

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS
ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES

PUBLICATIONS DU SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG
VERÖFFENTLICHUNGEN DES LUXEMBURGER GEOLOGISCHEN DIENSTES

VOLUME XXVIII

HYDROGEOLOGISCHE
DETAILUNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN
DER "SOLUTION DE RECHANGE"
(ERSATZLÖSUNG) IN LUXEMBURG

– EINE SYNTHESE AUS METHODEN DER HYDRAULIK,
ISOTOPENHYDROLOGIE UND HYDROCHEMIE –

FRANZ-JOSEF STRUFFERT

LUXEMBOURG 1994
SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG

HYDROGEOLOGISCHE
DETAILUNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN
DER "SOLUTION DE RECHANGE"
(ERSATZLÖSUNG) IN LUXEMBURG

GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS
ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES

PUBLICATIONS DU SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG
VERÖFFENTLICHUNGEN DES LUXEMBURGER GEOLOGISCHEN DIENSTES

VOLUME XXVIII

HYDROGEOLOGISCHE
DETAILUNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN
DER "SOLUTION DE RECHANGE"
(ERSATZLÖSUNG) IN LUXEMBURG

– EINE SYNTHESE AUS METHODEN DER HYDRAULIK,
ISOTOPENHYDROLOGIE UND HYDROCHEMIE –

FRANZ-JOSEF STRUFFERT

LUXEMBOURG 1994
SERVICE GÉOLOGIQUE DU LUXEMBOURG

Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
1993

Gedruckt bei Druckerei Linden, Luxemburg

ISBN 2-919994-02-6

Vorwort

Betreut, begleitet und gefördert wurde die vorliegende Dissertation von Prof. Dr. E.P. Löhnert, Geologisch-Paläontologisches Institut der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Mit rechtem Maß für wissenschaftliche Freiheit, Anspruch und Aufgabenstellung war er mir vom Untersuchungsansatz bis zur Schriftlegung ein steter Ansprechpartner.

Prof. Dr. H.-J. Dürbaum, Dir. a.D. an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover und Honorarprofessor an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, hat die hydraulischen Untersuchungen betreut und die Erstellung des Zweitgutachtens übernommen. Seine mathematisch-geohydraulische Auffassung war für mich Ansporn zur intensiven Auseinandersetzung mit den komplexen geohydraulischen Randbedingungen der Standorte.

Durch sein Systemverständnis vom isotopisch-geochemisch markierten ober- und unterirdischen Wasserkreislauf hat Dr. L. Eichinger, HYDROISOTOP GmbH Schweitenkirchen, mir eine problemorientierte kritische Anwendung der Isotopen-Methoden aufgezeigt. Auf seine Bereitschaft zur schrittweisen Isotopenbestimmung der Probenserien und zur Diskussion ihrer Interpretation ist letztlich die optimale Ausbeute an aussagekräftigen Ergebnissen zurückzuführen.

Angeregt wurden die vorliegenden Detailuntersuchungen an Grundwasservorkommen des Luxemburger Sandsteins durch die beiden Amtsleiter des Service Géologique de Luