahr wurde.

Die Aufteilung der Einzugsgebiete in Niederschlagsteilgebiete erfolgte nach Isohyeten (s. Abb. 10 und Tabelle 5). Die Niederschlagsgleichen wurden dabei der Morphologie des Geländes angepaßt. Wie sich bei der Aufstellung der Wasserbilanzen zeigte, erwies sich diese Gliederung als vorteilhaft, obwohl die allgemeine Abhängigkeit der Niederschlagshöhen von der Seehöhe im Arbeitsgebiet offensichtlich nicht gegeben ist.

Für das Einzugsgebiet des Aesbaches erschien es sinnvoller, keine Höhengliederung vorzunehmen, sondern die Niederschlagsmessungen der Station Berdorf zu Grunde zu legen. Die gleiche Überlegung galt auch beim Widdeberg in bezug auf die Station Findel.

## 2. 2. Verdunstung

### *Aktuelle Verdunstung*

In Luxemburg wurden bisher noch keine Werte für die aktuelle Verdunstung bestimmt. Lysimeteranlagen sind nicht vorhanden. Aus langfristigen Abflußregistrierungen kann nach der Gleichung

$$N = A + V$$

die aktuelle Verdunstung für ein bestimmtes Einzugsgebiet errechnet werden.

Der Abfluß der Schwarzen Ernz wird schon seit längeren Jahren mittels täglicher Lattenpegelablesungen erfaßt. Für die hydrologischen Jahre 1960-1969 errechnet sich nach obiger Gleichung für das Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz eine mittlere aktuelle Verdunstung von 453 mm/Jahr. Da sich dieser aus Pegelmessungen ermittelte Wert nur schlecht auf andere Einzugsgebiete übertragen läßt, wird im folgenden versucht die Verdunstung aus anderen Daten zu bestimmen.

### *Potentielle Verdunstung*

Nach den bekannten Formeln von ALBRECHT, HAUDE, PENMAN und THORNTHWAITE läßt sich aus meteorologischen Daten die potentielle Verdunstung errechnen. UHLIG (1954) fand, daß alle diese Berechnungsverfahren zu ähnlichen Resultaten führen. DAMMANN (1965) konnte zeigen, daß sich die HAUDE-Formel im mitteleuropäischen Klimabereich sehr gut bewährt. Deshalb wurde das Verfahren von HAUDE (1954 und 1963) auch im Untersuchungsgebiet zur Ermittlung der potentiellen Verdunstung herangezogen. Es bietet den Vorteil, daß die Verdunstung für jeden beliebigen Zeitraum also auch für Tage, Wochen und Monate bestimmt werden kann.

Bei der auf diese Weise berechneten Verdunstung muß aber vorausgesetzt werden, daß der Boden ständig genügend Wasser für die Evapotranspiration enthält. (Diese potentielle Verdunstung ist der Verdunstung einer Grasfläche mit hohem Grundwasserstand angepaßt.) In Naßjahren ist in unserem Klima kein wesentlicher Unterschied zwischen aktueller und potentieller Verdunstung zu erwarten. In Trockenjahren liegt die potentielle Verdunstung wesentlich höher als die aktuelle. In diesem Fall muß die potentielle Verdunstung korrigiert werden (s. S. 37).

Nach HAUDE (1954 und 1963) wird die tägliche potentielle Verdunstung aus der relativen Luftfeuchtigkeit um 14<sup>00</sup> Uhr und der Lufttemperatur um 14<sup>00</sup> Uhr nach folgender Formel berechnet:

$$V_p = f \cdot d_{14}$$

wobei  $d_{14}$  = tägliches Sättigungsdefizit um 14<sup>00</sup> Uhr bestimmt aus relativer Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

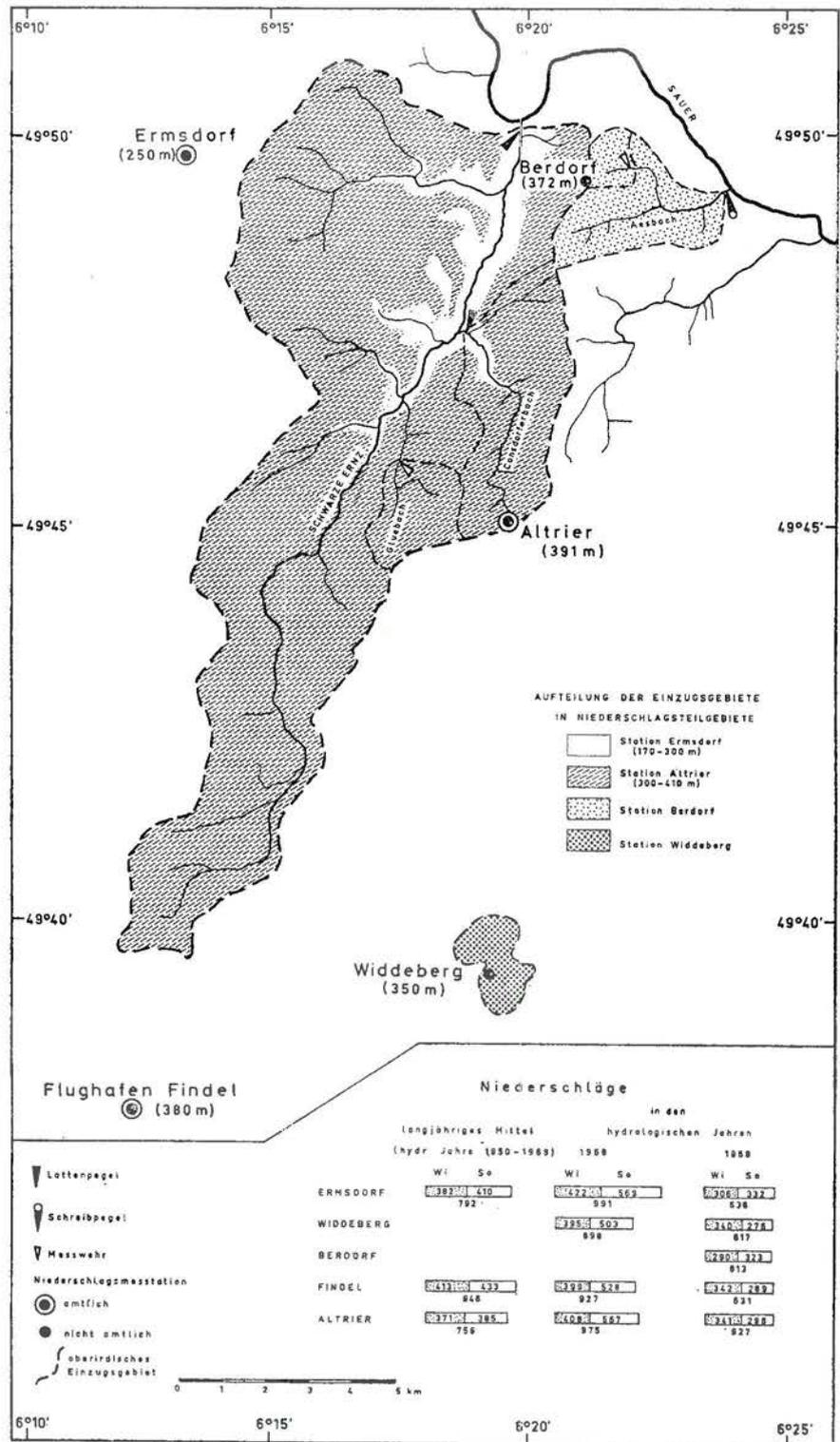


Abb. 10. Niederschlagsmeßstationen, Niederschlagsteilgebiete, Jahres- und Halbjahreswerte für die Niederschläge sowie Haupt- und Teileinzugsgebiete im Osten Luxemburgs.

f = Proportionalitätsfaktor, abhängig von der Jahreszeit

	März	April - Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt. - Febr.
f	0,33	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31	0,26

In der weiteren Umgebung des Untersuchungsgebietes wird die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit von folgenden luxemburgischen Stationen täglich gemessen: Echternach, Ettelbruck, Flughafen Findel. Auf der deutschen Seite liegt dem Arbeitsgebiet die Station Halsdorf am nächsten.

Die Station Echternach wurde nicht zur Verdunstungsberechnung herangezogen, da sich herausstellte, daß für sie ein lokales Kleinklima gilt, das nicht auf die klimatischen Verhältnisse im Arbeitsgebiet übertragbar ist. Für die restlichen Stationen wurde die potentielle Verdunstung für die letzten 10 Jahre ermittelt. Dazu mußten rund 11 000 Tageswerte nach obiger Formel berechnet und zu Monats-, Halbjahres- und Jahreswerten aufaddiert werden (s. Tabelle 3). Die luxemburgischen Stationen führen die Luftfeuchtigkeits- und Temperaturmessungen um 13<sup>00</sup> Uhr durch und nicht um 14<sup>00</sup> Uhr wie in der HAUDE-Formel gefordert. Die dadurch entstehenden Ungenauigkeiten konnten bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß die entstandenen Fehler nur klein sind.

Das Sättigungsdefizit der Luft wird bei Abkühlung geringer, folglich nimmt auch die Verdunstung ab. Die mittlere Temperaturverteilung im Laufe des Jahres wird nun in erster Linie von der Abnahme der Temperatur mit zunehmender Höhe bestimmt. Die daraus resultierende Abnahme der Verdunstung mit zunehmender Höhenlage der Stationen ist aus Tabelle 3 deutlich zu ersehen.

Um die Verdunstungswerte der Einzelstationen auf die verschiedenen Einzugsgebiete übertragen zu können, sind die Einzugsgebiete nach folgender Höhengliederung aufgeteilt: 175-250 m, 250-300 m, über 300 m ü.NN. Für die ermittelten Flächenanteile sind die Verdunstungswerte der entsprechenden Stationen eingesetzt wie in Abbildung 11 und Tabelle 5 aufgeführt.

Wie bereits weiter oben erwähnt, kann die potentielle Verdunstung nur dann der aktuellen entsprechen, wenn im Boden stets genügend Feuchtigkeit zur Evapotranspiration vorhanden ist. In Trockenjahren und während einer Reihe niederschlagsarmer Monate kann aber der Fall eintreten, daß alles verfügbare Bodenwasser von der Verdunstung verbraucht wird und keine nennenswerte Verdunstung mehr erfolgt. In diesem Fall muß die potentielle Verdunstung korrigiert werden.

Da zu diesem Problem keine eigenen speziellen Untersuchungen angestellt werden konnten, geschieht die Korrektur der potentiellen Verdunstung in enger Anlehnung an das von EINSELE (1969) angewandte Verfahren. Wie im Luxemburger Sandstein so werden auch im saarländischen Buntsandstein, dem Untersuchungsgebiet von EINSELE, große Flächen der Einzugsgebiete von Lockersanden bedeckt. Für die saarländischen Sandböden ermittelte EINSELE eine maximal ausschöpfbare Bodenfeuchte (nach UHLIG, 1956) von rund 150 mm. Da eigene Bestimmungen des Porenvolumens und Wassergehaltsbestimmungen der Sandböden des Luxemburger Sandsteins fehlen, wird dieser Wert übernommen.

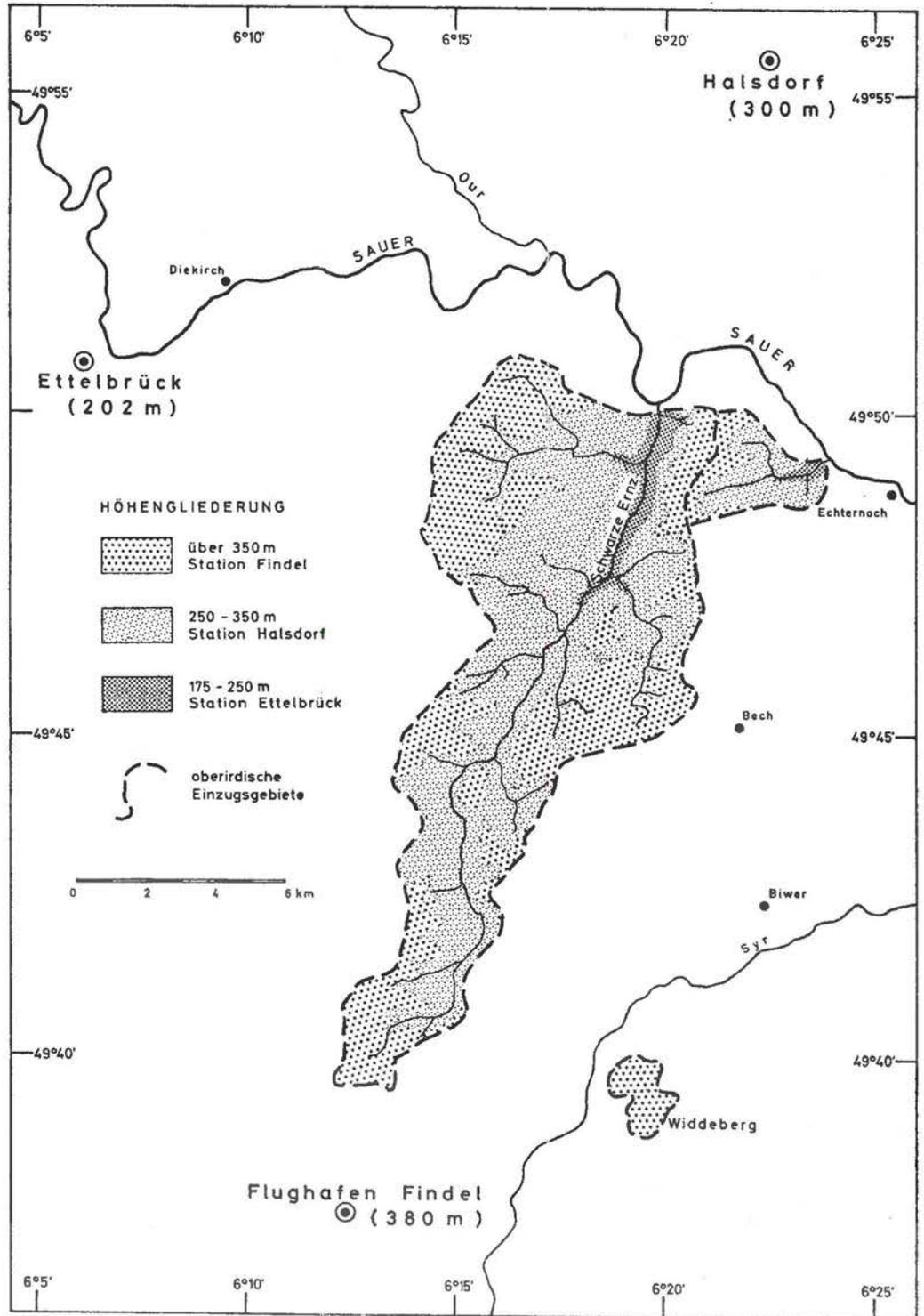


Abb. 11. Meteorologische Stationen zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung nach HAUDE, Höhengliederung der Einzugsgebiete zur Bestimmung ihrer jeweiligen potentiellen Verdunstung sowie Haupt- und Teil-einzugsgebiete im Osten Luxemburgs.

hydrol. Jahr	Ettelbrück, 202 m ü.NN				Halsdorf, 300 m ü.NN				Findel, 380 m ü.NN			
	Vp	Vpk		Jahr	Vp	Vpk		Jahr	Vp	Vpk		Jahr
	Jahr	Wi	So		Jahr	Wi	So		Jahr	Wi	So	
1960	501	131	371	501	488	133	355	488	399	95	304	399
1961	565	144	420	565	442	109	333	442	369	72	297	369
1962	530	110	420	530	528	116	412	528	421	85	336	421
1963	466	105	361	466	519	120	399	519	496	90	406	496
1964	696	127	347	474	678	115	178	293	510	82	346	428
1965	540	140	400	540	356	90	256	356	335	77	258	335
1966	668	144	524	668	440	93	347	440	465	83	382	465
1967	718	155	563	718	520	115	405	520	461	90	371	461
1968	666	209	457	666	464	155	309	464	402	116	286	402
1969	753 <sub>ke</sub>	153	481	634	530	108	422	530	444	81	363	444
Mittel	610	142	434	576	497	115	382	458	430	87	335	422

Tabelle 3: Jahres- und Halbjahreswerte der potentiellen Verdunstung nach HAUDE  
Vp = unkorrigiert, Vpk = korrigiert  
(bei einer maximal ausschöpfbaren Bodenfeuchte von 150 mm)  
alle Werte in mm.

Wenn die monatlichen Niederschläge gegenüber der potentiellen Verdunstung ein Defizit aufweisen, so kann dieses solange aus der nutzbaren Bodenfeuchte gedeckt werden, bis der in den Wintermonaten aufgefüllte Bodenwasservorrat verbraucht ist. Erst wenn die summierten Niederschlagsdefizite und -überschüsse der aufeinander folgenden Sommermonate unter den Betrag von 150 mm sinken, bleibt die tatsächliche Verdunstung - die korrigierte potentielle Verdunstung Vpk - hinter der potentiellen Verdunstung zurück. Diese Situation war innerhalb der letzten zehn Jahre in den Jahren 1964 und 1969 gegeben. (s. Tabelle 3) Mit Hilfe des oben erwähnten Wertes für die maximal ausschöpfbare Bodenfeuchte wurde nach dem Verfahren von EINSELE (1969) die Korrektur der potentiellen Verdunstung durchgeführt.

Als Beispiel: Station Findel, hydrol. Jahr 1964

Monat	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
N	149,3	4,0	35,5	29,2	48,2	37,6	27,9	28,0	13,9	90,4	82,1	86,8
Vp	8,8	2,5	3,3	7,6	16,6	43,4	86,3	94,7	114,8	73,1	45,6	13,3
N-Vp	140,5	1,5	32,2	21,6	31,6	-5,8	-58,4	-66,7	-100,9	17,3	36,5	73,5

Niederschlagsdefizit April-Juli — 231,8 mm  
max. ausschöpfbare Bodenfeuchte 150,0 mm

von jährlich Vp abziehen — 81,8 mm  
jährlich Vp 510,0 mm

korrigierte pot. Verdunstung Vpk 428,2 mm

### III. 3. Werte zur Grundwasserneubildung

#### 3. 1. Berechnung der Grundwasserneubildung

Bei den Berechnungen zur Grundwasserneubildung zeigte es sich sehr bald, daß der unterirdische Abfluß mit erheblichen Verzögerungen auf Niederschlagsperioden mit hohem Versickerungsangebot reagiert (s. Abschnitt II. 4.). Bei langjährigen hydrologischen Ermittlungen gleichen sich derartige Vorgänge aus. In dieser Hinsicht war es ein spürbarer Mangel, daß in Luxemburg bisher nach hydrogeologischen Gesichtspunkten keine langjährigen Abflußbeobachtungen, Quellmessungen oder Grundwasserspiegelbeobachtungen angestellt wurden.

Ein Glücksfall war es, daß im Untersuchungsgebiet, dem Einzugsgebiet der Schwarzen Ern, in den hydrologischen Jahren 1968 und 1969 Niederschlags- und Verdunstungsbedingungen herrschten, die dem langjährigen Mittel nahezu gleichkommen. Die für diese Jahre gefundenen Werte der Grundwasserneubildung für die einzelnen Einzugsgebiete dürften also den langjährigen Mittelwerten entsprechen. Sie sind jedoch nicht für Einzeljahre gültig, denn trotz gleicher Niederschlags- und Verdunstungssummen kann es zu ganz unterschiedlichen Versickerungsbeträgen kommen, je nachdem ob das Vorjahr sehr naß oder sehr trocken war. Die Aufnahmefähigkeit der Deckschichten und des tieferen Untergrundes ist dann je nachdem besser oder schlechter.

Die allgemeine Wasserbilanzgleichung

$$N = V + A \quad (1)$$

läßt sich zur Berechnung der Grundwasserneubildung nur in wenigen Fällen anwenden, da sie nur für lange Zeiträume gültig ist, aber zumeist nur kurze Beobachtungszeiten zur Verfügung stehen.

Der Grundwasserträger fungiert als großer Speicher, der große Wassermengen aufzunehmen vermag, aber nur kleine Mengen, zudem mit großer Verzögerung, wieder abgibt (s. Abschnitt II. 4.). Diese Speicher- und Aufbrauchsvorgänge müssen bei der Berechnung der Grundwasserneubildung über kurze Zeiträume berücksichtigt werden. Die Vorratsänderung = Speicherung - Aufbrauch soll gemäß DIN 4049 als S bezeichnet werden.

Gliedert man Gleichung (1) wie folgt auf:

$$\begin{aligned} \text{Abfluß} \quad A &= A_o + A_u = \text{oberirdischer} + \text{unterirdischer Abfluß} \\ \text{Verdunstung} \quad V &= V_o + V_u = \text{Verdunstungsanteil aus Niederschlag und Boden-} \\ &\quad \text{wasser} + \text{Abgabe von Grundwasser aus dem tieferen Untergrund an die Verdunstung} \\ \text{Vorratsänderung} \quad S &= S_o + S_u = \text{Vorratsänderung im durchwurzelten Boden} + \text{Vorratsänderung im tieferen Untergrund} \end{aligned}$$

so erhält man:

$$N = V_o + V_u + A_o + A_u + S_o + S_u \quad (2)$$

Setzt man die Vorratsänderung im tieferen Untergrund

$$S_u = I_u - A_u - V_u \quad \text{wobei } I_u = \text{Infiltration in den tieferen Untergrund für eine bestimmte Zeitspanne,}$$

so wird aus Gleichung (2):

$$\begin{aligned} N &= V_o + V_u + A_o + A_u + S_o + I_u - A_u - V_u && \text{oder} \\ N &= V_o + A_o + S_o + I_u && (3) \end{aligned}$$

$V_o$  und  $S_o$  sind für große Flächen schwer bestimmbar. Wenn man aber berücksichtigt, daß der Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet überwiegend weit unter dem Wurzelbereich der Pflanzen liegt, und daß der sandige Untergrund nur einen geringen kapillaren Wasseraufstieg zuläßt, so kann der Verdunstungsanteil  $V_u$  vernachlässigt werden. Dann wird  $V_o = V$  bzw.  $V_p$ , wenn man anstelle der zumeist nicht bestimmbareren aktuellen Verdunstung  $V$  die aus meteorologischen Daten errechenbare potentielle Verdunstung  $V_p$  setzt. Wenn man weiterhin annimmt, daß der Wassergehalt des durchwurzelteten Bodens zu Beginn und zu Ende des hydrologischen Jahres etwa gleich ist, wird  $S_o = 0$  und die Gleichung (3) vereinfacht sich zu

$$N = V_p + A_o + I_u \quad (4)$$

oder die Grundwasserneubildung

$$I_u = N - V_p - A_o \quad (5)$$

Für die Ermittlung der Grundwasserneubildung aller Haupt- und Teileinzugsgebiete wurde in dieser Arbeit die Gleichung (5) benutzt. Die Abtrennung des oberirdischen Abflusses  $A_o$  vom unterirdischen Abfluß  $A_u$  erfolgte dabei nach NATERMANN (1951). (s. auch Abschnitt II. 3.)

### 3. 2. Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz

Die ermittelten Werte zur Grundwasserneubildung dieses Einzugsgebietes sind in Tabelle 2 zusammengestellt (s. auch Abb. 7). Das langjährige Mittel der Grundwasserneubildung beträgt  $225 \text{ mm} = 7,1 \text{ l/s.km}^2$  bei einer mittleren Niederschlagshöhe von  $792 \text{ mm}$ .

In den Einzeljahren zeigt sich eine Abhängigkeit der Neubildung vom Niederschlagsangebot. Geringe Neubildung von Grundwasser erfolgte in den Trockenjahren 1962-64 und 1969. In diesen Jahren kam es deshalb zu einem Aufbrauch der Grundwasservorräte, während in den Naßjahren 1965-68 eine kräftige Speicherung möglich war. Im hydrologischen Jahr 1965 lag die Neubildung deutlich höher als 1966, obwohl 1966 mehr Niederschlag zur Verfügung stand. Offensichtlich können Deckschichten und tieferer Untergrund nach Trockenjahren größere Mengen an Sickerwasser aufnehmen als nach Naßjahren (HETTEL 1968).

Das, in Tabelle 2 eingetragene, in Fremdräume abgeführte Grundwasser  $G_a$  wird aus zwei Quellfassungen am Oberlauf der Schwarzen Ernz in den Osten Luxemburgs abgeleitet. Anfang der 60er Jahre wurde noch nicht die volle Schüttung der Quellen zur Versorgung benötigt. Durch den steigenden Wasserverbrauch wurde jedoch in den letzten Jahren das gesamte Schüttungsvolumen der Quellen genutzt. Mit  $8,7 \text{ mm}$  Grundwasserförderung wurden dem Einzugsgebiet 1969 rund 4% seiner mittleren Grundwasserneubildung entzogen.

Der Verlauf der Grundwassergleichen im Einzugsgebiet ist unbekannt, deshalb ist es nicht möglich die Größe des unterirdischen Einzugsgebietes nach ihrem Verlauf zu begrenzen. Nun kann aber

in Gebieten mit langjährigen Abflußmessungen (damit Speicher- und Aufbrauchvorgänge sich ausgleichen) der unterirdische Abfluß  $Au$  der Grundwasserneubildung  $Iu$  gleich gesetzt werden. Da für die Schwarze Ern  $Iu$  aus Niederschlag, korrigierter potentieller Verdunstung und oberirdischem Abfluß berechnet wurde, wozu lediglich das oberirdische Einzugsgebiet bekannt sein mußte, kann die Größe des unterirdischen Einzugsgebietes  $Eu$  bestimmt werden nach:

$$Eu \text{ (in km}^2\text{)} = \frac{Au \text{ langj. (in l/s)}}{Iu \text{ langj. (in l/s.km}^2\text{)}}$$

Da Grundwasser im Gebiet gefördert und in Fremdräume abgeleitet wird, erweitert sich  $Au$  zu:  $Au + Ga$ .

Auf diese Weise bestimmt sich das unterirdische Einzugsgebiet der Schwarzen Ern zu  $80 \text{ km}^2$  im Gegensatz zum oberirdischen von  $103 \text{ km}^2$ . Unsicherheiten bei dieser Art der Berechnung bestehen in der Ermittlung der Größe  $Iu$ . Da die Grundwasserneubildung  $Iu$  nach

$$Iu = N - Vpk - Ao$$

berechnet wurde, muß vorausgesetzt werden, daß  $Vpk$  richtig errechnet werden konnte. Die Abtrennung von  $Ao$  aus dem Gesamtabfluß nach NATERMANN dürfte kaum wesentliche Fehler eingebracht haben (s. auch Abschnitt II. 3.).

Das aus der Grundwasserneubildung erhaltene Ergebnis, daß das unterirdische Einzugsgebiet der Schwarzen Ern um 20% kleiner als das oberirdische anzusetzen ist, läßt sich nun anhand hydrographischer Überlegungen erhärten. An ihrem Oberlauf wird die Schwarze Ern stark von den Nachbarflüssen Syr und Weißer Ern bedrängt (s. Abb. 11). Die Syr hat ihr Einzugsgebiet bereits bis auf einen halben Kilometer von Süden an die Schwarze Ern herangeschoben. Von Norden drängt die Weiße Ern in das Einzugsgebiet des Oberlaufes der Schwarzen Ern vor. Ein Übertritt von Grundwasser zur Syr ist nicht anzunehmen, da hier die Syrzuflüsse sowie die Schwarze Ern in Keupermergeln fließen. Sehr wahrscheinlich ist jedoch, daß die unterirdische Wasserscheide zwischen Weißer Ern und Schwarzer Ern im klüftigen Luxemburger Sandstein zur Schwarzen Ern hin verlagert ist. Zumal das Schichtfallen in diesem Gebiet mit generell NW-Richtung auf die Weiße Ern zuläuft. Ein Großteil an unterirdischem Abfluß aus dem Einzugsgebiet der Schwarzen Ern wird also der Weißen Ern zustreben.

### 3. 3. Vergleich langjähriger Werte verschiedener Einzugsgebiete

In Tabelle 4 sind langjährige Werte der Grundwasserneubildung verschiedener Einzugsgebiete gegenübergestellt. (Die Werte von Syr und Aalbach wurden mir freundlicherweise von Herrn NEUMANN zur Verfügung gestellt.)

Am Aufbau des Einzugsgebietes der Syr ist der Luxemburger Sandstein mit 24% beteiligt, am Aalbach mit 20%. Den Rest der Einzugsgebiete bilden Keupermergel, bei der Syr zusammen mit einem kleinen Anteil Muschelkalk (Näheres hierzu s. NEUMANN 1971).

Der Flächenanteil an Luxemburger Sandstein ohne Überdeckung am Einzugsgebiet der Schwarzen Ern beträgt 53%, der Rest setzt sich zusammen aus 21% Keuper und 26% von Mergel überdecktem Sandstein (s. auch Tabelle 5). Dieser hohe Anteil an für Sickerwässer schlecht durch-

lässigen Deckschichten bewirkt die relativ niedrige Grundwasserneubildung im Bereich der Schwarzen Ernz. Sie liegt jedoch deutlich höher als die Neubildung der beiden anderen Einzugsgebiete, an deren Deckschichtenaufbau Lockersande in noch geringerem Maße beteiligt sind.

Wie Abbildung 7 zeigt, reagiert der unterirdische Abfluß der Schwarzen Ernz mit einjähriger Verzögerung auf Trocken- bzw. Naßjahre. Ein gleichartiges Verhalten beschreibt NEUMANN (1971) auch für Syr und Aalbach. Aus den Einzugsgebieten von Syr und Aalbach kann in einem Trockenjahr mehr Grundwasser abfließen als in einem Naßjahr eingelagert wird. Die Keupermergel und die Dolomite des Oberen Muschelkalkes vermögen im wesentlichen nur im Kluft-raum zu speichern. Die schlechte Speicherfähigkeit des tieferen Untergrundes in den Einzugsgebieten von Syr und Aalbach sind daher verständlich. Bei der Schwarzen Ernz kann der maximale Aufbrauch in einem Trockenjahr gleich der maximalen Speicherung eines Naßjahres sein. Die geringe Vorratsbildung im Einzugsgebiet der Schwarzen Ernz dürfte einesteils am Anteil an Keupermergeln liegen, zum anderen aber an der Überdeckung des Sandsteins durch die «Kalke und Mergel von Strassen». Da diese Mergel eine tiefgreifende Verwitterung des Sandsteins verhindern, kann kein Porenraum in großem Ausmaß entstehen und als Speicherraum steht allein der Kluftraum zur Verfügung. Die Beziehung: Überdeckung des Sandsteins durch li3-Mergel = fehlender Porenraum als Speichermöglichkeit = geringe Speicherkraft des Untergrundes wird besser erkennbar aus den im folgenden besprochenen Werten für die Grundwasserneubildung der Jahre 1968 und 1969.

Einzugsgebiet	mittlerer Jahres- nieder- schlag N mm	mittlere jährliche Vpk mm	mittlere jährliche Grundwasser- neubildung		Jährliche Maximalwerte für	
			mm	Iu	Speicherung Su + mm	Aufbrauch Su — mm
				l/s.km <sup>2</sup>		
Schwarze Ernz	792	454	225	7,1	226	225
Syr	803	492	166	5,2	139	190
Aalbach	821	528	203	6,4	149	206

(Zeitraum: hydrol. Jahre 1960-1969)

1 mm/Jahr = 0,0317 l/s . km<sup>2</sup>

Tabelle 4: Zusammenstellung langjähriger Werte für die Grundwasserneubildung Iu und für die maximale jährliche Speicherung Su (bzw. Aufbrauch)

### 3. 4. Vergleich der Grundwasserneubildung und Grundwasserspeicherung verschiedener Einzugsgebiete in den hydrologischen Jahren 1968 und 1969

Östlich Mensdorf liegt über wasserstauenden Pylonotenschichten und Keupermergeln ein isoliertes Vorkommen von Luxemburger Sandstein, der Widdeberg. (s. Abb. 4) An dieser 1,6 Quadratkilometer großen Sandsteininsel bot sich die günstige Gelegenheit während der Jahre 1968 und 1969 den Ablauf der Grundwasserneubildung zu erfassen. Langjährige Beobachtungen existieren für dieses Gebiet leider nicht.

Am Widdeberg kommt nie ein oberirdischer Abfluß zustande. Auch extreme Niederschlagsmengen vermögen die Lockersande vollständig aufzunehmen. Die Gleichung zur Berechnung der Grundwasserneubildung

$$I_u = N - V_{pk} - A_o \quad (5)$$

vereinfacht sich deshalb zu

$$I_u = N - V_{pk}$$

Da der Niederschlag mit einer am Widdeberg errichteten Niederschlagsmeßstation sehr genau ermittelt werden konnte, bleibt als einziger, mit einer gewissen Unsicherheit behafteter Faktor nur  $V_{pk}$  übrig.

In Abbildung 9 ist der Verlauf der Grundwasserneubildung für 1968 und 1969 dargestellt. Kräftige Grundwasserneubildung brachten 1968 die Wintermonate November bis Februar. Der November des hydrologischen Jahres 1969 brachte dagegen wenig Niederschlag, dafür kam noch im März 1969 Neubildung zustande. Wie bereits in Abschnitt III. 2. 1. festgestellt wurde, überwiegen in Ostluxemburg die Sommerniederschläge die der Wintermonate. Trotz der höheren Verdunstung in den Sommermonaten ist eine ganz beträchtliche Auffüllung des Grundwasservorrates möglich, wie sich das in den Monaten August und September 1968 zeigt. Daß im Sommer 1969 derartige Niederschläge fehlen, bewirkt einen starken Eingriff in die Grundwasservorräte. Da die potentielle Verdunstung während mehrerer Monate den Niederschlag übersteigt, errechnet sich für die Größe  $I_u$  ein negativer Wert (s. Abb. 9). In dieser Zeit wird die Verdunstung aus der Bodenfeuchte gespeist (s. auch Abschnitt III. 2. 2.).

Sämtliche zur Grundwasserneubildung der Jahre 1968 und 1969 ermittelten Werte sind in Tabelle 5 enthalten. Zu dieser Zusammenstellung sind einige Erläuterungen zu geben:

Angaben zu Vegetation und geologischen Schichten sind in dieser Tabelle links aufgeführt, ebenso die Höhengliederung zur Bestimmung von  $V_p$  (vgl. dazu Abschnitt III. 2.2.)

Näheres zur Ermittlung des Niederschlages siehe Abschnitt III. 2.1.

Zur Berechnung des unterirdischen Einzugsgebietes der Schwarzen Ernz wird auf Seite 42 Stellung genommen.

Da sich für die Schwarze Ernz, nach Vergleich der langjährigen Mittelwerte für  $N$ ,  $V_{pk}$ ,  $A_o$  und  $A_u$  mit den Werten für 1968/69, ergab, daß das Mittel aus den Werten für 1968/69 dem langjährigen Mittel entspricht, wurde angenommen, daß die gleichen Verhältnisse auch für den Consdorferbach und den Aesbach gelten. Unter dieser Annahme wurde  $I_u_{68/69} = A_u_{68/69}$  gesetzt und versucht, daraus die unterirdischen Einzugsgebiete zu berechnen. Selbstverständlich müssen die auf diese Weise ermittelten Zahlen mit großer Vorsicht behandelt werden.

Die Abflußmessungen am Widdeberg erfolgten nur einmal wöchentlich. Da der Abfluß am Widdeberg nur über Quellen erfolgt, erbrachte auch dieser relativ große Beobachtungsintervall einwandfreie Werte.

Unter der Spalte für den unterirdischen Abfluß ist der Größe  $A_u$  noch  $G_a$  hinzugefügt. Nur aus den Einzugsgebieten der Schwarzen Ernz und des Aesbach wird Grundwasser in Fremdräume abgeführt.  $G_a$  muß deshalb zu  $A_u$  addiert werden. In allen anderen Einzugsgebieten wird kein Grundwasser in Fremdgebiete abgeleitet, ebenso wird kein Grundwasser aus Fremdräumen zugeleitet.

Für den Gluebach liegen Abflußmessungen nur für das Jahr 1969 vor. Sein unterirdisches Einzugsgebiet ist nicht bekannt. Der größte Teil des unterirdischen Abflusses tritt dem tieferen Stockwerk zu und fließt in der Schwarzen Ernz aus.

Wie bereits einleitend erwähnt, entsprachen die klimatischen Verhältnisse der hydrologischen Jahre 1968 und 1969 dem langjährigen Mittel. Das gestattet es, die für diese beiden Jahre ge-

Fluß- bzw. Bachname	Flächenanteil am oberirdischen Einzugsgebiet in %								Einzugsgebiet in km²		N-Meßstelle bzw. Höhestufen (Anteile in %)	Abflußmessung		hydrologisches Jahr 1967/68 (alle Werte in mm/Jahr)						hydrologisches Jahr 1968/69 (alle Werte in mm/Jahr)					
	Höhenstufen in m ü.NN zur Bestimmung von Vp			forstwirtschaftlich genutzt	landwirtschaftlich genutzt	km³ bis li1	li2	li3						Eo	Eu	Meßgerät	Beobachtungsintervall	N	Vpk	Ao	Au + Ga	Iu	Su	N	Vpk
	175 bis 250	250 bis 350	über 350																						
Schwarze Ernz	5	40	55	36	64	21	53	26	103	80	175-300m ü.NN = 12% = Er. 300-410m ü.NN = 88% = Al.	L	tgl.	976	438	157	230	381	150	626	495	80	220	51	- 169
Aesbach	3	75	22	37	63	1	50	49	7,6	7,2	Al. + Be.	S	ko	944	465	67	232	412	180	613	520	30	246	63	- 183
Consdorferbach	2	53	45	37	63	2	67	31	12,4	9	Al.	L	tgl.	975	439	57	265	479	214	627	496	39	280	92	- 188
Gluebach	0	11	89	61	39	0	100	0	3,8	?	Al.	W	tgl.	—	—	—	—	—	—	627	453	7	?	167	?
Widdeberg	0	0	100	100	0	0	100	0	1,6	1,6	Wi. + Fi.	W	wö.	898	401	0	309	497	188	617	444	0	266	173	- 93

(1 mm/Jahr = 0,0317 l/s · km²)

Tabelle 5:

Charakterisierung der Einzugsgebiete (Höhenstufen, forst- und landwirtschaftlich genutzter Anteil, geologischer Untergrund) und Jahreswerte 1968 und 1969 für die Grundwasserneubildung

Abkürzungen: Er. = Station Ermsdorf  
Al. = Station Altrier  
Be. = Station Berdorf  
Wi. = Station Widdeberg  
Fi. = Station Findel  
S = Schreibpegel  
L = Lattenpegel  
W = Meßwehr  
ko = kontinuierlich  
tgl. = täglich  
wö. = wöchentlich

fundenen Werte der Grundwasserneubildung, natürlich mit gegebener Vorsicht, für langjährige Berechnungen zu verwenden.

Wie zu erwarten, liegt die Grundwasserneubildung bei allen Einzugsgebieten im Trockenjahr 1969 wesentlich unter der des Jahres 1968. Weiterhin fällt aber auf, daß die Neubildung von Grundwasser von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet starken Schwankungen unterliegt.

Ganz unverkennbar ist die Grundwasserneubildung abhängig vom Anteil der Mergel am Einzugsgebiet. Mit dem höchsten Mergelanteil hat die Schwarze Ernz auch die geringste Neubildung bei gleichzeitig höchstem oberirdischem Abfluß. Mit geringer werdendem Anteil der Mergel in der Reihe Aesbach - Consdorferbach - (Gluebach) - Widdeberg geht der oberirdische Abfluß auf Null zurück, und die Grundwasserneubildung steigt kräftig an.

Um diese Abhängigkeit noch deutlicher zu machen, sind in Tabelle 6 zusätzlich zu den bekannten Einzugsgebieten noch zwei Einzugsgebiete aufgenommen mit jeweils rund 80% Mergelanteil am oberirdischen Einzugsgebiet. Die geringste Neubildung an Grundwasser weisen die Einzugsgebiete mit hohem Mergelanteil auf, also Syr und Aalbach. Die Speicherfähigkeit der Dolomite und Mergel in den Gebieten von Syr und Aalbach ist schlecht. Im hydrologischen Jahr 1968 wurde wenig gespeichert und im Trockenjahr 1969 war der unterirdische Abfluß so hoch, daß über die 1968 eingespeicherten Vorräte hinaus auf ältere Vorräte zurückgegriffen werden mußte.

Die Speicherfähigkeit des Luxemburger Sandsteins ist dagegen weit besser. Allerdings wurde bei der Schwarzen Ernz und beim Aesbach 1969 ebensoviel Grundwasser abgeführt, wie 1968 gespeichert worden war. In beiden Einzugsgebieten ist der Sandstein aber auch weitflächig mit Mergeln überdeckt, so daß in großen Teilen des Grundwasserträgers lediglich der Kluftraum als Speicher fungieren kann. Mit abnehmender Mergelüberdeckung nimmt der Anteil des Porenraumes am Gesamtspeichervolumen zu. Dies bewirkt eine bessere Speicherkraft des Untergrundes. So war im Einzugsgebiet des Consdorferbaches (Mergelanteil 31%) und am Widdeberg (Mergelanteil 0%) 1969 der Grundwasseraufbrauch kleiner als die Speicherung im Jahre 1968.

Einzugsgebiet	hydrologisches Jahr 1967/68 (alle Werte in mm)				hydrologisches Jahr 1968/69 (alle Werte in mm)			
	N	Vpk	Iu	Su	N	Vpk	Iu	Su
Aalbach	949	540	294	+ 60	651	578	0	— 206
Syr	937	463	261	+ 59	614	531	0	— 160
Schwarze Ernz	976	438	381	+150	626	495	51	— 169
Aesbach	944	465	412	+180	613	520	63	— 183
Consdorferbach	975	439	479	+214	627	496	92	— 188
Widdeberg	898	401	497	+188	617	444	173	— 93

1 mm/Jahr = 0,0317 l/s . km<sup>2</sup>

Tabelle 6: Zusammenstellung der Werte für Grundwasserneubildung, Speicherung (Su+) und Aufbrauch (Su-) der hydrologischen Jahre 1968 und 1969 für verschiedene Einzugsgebiete  
(die Werte von Syr und Aalbach wurden freundlicherweise von Herrn NEUMANN zur Verfügung gestellt)

### III. 4. Praktische Folgerungen für die bestehende und zukünftige Grundwasserentnahme

Von wenigen Bohrbrunnen abgesehen, erfolgte die Grundwasserentnahme aus dem Luxemburger Sandstein bisher nur über Quellen. Damit hat man bis jetzt noch nicht in den Wasserhaushalt des Grundwasserträgers eingegriffen. Dem Gewässernetz wird lediglich ein gewisser Anteil an unterirdischem Abfluß durch Ableitung der Quellwässer entzogen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß in Gebieten, in denen der Luxemburger Sandstein nicht durch mergelige Schichten überdeckt ist, eine beachtliche Grundwasserneubildung geschieht. Aus den Speicher- und Aufbrauchvorgängen geht zudem hervor, daß das Wasser sehr viel leichter in den Grundwasserträger eintritt, als es aus ihm heraustreten kann. Aus diesem Grund weist der unterirdische Abfluß eine zeitliche Verzögerung zum Niederschlagsdargebot auf.

Auf diesen Vorgängen kann in bestimmten Gebieten eine erweiterte Grundwasserförderung aus Tiefbrunnen aufgebaut werden. Die nach diesen Gesichtspunkten ausgewählten Gebiete im Osten Luxemburgs sind in Abbildung 3 angegeben. Es handelt sich dabei um

den Oberlauf des Consdorferbaches  
den Oberlauf des Gluebaches  
und das Gebiet östlich des Lauterbornerbaches.

Zu einer wirtschaftlichen Grundwasserförderung muß das Kluftwasser aufgesucht werden. Der Porenraum des Sandsteins ist zwar ein ausgezeichneter Speicher, er läßt aber keine größere Förderung zu. Die Aufsuche derartiger für die Anlage von Tiefbrunnen und die Förderung von Grundwasser geeigneter Zonen ist Aufgabe spezieller hydrogeologischer Untersuchungen. Die vorliegende Arbeit kann lediglich einen Überblick über die Gesamtsituation geben.

In einer Aufstellung der Grundwasservorräte Luxemburgs nimmt BINTZ (1965) an, daß in dem, nicht durch die « Kalke und Mergel von Strassen » überdeckten Sandstein 25-30% des Niederschlags versickern und zu Grundwasser werden können. Diese Zahlen bedürfen nach den Ergebnissen dieser Arbeit einer gewissen Revision.

Eine Durchsicht der Tabelle 2 macht klar, daß dieser Prozentsatz für die Schwarze Ernз jährlich zwischen 4 und 50% schwanken kann, je nachdem ob Trocken- oder Naßjahre vorausgingen und je nach Höhe der Verdunstung. Außerdem ist dieser Prozentsatz, der ja nichts anderes als die Grundwasserneubildung darstellt, ganz besonders von Art und Aufbau der Einzugsgebiete und der Lage des Grundwasserspiegels abhängig. Man kann also ohne große Fehler einen verallgemeinernden Wert für die Grundwasserneubildung aller Einzugsgebiete im Luxemburger Sandstein nicht angeben.

Für das mittlere Niederschlagsdargebot über allen Sandsteingebieten des Landes nennt BINTZ (1965) 750 mm. Dieser Wert dürfte etwas zu niedrig angesetzt sein. Für das Einzugsgebiet der Schwarzen Ernз ergab sich ein mittlerer jährlicher Niederschlag von 790 mm (10jähriges Mittel). Im Westen Luxemburgs liegt der durchschnittliche jährliche Niederschlag noch höher, nämlich bei etwa 850 mm.

## C. HYDROCHEMISCHER TEIL

### C. I. Allgemeines

Der Chemismus der Grundwässer wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt (NÖRING 1951):

- chemische Beschaffenheit der Niederschläge
- Beschaffenheit der Bodenzone
- Petrographie des Grundwasserleiters und Verweildauer der Sickerwässer in diesem
- anthropogene Einflüsse
- physikalische Änderungen im grundwasserführenden Gestein, wie Grundwasserspiegelschwankungen u.s.w.

Auf alle Gesichtspunkte kann in dieser Arbeit nicht eingegangen werden, da spezielle Fragestellungen weitreichende Eigenuntersuchungen bedingt hätten.

Die Typisierung der Grundwässer erfolgt im wesentlichen anhand von Diagrammen. Daneben wird näher eingegangen auf die Beziehungen zwischen der petrographischen Beschaffenheit des Grundwasserleiters und dem Lösungsinhalt der Wässer. Anthropogene Einflüsse lassen sich deutlich aus einer Reihe von Analysen ableiten.

Die Wasserproben wurden zum überwiegenden Teil vom Verfasser selbst im Gelände entnommen. Analysiert wurden sie im Laboratoire des Eaux, Luxembourg. Bei der Auswahl der Entnahmepunkte der Proben wurde so weit als möglich darauf geachtet, sie über den gesamten Bereich des Luxemburger Sandsteins zu verteilen. Aus technischen Gründen ergab es sich jedoch, daß ein Großteil der analysierten Wässer aus den Einzugsgebieten der Eisch (Wassernutzungsgebiet des Syndicat des Eaux du Sud Koerich) und der Schwarzen Ernzen stammen.

Die Bestimmungen der freien Kohlensäure, des freien Sauerstoffes, des pH-Wertes, der Leitfähigkeit und der Temperatur wurden jeweils sofort bei der Probenentnahme im Gelände vorgenommen.

### C. II. Normaltyp der Wässer des Luxemburger Sandsteins

Sofern der Luxemburger Sandstein nicht völlig durch jüngere jurasische Ablagerungen überdeckt ist, gehören seine Grundwässer nach ihrer Chemie einem scharf umgrenzten Normaltyp an. Die Analyse eines von der Stadt Echternach genutzten Quellwassers zeigt diesen Normaltyp.

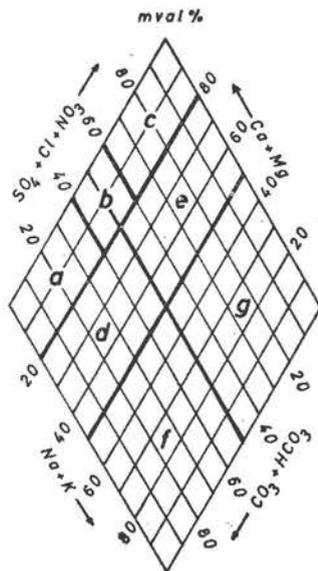
Analyse Nr. 9:

Quellwasser, Echternach / Fielsbouch

$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$	13,1 <sup>0</sup> dH	4,70 mval/l	$\text{Ca}^{++}$	78,8 mg/l	3,94 mval/l		
$\text{Cl}^-$	13,0 mg/l	0,37	$\text{Mg}^{++}$	19,6	1,61		
$\text{SO}_4^{--}$	34,0	0,72	$\text{Na}^+$	4,0	0,17		
$\text{NO}_3^-$	8,3	0,13	$\text{K}^+$	1,4	0,04		
		5,92 mval/l			5,76 mval/l		
$\text{CO}_2$	mg/l	$\text{NH}_4^+$	0 mg/l	mval/l	Ges.-Härte	15,7 <sup>0</sup> dH	5,6 mval/l
geb.	103,4	$\text{NO}_2^-$	0		pH	7,4	
freie	13,25	$\text{Fe}^{++}$	0,01	0,001	Temp.	9,6 <sup>0</sup> C	
zug.	28,0	$\text{Mn}^{++}$	0		Leitfähigk. (18 <sup>0</sup> C)	445 uS	
aggr.	0	$\text{O}_2$ -frei	10,9				
		$\text{SiO}_2$	7,5	0,25			

Zur übersichtlichen Erfassung aller einzelnen chemischen Größen der Wässer des Luxemburger Sandsteins werden im folgenden zwei Diagrammtypen verwendet:

1. Im 4 - Stoffdiagramm (Abb. 13) sind die mval-Verhältnisse der Lösungsgenossen untereinander dargestellt. Dies ermöglicht die Abgrenzung und Bestimmung der Grundwassertypen. Das 4 - Stoffdiagramm ist kombiniert mit zwei 3 - Stoffdiagrammen, in denen die Reaktionsverhältnisse getrennt für Anionen und Kationen zur Darstellung kommen.



*Normal erdalkalische Süßwässer*

- a) überwiegend hydrogenkarbonatisch
- b) hydrogenkarbonatisch - sulfatisch
- c) überwiegend sulfatisch

*Erdalkalische Süßwässer mit höherem Alkaliengehalt*

- d) überwiegend hydrogenkarbonatisch
- e) überwiegend sulfatisch

*Bereich alkalischer Süßwässer*

- f) überwiegend (hydrogen-) karbonatisch
- g) überwiegend sulfatisch - chloridisch

Abb. 12. Grundwassertypen des süßen Grundwassers, nach LANGGUTH 1966)

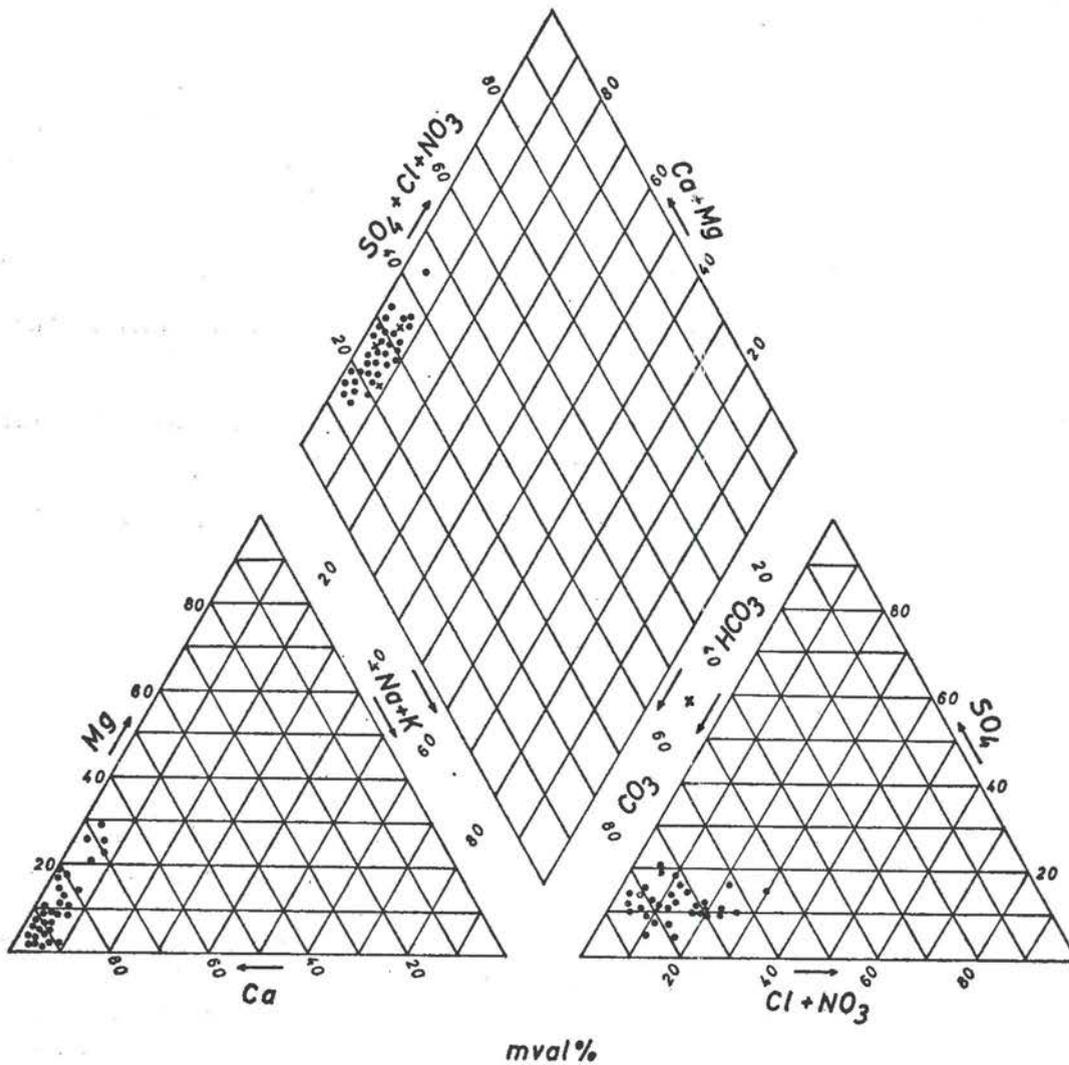


Abb. 13. Zusammensetzung der Wässer im Luxemburger Sandstein (Darstellung nach LANGGUTH 1966)

2. **Abbildung 14** zeigt in einem Diagramm die Schwankungsbreite des Gesamtlösungsinhaltes oder des Gesamtsalzgehaltes nach GERB (1958) in mval.

In die Diagrammdarstellungen wurden nur solche Wasseranalysen aufgenommen, deren Vollständigkeit und Exaktheit sich rechnerisch über die Ionenbilanz nachprüfen ließen. Sofern bei einer Analyse Werte für Kationen oder Anionen rechnerisch aus der Ionenbilanz ergänzt werden mußten, sind diese im Diagramm gekennzeichnet. In **Abbildung 13** mit dem Zeichen  $\times$ .

Insgesamt kommen in den Diagrammen 35 Analysen zur Auswertung. Schon diese relativ geringe Zahl zeigt einen scharf umgrenzten Grundwassertyp.

Sämtliche Analysen sind im Analysenverzeichnis am Schluß dieser Arbeit aufgeführt.

#### 4 - Stoffdiagramm

$\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$  nehmen beim sauerstoffreichen Normaltyp der Wässer des Luxemburger Sandsteins 90 bis 98 mval % der Kationen ein.  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  liegen mit 2 bis 10 mval % demgegenüber weit zurück. Bei den Anionen überwiegen  $\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-$  mit 60 bis 90 mval % gegenüber  $\text{SO}_4^{--} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$  mit 20 bis 40 mval % (s. Abb. 13).

In dieser Arbeit wird als Einteilungsprinzip der Grundwassertypen der in Abb. 12 aufgeführte Einteilungsvorschlag von LANGGUTH (1966) verwandt. Im weiteren Sinne gehen diese chemischen « Grundwassertypen des süßen Grundwassers » auf die Gruppe « fresh water » im Sinne von GORELL (1958) zurück.

Die Wässer des Normaltypes aus dem Luxemburger Sandstein sind dementsprechend als «normal erdalkalische, überwiegend hydrogencarbonatische Süßwässer» zu bezeichnen.

Im folgenden sollen die Reaktionsverhältnisse der Anionen und Kationen näher betrachtet werden.

#### 3 - Stoffdiagramme

##### Kationen:

##### *Natrium und Kalium*

Die Alkalien treten gegenüber den Erdalkalien im Lösungsinhalt der Wässer weit zurück. Natriumgehalte schwanken zwischen 2,3 mg/l und 6,0 mg/l (Mittelwert 3,9 mg/l). Kaliumgehalte liegen zwischen 0,2 und 4,4 mg/l (Mittelwert 1,1 mg/l). Die Natriumvormacht ist deutlich erkennbar. Hohe Natrium- sowie Kaliumgehalte sind eindeutig durch Verschmutzung bedingt. Bei derartigen Wässern treten gleichzeitig erhöhte Nitrat- und Chloridwerte auf. BARTHEL (1958) behandelt das Problem anthropogener Einflüsse auf den Grundwasserchemismus in einer Analysenreihe von Quellwässern im Bereich der Stadt Luxemburg. Hier sind Natriumgehalte bis zu 28 mg/l nachzuweisen.

##### *Kalzium und Magnesium*

Bei den Erdalkalien überwiegt Kalzium mit 51,0 bis 128,0 mg/l (Mittelwert 87,0 mg/l) gegenüber Magnesium mit 1,0 bis 20 mg/l (Mittelwert 6,8 mg/l). Der überwiegende Teil der gelösten Stoffe ist also durch an Kalzium gebundene Bestandteile bestimmt. Aus den auf Seite 54 aufgeführten Gesteinsanalysen ist ersichtlich, daß Magnesium wie Kalzium in stark wechselnden Konzentrationen im Sandstein vorliegen. Generell überwiegen aber auch im Speichergestein die Kalziumverbindungen.

##### *Eisen und Mangan*

Beim sauerstoffreichen Normaltyp der Wässer des Luxemburger Sandsteins ist erwartungsgemäß der Eisengehalt gering. Maximal sind 0,1 mg/l, im Mittel 0,03 mg/l vorhanden. Mangan ist in keinem Fall nachzuweisen.

## Anionen:

### Härte und das Kalk - Kohlensäure - Gleichgewicht

Das Diagramm in Abb. 14 zeigt auf der Ordinate den Gesamtsalzgehalt in mval, auf der Abszisse die mval % einmal für  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$  und zum anderen für  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$ . Somit kommt jede Analyse durch zwei Punkte im Diagramm zur Darstellung.

Die Wässer des Luxemburger Sandsteins sind zwischen 3,0 und 7,0 mval mineralisiert und sind somit als «mittelhart bis ziemlich hart» (nach KLUT) zu beurteilen. Zwei Analysen weisen «weiches Wasser» auf. Sie entstammen der Region Beaufort/Dillingen, wo der Sandstein vorwiegend kieseliges Bindemittel enthält.

Die Karbonathärte ist abhängig vom Angebot löslicher Karbonate im Grundwasserleiter, vor allem aber von einer entsprechenden Zufuhr an freier, im Wasser gelöster Kohlensäure. Diese wird von den Sickerwässern hauptsächlich im Bodenhorizont aufgenommen.

Die Gehalte an  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$  halten sich, wie aus dem Diagramm in Abb. 14 ablesbar, in engen Grenzen. Sowohl geringer wie auch stärker mineralisierte Wässer enthalten etwa gleichviel Karbonate bzw. Hydrogenkarbonate. Die gesamte Mineralisation wird beherrscht durch an  $\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-$  gebundene Kationen; Verbindungen mit anderen Anionen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Dies läßt auf eine für die Lösung der Karbonate ausreichende Anlieferung von gelöster Kohlensäure schließen und damit auch auf eine hohe biologische Aktivität der Böden auf dem Luxemburger Sandstein.

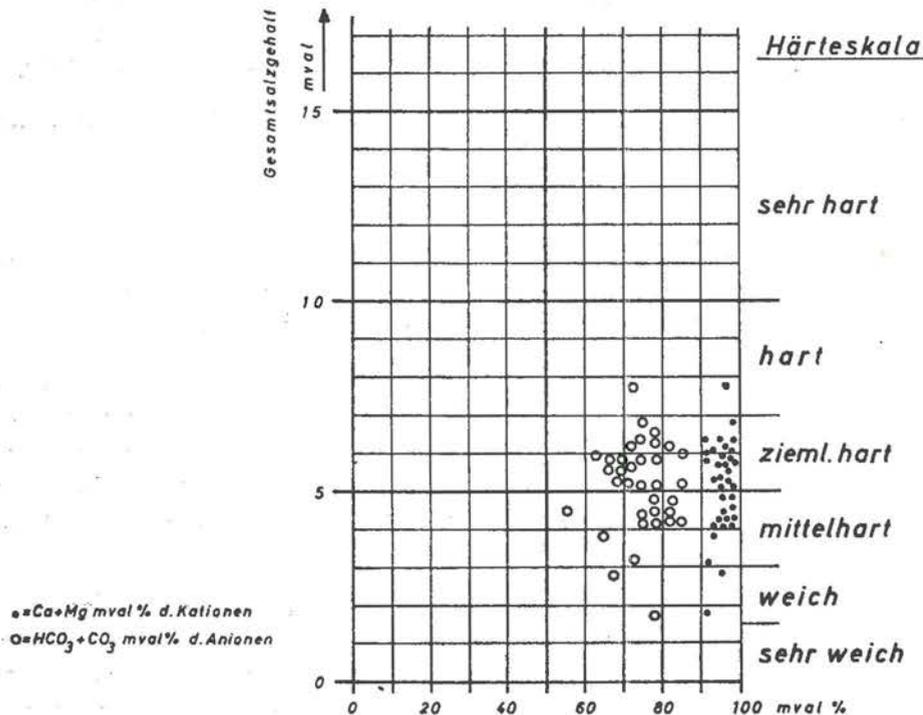


Abb. 14. Gesamtsalzgehalt der Wässer im Luxemburger Sandstein sowie die qualitative Beurteilung dieser Wässer nach Härtegraden (nach KLUT) (Darstellung nach LANGGUTH 1966)

Für ein typisches Wasser wie das der Quelle Fielsbouch/Echternach (s. S. 48) beträgt die Summe von gebundener und freier Kohlensäure 116 mg/l. Das Einzugsgebiet ist in diesem Falle zu 100% bewaldet. In Gebieten, in denen durch intensive Bearbeitung die Böden besser aufgelockert sind und dadurch die Tätigkeit der  $\text{CO}_2$ -produzierenden Bakterien angeregt wird, sind höhere  $\text{CO}_2$ -Gehalte in den Wässern zu finden (bis 150 mg/l). Es ist jedoch nicht möglich, anhand der geringen Analysenzahl diese Tendenz näher zu untersuchen.

Ist zu wenig zugehörige-freie Kohlensäure vorhanden, so kommt es zur Ausfällung von Kalziumkarbonat, bis sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht wieder eingestellt hat. An Kohlensäure untersättigte Wässer treten öfter auf und deshalb ist Kalktuffbildung an Quellaustritten häufig zu beobachten. Früher wurden einzelne Tufflager sogar abgebaut.

Einige wenige analysierte Wässer haben  $\text{CO}_2$ -Überschuß. Sie führen 5 bis 7 mg/l aggressive Kohlensäure (s. Analysenverzeichnis).

#### *Nitrat und Chlorid*

In Abbildung 15 sind die Nitratgehalte sämtlicher untersuchten Wässer aufgeführt und zwar in Abhängigkeit zur Beschaffenheit der Einzugsgebiete der jeweiligen Quellen.

In der modernen Feldwirtschaft werden in steigendem Maße nitratreiche Kunstdünger gestreut. Daß sich dies auf den Chemismus der Grundwässer auswirkt, kommt in Abbildung 15 klar zum Ausdruck. Wässer deren Einzugsgebiete zu 100% bewaldet sind führen Nitrat zwischen 1,5 und 8 mg/l. Ist dagegen das Einzugsgebiet landwirtschaftlich genutzt so steigen die Gehalte bis auf über 40 mg/l an. Bei 50 bis 60% Bewaldung fallen in Abbildung 15 drei Extremwerte an Nitratgehalt auf. Bei diesen Quellwässern besteht eine direkte Beeinflussung durch verschmutztes Oberflächenwasser (Bachversickerungen). Bei den Chloridwerten zeigt sich die gleiche Tendenz: 100% bewaldet = 7 bis 14 mg/l  $\text{Cl}^-$ , 100% landwirtschaftlich genutzt bis 30 mg/l  $\text{Cl}^-$ .

BARTHEL (1958) nennt für die Quellen im Bereich der Stadt Luxemburg für Nitrat Werte bis 75 mg/l und für Chlorid bis 45 mg/l.

#### *Sulfat*

Die analysierten Sandsteinwässer führen 6 bis 63 mg/l Sulfat, im Mittel um 30 mg/l. Für einen Sandstein mit rein karbonatischem Bindemittel erscheinen diese Gehalte erstaunlich hoch. MATTHESS (1961) gibt für Sandsteinwässer Sulfatgehalte zwischen 0 und 10 mg/l an.

Aus den Niederschlägen können die Sulfate nicht stammen, da Industriegebiete und Städte, die der Atmosphäre beträchtliche Mengen an schwefelhaltigen Rauchgasen zuführen, weit von den Einzugsgebieten entfernt liegen. Beziehungen zur Beschaffenheit der Einzugsgebiete — bewaldet oder landwirtschaftlich genutzt — lassen sich nicht herstellen, so daß die Zufuhr von Sulfaten durch Düngung auszuschließen ist (s. Analysenverzeichnis). Lagebeziehungen zu Mülldeponien, die ebenfalls eine Aufhärtung der Grundwässer hervorrufen können, bestehen nicht.

FABER (1930) konnte in Verwitterungskrusten des Luxemburger Sandsteins Gips nachweisen. Er führt die Gipsbildung auf eine Oxydation des reichlich im Sandstein vorhandenen Pyrits zurück. Dabei entsteht im Übergang freie Schwefelsäure, die dann mit dem Kalzium aus dem kalkigen Bindemittel des Sandsteins Gips bildet. Die Sickerwässer lösen den Gips und führen ihn ins Grundwasser ab. Gleichartige chemische Vorgänge sind auch aus Sulfidzerlagerstätten bekannt (s. auch MATTHESS 1961).

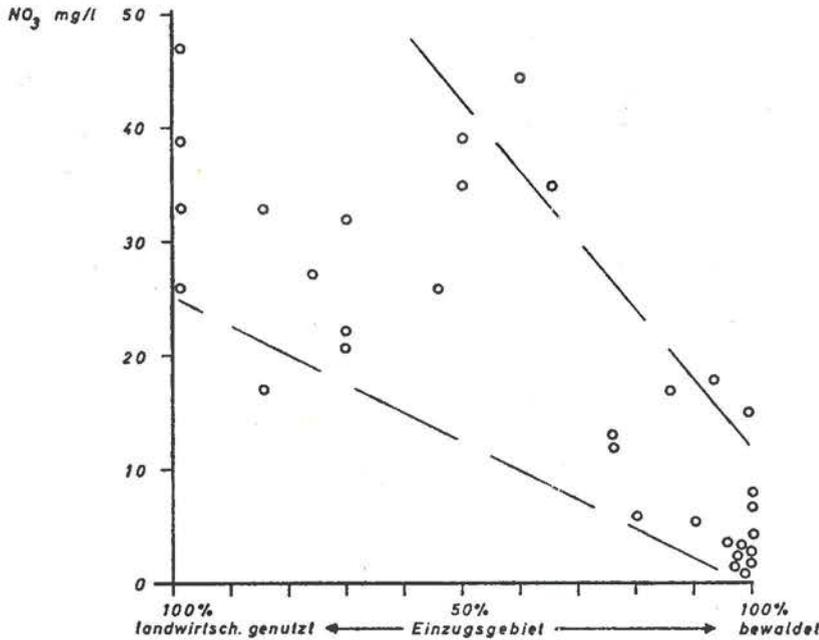


Abb. 15. Nitratgehalt der Wässer im Luxemburger Sandstein in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Einzugsgebiete.

Wie tiefgreifend und vollständig diese Umwandlungs- und Auslaugungsprozesse ablaufen, machen die im folgenden aufgeführten Gesteinsanalysen deutlich. Die Gesteinsproben sind einer Kernbohrung entnommen. Der Sandsteinkörper ist hier nicht durch jüngere Schichten überdeckt.

#### Bohrung Aero Findel/Luxemburg S 11 (Beschreibung der zur Analyse entnommenen Proben)

Probe Nr	Teufe	
1	5,00 m	fester, weiß-gelber, mittelkörniger, leicht kalkiger Sandstein; absandend; auf Kluffflächen Lösungerscheinungen
2	7,50 m	weicher, gelber, mittelkörniger Sandstein, stark absandend, Bindemittel weitgehend abgeführt
3	10,00 m	mürber, gelber Sandstein, mittelkörnig, stark absandend, Bindemittel weitgehend abgeführt
4	15,50 m	fester, weiß-gelber, mittelkörniger, kalkiger Sandstein, Bruch glatt, kantig
5	22,00 m	fester, weiß-gelber, mittelkörniger, kalkiger Sandstein, Bruch glatt, kantig
6	26,00 m	mürber, gelber, feinkörniger Sandstein, stark absandend, Bindemittel weitgehend abgeführt im Liegenden schließt sich eine 1,50 m mächtige Mergelfolge an!
7	30,00 m	fester, grauer, mergeliger Sandstein, Wattenschichtung
8	33,00 m	harter, grauer, mergeliger Sandstein, Bruch scharfkantig, glatt
9	35,00 m	harter, grauer, kalkiger Sandstein, Bruch scharfkantig, glatt
10	40,00 m	sehr harter, kalkiger Sandstein, leicht spätig, Bruch scharfkantig, splitterig, Wattenschichtung

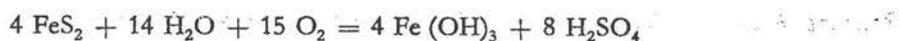
Lfde Nr	Lage des Entnahmepunktes		GH		KH		NKH		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Ca <sup>++</sup>		Mg <sup>++</sup>		Fe <sup>++</sup>		Mn <sup>++</sup>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>		SiO <sub>2</sub>		Kohlensäure mg/l			O <sub>2</sub> -frei	Leitf.	Temp.	pH-Wert	Bemerkungen		
	R.	H.	°dH	mval/l	°dH	mval/l	°dH	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	uS (18°C)	°C					
1	89	64	92	70	15,5	5,51	10,6	3,80	4,9	1,75	6,0	0,26	3,2	0,08	77,0	3,86	18,2	1,50	0,025	0,001	0	0	0	0	47,0	0,76	31,0	0,87	27,0	0,56	5,9	0,19	22,0	13,4	5,0	8,5	480	9,5	7,0	E landwirtschaftlich genutzt		
2	91	53	97	38	14,2	5,05	9,8	3,50	4,4	1,57	3,8	0,16	1,2	0,03	73,0	3,64	15,1	1,24	0,022	0,001	0	0	0	0	35,0	0,56	21,0	0,59	27,0	0,56	7,0	0,23	5,5	10,1	0	10,2	440	9,0	7,2	E 50% landwirtsch. genutzt		
3	94	24	97	38	15,3	5,45	11,0	3,90	4,3	1,53	5,9	0,25	1,1	0,15	90,0	4,50	8,3	0,68	0,010	0,0003	0	0	0	0	39,0	0,63	25,0	0,70	27,0	0,56	6,1	0,20	8,25	14,7	0	9,6	480	10,5	7,4	E landwirtschaftlich genutzt		
4	95	96	98	38	14,1	5,00	10,3	3,66	3,8	1,35	4,4	0,19	1,4	0,11	67,1	3,36	14,1	1,16	0,010	0,0003	0	0	0	0	35,0	0,52	21,0	0,59	25,0	0,52	6,1	0,20	8,25	12,2	0	10,6	420	9,4	7,4	E 50% landwirtsch. genutzt		
5	94	82	100	50	9,5	3,38	6,3	2,24	3,2	1,14	3,4	0,15	1,0	0,09	51,5	2,58	9,0	0,74	0,010	0,0003	0	0	0	0	17,0	0,48	16,0	0,45	23,0	0,46	7,2	0,24	5,5	3,1	0	10,4	310	9,1	7,1	E forstlich genutzt		
6	96	49	96	70	15,0	5,35	11,5	4,10	3,5	1,25	4,2	0,18	2,8	0,10	90,5	4,52	7,3	0,60	0,025	0,001	0	0	0	0	39,0	0,63	23,0	0,65	20,0	0,42	7,6	0,25	15,0	14,7	0	9,8	470	8,5	7,2	E 50% forstlich genutzt		
7	91	02	91	58	15,8	5,64	12,6	4,50	3,2	1,14	5,0	0,22	1,7	0,04	93,0	4,64	9,25	0,76	0,01	0,0003	0	0	0	0	33,0	0,53	23,0	0,65	33,0	0,68	4,8	0,16	19,25	24,0	0	8,3	470	8,3	7,2	E landwirtschaftlich genutzt		
8	89	76	91	36	15,2	5,44	11,7	4,17	3,5	1,25	5,3	0,23	4,4	0,11	89,0	4,44	9,25	0,76	0,01	0,0003	0	0	0	0	33,0	0,53	27,0	0,76	23,0	0,48	4,1	0,13	22,0	18,9	2,0	7,4	480	9,5	7,1	E landwirtschaftlich genutzt		
9	96	61	98	32	15,7	5,60	13,1	4,68	2,6	0,90	4,0	0,17	1,4	0,04	78,8	3,94	19,6	1,61	0,01	0,0003	0	0	0	0	8,3	0,13	13,0	0,37	34,0	0,72	7,5	0,25	13,25	28,0	0	10,9	445	9,6	7,4	E forstlich genutzt		
10	95	96	95	62	10,7	3,72	9,2	3,30	1,5	0,53	3,0	0,12	0,7	0,02	63,5	3,17	7,8	0,64	0,01	0,0003	0	0	0	0	6,8	0,11	9,0	0,25	25,0	0,52	7,2	0,24	11,0	8,4	2,2	10,7	340	8,5	7,4	E forstlich genutzt		
11	96	16	95	60	11,8	4,20	10,6	3,80	1,2	0,43	3,0	0,13	0,6	0,02	73,1	3,65	4,4	0,36	Spuren	0	0	0	0	2,4	0,04	14,0	0,39	23,0	0,48	7,2	0,24	8,25	13,4	0	10,7	360	8,4	7,2	E forstlich genutzt			
12	96	22	92	46	9,7	3,46	6,7	2,40	3,0	1,07	4,4	0,19	1,6	0,04	61,2	3,06	4,9	0,40	-	-	-	-	-	-	40,0	0,65	23,0	0,65	31,0	0,65	-	-	11,0	3,1	6,6	9,0	325	8,4	7,0	E 50% forstlich genutzt		
13	94	20	91	41	20,2	7,30	14,3	5,10	5,9	2,1	3,1	0,13	1,4	0,03	128,0	6,40	9,75	0,80	-	-	-	-	-	-	4,5	0,07	16,0	0,45	58,0	1,21	-	-	35,0	34,5	0	2,8	525	9,1	7,2	E forstlich genutzt		
14	93	58	91	16	18,3	6,52	15,7	5,60	2,6	0,90	4,4	0,19	0,5	0,01	122,0	6,10	4,9	0,40	-	-	-	-	-	-	17,0	0,27	20,0	0,56	63,0	1,31	-	-	27,4	51,0	0	5,8	500	9,1	7,2	E forstlich genutzt		
15	89	03	93	74	14,9	5,32	11,2	4,0	3,7	1,32	4,4	0,19	0,6	0,01	90,5	4,53	9,7	0,80	-	-	-	-	-	-	22,0	0,35	21,0	0,59	37,0	0,77	-	-	16,5	16,0	0	10,1	430	8,5	7,2	E landwirtschaftlich genutzt		
16	89	82	93	01	15,2	5,42	12,3	4,4	2,9	1,03	5,2	0,23	0,6	0,01	101,6	5,08	4,13	0,34	-	-	-	-	-	-	20,0	0,32	25,0	0,70	31,0	0,65	-	-	16,0	26,0	0	10,0	470	9,6	7,0	E landwirtschaftlich genutzt		
17	90	30	102	26	3,9	1,4	3,3	1,17	0,6	0,21	2,8	0,12	0,6	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	0,08	12,0	0,34	8,6	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2	E forstlich genutzt
18	88	22	100	25	7,4	2,64	5,3	1,9	2,1	0,75	3,6	0,15	0,9	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,0	0,29	15,0	0,42	9,6	0,20	-	-	6,6	2,0	4,4	9,6	-	-	7,2	E forstlich genutzt		
19	58	54	84	68	14,4	5,1	10,3	3,7	4,1	1,45	4,5	0,19	0,4	0,01	83,6	4,18	4,1	0,34	-	-	-	-	-	-	1,5	0,03	7,0	0,20	27,0	0,56	-	-	16,5	14,7	0	9,5	364	8,6	7,2	E forstlich genutzt		
20	59	57	84	02	12,7	4,54	12,0	4,3	0,7	0,25	2,6	0,11	0,4	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,0	0,08	14,0	0,39	-	-	-	-	-	-	10,0	386	8,0	7,4	E forstlich genutzt			
21	60	94	84	74	10,6	3,77	9,3	3,32	1,3	0,46	2,3	0,10	0,5	0,01	72,0	3,60	2,4	0,20	-	-	-	-	-	-	2,5	0,04	8,0	0,23	24,0	0,50	-	-	5,5	8,4	0	10,5	312	8,6	7,2	E forstlich genutzt		
22	63	56	83	16	11,6	4,41	9,0	3,20	2,6	0,93	3,0	0,13	0,3	0,007	75,2	3,76	4,9	0,40	-	-	-	-	-	-	16,0	0,26	11,0	0,31	28,0	0,58	-	-	8,25	7,6	0	11,0	315	9,0	7,2	E forstlich genutzt		
23	63	89	84	12	11,2	4,0	8,7	3,10	2,5	0,90	3,1	0,13	0,3	0,007	78,4	3,92	1,2	0,10	-	-	-	-	-	-	26,0	0,42	11,0	0,31	26,0	0,54	-	-	8,25	6,9	4,0	11,8	351	9,2	7,2	E forstlich genutzt		
24	65	19	85	21	11,1	3,9	8,9	3,20	2,2	0,89	3,2	0,14	0,2	0,005	76,4	3,82	1,7	0,14	-	-	-	-	-	-	12,0	0,19	11,0	0,31	16,0	0,34	8,0	0,21	5,5	7,6	0	10,4	351	9,0	7,2	E forstlich genutzt		
25	67	00	85	57	17,5	6,25	14,0	5,0	3,5	1,25	4,2	0,18	0,9	0,023	104,0	5,20	11,6	0,95	0,03	0,001	0	0	0	0	17,0	0,27	21,0	0,59	21,0	0,44	10,0	0,26	22,0	34,5	0	9,8	480	9,4	7,0	E landwirtschaftlich genutzt		
26	69	04	85	34	15,4	5,50	11,2	4,0	4,2	1,5	3,8	0,16	0,4	0,01	105,6	5,28	2,9	0,24	0,06	0,002	0	0	0	0	27,0	0,44	21,0	0,59	31,0	0,64	12,0	0,32	19,25	16,0	2,0	9,2	481	9,3	7,0	E 50% landwirtsch. genutzt		
27	70	57	83	40	14,4	5,1	10,3	3,7	4,1	1,45	4,5	0,19	1,0	0,025	98,8	4,94	2,4	0,20	-	-	-	-	-	-	32,0	0,52	15,0	0,42	35,0	0,73	-	-	19,25	12,2	4,0	9,2	412	9,3	7,0	E landwirtschaftlich genutzt		
28	69	12	83	40	14,1	5,0	11,3	4,1	2,8	1,0	4,4	0,19	0,4	0,01	98,8	4,94	1,2	0,10	0,04	0,001	0	0	0	0	21,0	0,34	16,0	0,45	15,0	0,31	12,0	0,32	16,5	16,0	0	10,4	408	9,6	7,0	E 50% landwirtsch. genutzt		
29	70	80	89	83	10,7	3,84	9,0	3,2	1,7	0,64	4,8	0,2	0,8	0,02	73,6	3,68	2,0	0,16	0,01	0,0003	0	0	0	0	6,8	0,13	13,0	0,37	28,0	0,58	5,0	0,163	27,5	7,6	13,2	10,8	325	9,0	6,9	E forstlich genutzt		
30	63	65	82	74	13,6	4,7	11,2	4,0	2,4	0,85	3,4	0,15	0,2	0,005	92,0	4,60	1,9	0,16	0,03	0,001	0	0	0	0	12,0	0,19	13,0	0,37	14,0	0,29	10,0	0,26	13,75	16,0	0	-	403	8,9	7,2	E forstlich genutzt		
31	90	74	100	74	8,1	2,9	6,4	2,3	1,7	0,60	4,7	0,22	1,4	0,03	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	20,0	0,32	15,0	0,42	6,2	0,13	-	-	-	-	-	-	260	-	7,1	E forstlich genutzt		
32	91	10	79	42	16,6	5,92	14,3	5,1	2,3	0,82	4,0	0,17	1,6	0,04	110,0	5,5	5,4	0,44	-	-	-	-	-	-	3,5	0,06	14,0	0,39	44,0	0,92	-	-	38,5	37,0	0	-	460	-	-	E forstlich genutzt		
33	90	94	80	28	15,2	5,62	12,0	4,3	3,2	1,14	3,4	0,15	0,4	0,01	101,2	5,06	4,6	0,38	-	-	-	-	-	-	4,0	0,06	13,0	0,36	56,0	1,17	-	-	22,0	20,5	0	11,6	442	8,0	-	E forstlich genutzt		
34	90	74	79	06	18,3	6,52	14,0	5,0	4,3	1,52	4,2	0,18	0,8	0,02	120,8	6,04	6,1	0,50	-	-	-	-	-	-	7,0	0,11	13,0	0,36	29,0	0,60	-	-	30,5	30,0	0	11,4	494	8,1	-	E forstlich genutzt		
35	90	74	80	17	17,1	6,10	13,7	4,9	3,4	1,21	3,9	0,17	0,8	0,02	101,5	5,08	9,25	0,76	0,109	0,004	0	0	0	0	2,4	0,04	12,0	0,34	43,0	0,90	5,6	0,18	46,75	32,2	7,0	7,9	494	9,2	7,0	E forstlich genutzt		
36	91	65	80	50	13,8	4,93	12,0	4,3	1,8	0,64	3,7	0,16	0,5	0,01	88,0	4,4	4,4	0,34	0,04	0,001	0	0	0	0	2,8</																	

Probe Nr	Glühverlust %		SiO <sub>2</sub> % + Unlös- liches	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %	S %	nicht bestimmt %
	bei 500°C	bei 500- 1000°C						
1	0,33	19,55	53,64	25,01	0	0	0	0,76
2	0,30	3,98	89,53	4,79	0	0	0	0,05
3	0,41	1,55	94,89	1,60	0	0	0	0,40
4	0,45	25,77	39,25	32,76	Spuren	0	0	0,58
5	0,36	10,63	74,15	13,22	0	0	0	0,75
6	1,56	1,86	89,73	1,00	0,20	0	0	1,71
7	1,44	14,23	66,08	14,13	1,75	0,13	0,55	0
8	2,27	16,79	54,52	19,38	1,46	0,13	0,49	2,27
9	1,12	23,68	38,35	31,11	0,68	0,11	0,70	0
10	0,88	25,82	37,88	31,63	0,74	0,18	0,55	1,63

Tabelle 7: Ergebnisse der chemischen Analyse der aus Bohrung S 11 entnommenen Gesteinsproben.  
(Ausführung: Ponts et Chaussées, Laboratoire d'Essai des Matériaux, Luxembourg 20.3.70)

Bei Teufe 26,00 m ist dem Sandstein eine 1,50 m mächtige Mergellage eingeschaltet, die als lokaler Stauhhorizont die Sickerwässer ableitet und das liegende Gestein vor dem Auslaugungsprozess bewahrt.

Der etwas erhöhte Sulfatgehalt in den Grundwässern des Luxemburger Sandsteins ist also zurückzuführen auf die Oxydation des Pyrits nach folgender Gleichung (FABER 1930)



und der nachfolgenden Bildung von Gips.

#### *Kieselsäure*

Kieselsäurebestimmungen liegen nur bei wenigen Analysen vor. Demnach ist sie mit 4 bis 12 mg/l am Lösungsinhalt der Wässer beteiligt. Dabei ist zu beachten, daß die Kieselsäurebestimmung kolorimetrisch nach WINKLER ausgeführt wurde. Mit dieser Methode kann kolloide Kieselsäure nicht erfaßt werden.

#### *Sauerstoff*

Charakteristisch für den Normaltyp ist der Gehalt an freiem gelöstem Sauerstoff. Er liegt meistens um  $9 \pm 2$  mg/l. Deshalb fehlen Ammoniumverbindungen, Nitrite, Sulfide, Eisen und Mangan in diesen Wässern; dafür ist stets Nitrat in gewissen Mengen vorhanden. Daraus ist zu schließen, daß die Wässer auf ihrem Weg durch den Grundwasserleiter auf keine Reduktionszonen treffen und ihr an der Luft aufgenommener Sauerstoffgehalt weitgehend erhalten bleibt.

### pH-Wert

Trotz der erhöhten Konzentration an freier Kohlensäure (teilweise über 20 mg/l) sinkt der pH-Wert nur in ganz wenigen Fällen unter 7,0; das Mittel liegt bei 7,2. Die relativ hohe Konzentration an Hydrogenkarbonationen im Wasser wirkt hier wahrscheinlich stark puffernd.

### C. III. Typmäßig veränderte Wässer im Luxemburger Sandstein

Im SW des Landes ist der Luxemburger Sandstein vollständig durch jüngere Schichten überdeckt. Die Mächtigkeit des überlagernden Schichtpaketes nimmt dabei nach SW hin zu, so daß bei Esch/Alzette der gesamte Mittlere und Obere Lias und der Dogger bis zum Bajocien über dem Sandstein liegen.

Bohrungen haben in diesem Teil des Landes im Luxemburger Sandstein Grundwässer eines eigenen Types erschlossen (BARTHEL 1965). Als Wasser dieses Types sei hier das der Bohrung I, Dupont de Nemours, Contern angeführt:

#### Analyse Nr 38

$\text{HCO}_3^{--} + \text{CO}_3^{--}$	10,9°dH	3,9 mval/l	$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$	14,9°dH	5,3 mval/l
$\text{Cl}^-$	11,0 mg/l	0,31 mval/l	$\text{Na}^+$	5,2 mg/l	0,22
$\text{SO}_4^{--}$	62,0	1,29	$\text{K}^+$	1,6	0,04
$\text{NO}_3^-$	19,0	0,26			5,56 mval/l
		5,86 mval/l			
$\text{NH}_4^+$	Spuren		Ges.-Härte	14,9°dH	5,3 mval/l
$\text{NO}_2^-$	0,46 mg/l		pH	7,5	
$\text{Fe}^{++}$	2,8		Temp.	?	
$\text{Mn}^{++}$	0,16		Leitfähigkeit (18°C)	462 uS	
$\text{O}_2$ -frei	3,3				

Durch die Überlagerung von vorwiegend mergeligen Schichten können dem Luxemburger Sandstein sauerstoffführende Sickerwässer nicht in größerem Maße zutreten (s. auch Abschnitt III. 3. 4.). Zudem dürften nur geringe Fließbewegungen die Grundwässer dieses tieferen Stockwerkes durchmischen. In solchem Milieu bildet sich ein sauerstoffarmer Reduktionstyp des sauerstoffreichen Normaltyps aus. Bei Sauerstoffgehalten unter 4 mg/l treten Eisen und Mangan, wohl als Bikarbonate der zweiwertigen Ionen dieser Metalle, auf. Ammoniumverbindungen sind meist in Spuren vorhanden. An Stelle der sauerstoffreichen Stickstoffverbindungen treten Nitrite.

Sowohl im Gesamtsalzgehalt wie auch im Verhältnis der Anionen und Kationen unterscheiden sich die reduzierten Wässer nicht vom Normaltyp. Somit lassen sie sich als « *typmäßig reduzierte erdalkalische Hydrogenkarbonatwässer* » bezeichnen.

#### C. IV. Qualität der Wässer des Luxemburger Sandsteins in hygienischer und technischer Hinsicht

Die oft tiefgreifende Verwitterungszone des Sandsteins gibt einen ausgezeichneten Filter für die Sickerwässer ab. In der Ausgeglichenheit des Chemismus der Wässer des Normaltyps begründet sich zudem eine lange Reaktionszeit, die auf lange Verweildauer der Wässer im Grundwasserleiter schließen läßt. (Näheres hierzu s. Abschnitt II. 4.). Der Luxemburger Sandstein spendet daher ein ausgezeichnetes Trinkwasser, dem Sauerstoffreichtum, nicht zu hohe Karbonathärte und gelöste Kohlensäure einen frischen Geschmack verleihen. Die Bakteriologie ist ebenfalls sehr gut.

Ein Großteil des Trink- und Brauchwasserbedarfes des Großherzogtums wird mit diesen Wässern gedeckt. Um so alarmierender müssen deshalb Fälle von Verunreinigungen wirken, die in den letzten Jahren immer häufiger auftreten. Die Untersuchungen zu dieser Arbeit haben eindeutig bewiesen, daß oberflächliches und unterirdisches Wasser in Wechselbeziehungen stehen (s. Abschnitt I. 2.). Aus diesem Grunde sollte mehr als bisher darauf geachtet werden, die Verschmutzung der Oberflächengewässer zu verhindern, oder in erträglichen Grenzen zu halten. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Behandlung der Abwässer zu legen.

Zur Ausbildung der Rostschutzschicht in Rohrleitungen ist eine Konzentration von freiem Sauerstoff von mehr als 6 mg/l notwendig, außerdem muß das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht erfüllt sein. Beide Bedingungen erfüllen die Wässer des Normaltyps. Sie stellen also ausgezeichnete Schutzschichtbildner dar. Da, wenn auch relativ selten, Quellen mit aggressiver Kohlensäure auftreten, sind Untersuchungen angebracht, bevor neue Quellen in Rohrnetze eingeleitet werden. Starker Kalkansatz, verursacht durch an Kohlensäure untersättigte Wässer, ist bisher in Rohrnetzen noch nicht aufgetreten. Die relativ hohen Fließgeschwindigkeiten verhindern wahrscheinlich die Kalkfällung an den Rohrwandungen.

Die in den Tiefbohrungen erschlossenen Wässer greifen wegen ihrer Sauerstoffarmut Eisen an, verhindern also den Aufbau der Rostschutzschicht. Gleichzeitig haben sie oft durch die erhöhten Eisengehalte einen unangenehmen tintigen Beigeschmack. Vor der Verwendung zu Trink- und Industrierwasser ist eine Aufbereitung unbedingt notwendig. (Belüftung und nachfolgende Ausfilterung des ausgeflockten Eisen-III-hydroxyds) (BARTHEL 1965).

In den Bohrbrunnen kommt es durch die sauerstoffarmen, eisenführenden Wässer zu einer Verschlammung der Kiesschüttung und der Filterrohre durch wasserhaltiges Eisen-III-hydroxyd, dem sog. « Ocker ». Dieser Oxydationsvorgang läuft vor allem im Absenkungsbereich der Brunnen ab, da hier das Brunnenwasser ausreichend mit dem Luftsauerstoff in Berührung kommt.

Bei der weiteren Erschließung der Tiefenwässer des Luxemburger Sandsteins muß beachtet werden, daß die hydrogeologische Situation: Überdeckung des Sandsteins durch undurchlässige Schichten = Abriegelung von Bodenhorizont und sauerstoffreichen Sickerwässern, stets die Ausbildung reduzierter Wässer bedingt. Aufbereitungsanlagen sind also bei Planung von Wassergewinnungsanlagen miteinzukalkulieren (BARTHEL 1965).

#### C. V. Quelltemperaturen

Bei gefaßten wie ungefaßten Quellen wurden von Winter 67/68 bis Frühjahr 1969 Temperaturmessungen vorgenommen. Die Auswertung der Meßergebnisse zeigt, daß für Quellen bei denen

Oberflächeneinflüsse ausgeschlossen werden können, die Temperaturen im Jahresmittel bei 8,0-9,3°C liegen. Dabei sind für die einzelnen Quellen nur ganz geringfügige Schwankungen von 0,1-0,2°C zu beobachten.

Anders sieht die Temperaturentwicklung bei Quellwässern aus, bei denen Oberflächeneinwirkungen vorliegen. Hier ist eine direkte Beeinflussung durch die jahreszeitlich wechselnden Luft- und Bodentemperaturen zu erkennen. Dies ist besonders auffällig bei Wässern, die bis zu ihrem Austritt große Strecken im Hangschutt zurücklegen. Gleiche Abhängigkeit zeigen auch Quellen, denen bei intensiven Niederschlägen Oberflächenwässer zutreten, Regenperioden machen sich in Änderungen von 0,5°C bemerkbar. Im Jahreslauf schwanken die Temperaturen um max. 3°C. Als Beispiel sei hier der Temperaturablauf der Quelle Willibrordusbour/Geyershaff aufgeführt (Quellaustritt bei 330 m ü.NN):

November	1967	9,1°C	September	1968	9,0°C
Dezember	1967	8,9	Oktober		9,2
Januar	1968	8,4	November		9,3
Februar		8,2	Dezember		8,8
März		7,9	Januar	1969	8,5
April		8,0	Februar		8,4
Mai		8,1	März		7,8
Juni		-	April		-
Juli		8,4	Mai		7,9
August		-			

und zum Vergleich die mittleren monatlichen Bodentemperaturen in 100 cm Tiefe, um 13<sup>00</sup> Uhr, Station Luxemburg/Stadt, 330 m ü.NN:

November	1967	8,2°C	September	1968	13,7°C
Dezember	1967	5,1	Oktober		11,7
Januar	1968	3,8	November		8,2
Februar		3,8	Dezember		4,5
März		4,3	Januar	1969	3,9
April		7,8	Februar		3,4
Mai		9,8	März		4,3
Juni		12,0	April		6,6
Juli		14,1	Mai		10,3
August		14,2			

### C. VI. Analysenverzeichnis

#### Anmerkungen:

Sämtliche Analysen wurden vom Laboratoire des Eaux, Luxembourg ausgeführt. Die Wasserproben wurden zum überwiegenden Teil vom Verfasser selbst im Gelände entnommen. Dabei wurden folgende Bestimmungen sofort bei der Probenentnahme vorgenommen:

— Bestimmung des freien Sauerstoffes, jodometrisch nach WINKLER-BRUHNS.

- Bestimmung der gesamten freien Kohlensäure titrimetrisch nach TRILLICH. Die Berechnung der «freien, überschüssigen Kohlensäure» = «aggressive Kohlensäure» erfolgte nach TILLMANS.
- Bestimmung der Leitfähigkeit mittels eines elektrischen Leitfähigkeitsmeßgeräts. Die gefundenen Werte wurden sodann zum besseren Vergleich auf die jeweilige Leitfähigkeit bei 18°C umgerechnet.
- Bestimmung des pH-Wertes mittels kolorimetrischer Messungen.
- Bestimmung der Temperatur.

Die Lage der Entnahmepunkte der einzelnen Wasserproben ist im Analysenverzeichnis mit Rechts- und Hochwerten angegeben. Diese Zahlen beziehen sich auf das auf luxemburgischen topographischen Karten verwendete Koordinatennetz (Projection Gauss - Krüger - Luxembourg).

Die Proben zu den Analysen Nr. 1-36 wurden ausschließlich an Quellen entnommen.

Zur Beschreibung der Lage der Wasserbohrungen war die Angabe von Rechts- und Hochwerten nicht sinnvoll. Im Analysenverzeichnis sind deshalb Ort und Eigentümer eingetragen.

In der Spalte «Bemerkungen» ist für die Quellen (Analyse Nr. 1-36) die Beschaffenheit ihrer jeweiligen Einzugsgebiete angegeben. Bei den Wasserbohrungen (Analyse Nr. 37-46) ist die geologische Situation im Bereich der Bohrungen aufgeführt.

## D. LITERATUR

- Annuaire Météorologique et Hydrographique, Herausgeber: Ministère de l'Agriculture, Grand-Duché de Luxembourg, Service de la Météorologie et de l'Hydrologie, Luxembourg.
- BARTHEL, J.: Recherches chimiques récentes sur nos eaux potables. — Grand-Duché de Luxembourg, Publication du Ministère de la Santé Publique, Luxembourg 1958.  
La qualité chimique des eaux provenant des nappes captives du Grès de Luxembourg. — Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois, No 70, Luxembourg 1965.
- BECKSMANN, E.: Grundwasserchemismus und Speichergestein. — Z. deutsch. geol. Ges., 106, S. 23-35, Hannover 1954.
- BERG, D.: Die Klüfte im Paläozoikum und Mesozoikum von Luxemburg und der westlichen Eifel. — Publications du Service Géologique du Luxembourg, Vol. XVI, Luxembourg 1965.
- BINTZ, J.: Les possibilités de renforcement de notre alimentation en eau par forages-captages d'eaux souterraines. — Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois, No 70, Luxembourg 1965.
- BINTZ, J. & MULLER, A. Sur la représentation du Grès de Luxembourg sur la nouvelle carte géologique générale du Grand-Duché. — Institut Grand-Ducal de Luxembourg, « Archives », Vol. 31, Luxembourg 1964 + 1965.
- DAMMANN, W.: Meteorologische Verdunstungsmessungen, Näherungsformeln und die Verdunstung in Deutschland. — Die Wasserwirtschaft, 55, H. 10, S. 315-321, Stuttgart 1965.
- DIENEMANN, W.: Erfahrungen bei der Streckung von Schutzgebieten für Trinkwassergewinnungsanlagen an Hand der Richtlinien des DVGW vom Januar 1953. — Z. deutsch. geol. Ges., 106, S. 53-64, Hannover 1955.
- DIN 4049, Blatt 1: Gewässerkundliche Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen. — Deutsche Normen (Benth-Vertrieb), Berlin 1954.
- EINSELE, G. u.a.: Hydrogeologische Untersuchungen in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. — Geol. Mitt. TH Aachen, 9, S. 1-74, Aachen 1969.
- EISSELE, K.: Über Grundwasserbewegung in klüftigem Sandstein. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 8, S. 105-111, Freiburg 1966.
- FABER, G.: Fressende Wunden am Luxemburger Sandstein. — Société des Naturalistes Luxembourgeois, 24, Luxembourg 1930.
- FAST & SAUER, K.: Die chemische Zusammensetzung südbadischer Grundwässer, Herkunftsfragen und Versuch einer Typologie. — Vom Wasser, 25, Weinheim 1958.
- FRIEDRICH, W.: Lysimetermessungen und andere gewässerkundliche Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. — Z. deutsch. geol. Ges., 106, S. 41-48, Hannover 1955.
- FRIEDRICH, W.: Neue Werte für die Grundwassererneuerung (Nach Lysimetermessungen). — Z. deutsch. geol. Ges., 113, S. 12-21, Hannover 1961.
- GERB, L.: Chemische Vorgänge an Grundwasserfassungen. — GWF, Wasser-Abwasser, 97, H. 14, S. 607-610, München 1956.  
Grundwassertypen. — Vom Wasser, 25, Weinheim 1958.
- GORELL, H. A.: Classification of formation waters based on sodium chloride content. — Bull. Amer. Ass. Petr. Geol., 42, S. 2513, Tulsa 1958.
- GRAHMANN, R.: Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung. — Forschungen z. deutsch. Landeskunde, 105, Teil II, Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen 1958.

- HAUDE, W.: Zur praktischen Bestimmung der aktuellen und potentiellen Evaporation und Evapotranspiration. — Mitt. deutsch. Wetterdienst, 8 S. 3-22, Bad Kissingen 1954.  
Zur Bestimmung der Verdunstung und des Wasserhaushaltes in Trockengebieten des Vorderen Orients zwischen Nil und Euphrat. — Die Wasserwirtschaft, 53, H. 12, S. 427-438, Stuttgart 1963.
- HEITALE, H.: Versickerungsvorgänge in der Buntsandsteinzone des südlichen Saarlandes. — Dissertation Tübingen 1968.
- HÖLL, K.: Wasser, Untersuchung, Beurteilung, Aufbereitung. — 3. Aufl. Walter de Gruyter-Verlag, Berlin 1960.
- v. HOYER, M.: Markierungsversuch Wiersch/Dondelange. — Unveröffentlichtes Gutachten für das Syndicat des Eaux du Sud Koerich/Luxembourg, 1969.
- ISENBERG, G.: Die Bedeutung der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung für die Raumordnung. — GWF, Wasser-Abwasser, 101, H. 12, S. 290-294, München 1960.
- KÄSS, W.: Die unmittelbare Bestimmung von Uraninspuren bei Färbeversuchen. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1963/64, Graz 1964.  
Erfahrungen bei Färbeversuchen mit Uranin. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1965, Graz 1965.  
Erfahrungen mit Uranin bei Färbeversuchen. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1967, S. 123-134, Graz 1967.  
Salzungsversuche mit Kalisalz. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1967, S. 274-280, Graz 1967.
- KESSLER, H.: Lineare Meßwehren für Quellenschüttungen. — S. 81-87,  
in MAURIN & ZÖTL: in: Die Untersuchung der Zusammenhänge unterirdischer Wässer mit besonderer Berücksichtigung der Karstverhältnisse. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1959, Graz 1959.
- LANGGUTH, R.: Die Grundwasserverhältnisse im Bereich des Velberter Sattels (Rhein. Schiefergebirge). — Herausgeber: Der Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1966.
- LUCIUS, M.: Das Gutland. — Publications du Service Géologique de Luxembourg, Vol. V, Luxembourg 1948.  
Quelques aspects de la géologie appliquée dans l'aire de sédimentation luxembourgeoise. — Publication du Service Géologique de Luxembourg, Luxembourg 1953.
- MATTHES, G.: Geologische und hydrochemische Untersuchungen in der östlichen Vorderpfalz zwischen Speyer und Worms. — Notizbl. hess. Landesamt f. Bodenf., 86, S. 335-378, Wiesbaden 1958.
- MATTHES, G.: Die Herkunft der Sulfat-Ionen im Grundwasser. — Abh. hess. Landesamt f. Bodenforschung, 35, Wiesbaden 1961.
- MATTHES & SCHMITT: Ein Färbeversuch im Buntsandstein des Odenwaldes. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1966/67, Graz 1967.
- MATTHES & THEWS, J.-D.: Erfahrungen bei der hessischen hydrogeologischen Spezialkartierung 1: : 25 000 in den Jahren 1957 und 1958. — Notizbl. hess. Landesamt f. Bodenforschung, 87, S. 417-428, Wiesbaden 1959.  
Der Abflußzuwachs als Hilfsmittel bei der Beurteilung von Wassererschließungsmöglichkeiten. — Notizbl. hess. Landesamt f. Bodenforschung, 91, S. 231-236, Wiesbaden 1963.
- MATTHES & THEWS in LAEMMLEN, W.: Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt Nr. 5223 Queck, Abschnitt Hydrogeologie, S. 245-281, Hess. Landesamt f. Bodenforschung, Wiesbaden 1963.
- MAURIN, V. & ZÖTL, J. u.a. Die Durchführung hydrogeologischer Versuche. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1959, Graz 1959.

- MULLER, A.: Contributions à la connaissance du Lias inférieur au Grand-Duché de Luxembourg, 1. Die Mergel und Kalke von Strassen. — Publications du Service Géologique de Luxembourg, Vol. XVII, Luxembourg 1967.
- MURAWSKI, H.: Klufnetz und Gewässernetz. — N. Jb. Geol. u. Pal., Mh., H. 9, S. 537-561, 1964.
- MUTSCHMANN & STIMMELMAYER: Taschenbuch der Wasserversorgung. — 5. Aufl. Frankh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.
- NATERMANN, E.: Die Linie des langfristigen Grundwassers und die Trockenwetterabflußlinie. — Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge d. gewässerkundl. Tagung Sept. 1950, S. 12-14, München 1951.
- NEUMANN - REDLIN, Chr.: Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen in Muschelkalk und Keuper Luxemburgs. — Publications du Service Géologique de Luxembourg, Vol. XXII, Luxembourg 1971.
- NÖRING, F.: Fragen der Grundwasserchemie in Beziehung zu Oberfläche und Untergrund. — Z. deutsch. geol. Ges., 102, S. 123-128, Hannover 1951.
- Richtlinien für Abflußmessungen. — Herausgeber: Gewässerkundliche Anstalten des Bundes und der Länder, Koblenz 1965.
- Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete 1. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser. — Arbeitsblatt W 101, November 1961. Herausgeber: Deutscher Verein f. Gas- und Wasserfachmänner (DVGW), Frankfurt.
- SCHWILLE, Fr.: Hohe Nitratgehalte in den Brunnenwässern der Moseltalau zwischen Trier und Koblenz. — GWF, Wasser-Abwasser, 110, H. 2, 1969.
- SEILER, K-P.: Grundwasserfließvorgänge im klüftigen und porösen Medium des Mittleren Buntsandsteins im Saarland. — Dissertation Tübingen 1968.
- THEWS, J-D.: Die Karte der Grundwasserbeschaffenheit in Hessen 1 : 300 000, Kartenwerk + Erläuterungen, Hess. Landesamt f. Bodenforschung, Wiesbaden 1966.
- UHLIG, S.: Zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung bewachsenen Bodens. — Wasserwirtschaft, 44, Heft. 12, S. 309-315, Stuttgart 1954.
- VILLINGER, E.: Karsthydrologische Untersuchungen auf der Reutlinger Alb (Schwäbischer Jura). — Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 11, S. 201-278, Freiburg 1969.
- Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan WESCHNITZ, Herausgeber: Der Hessische Minister f. Landwirtschaft und Forsten, Wiesbaden 1964.
- ZAKOSEK, H.: Über die Bedeutung des Bodens für die Ergänzung der Grundwasservorräte. — Z. deutsch. geol. Ges., 106, S. 35-40, Hannover 1955.
- ZWITTNIG, L.: Die Beeinflussung des Grundwassers durch Mülldeponien. Eine Studie über die Aufhärtung des Grundwassers, hervorgerufen durch Schüttung von Müll in grundwasser-nahen Deponien im Bereich des Grazer Feldes. — Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1963/1964, S. 91-106, Graz 1964.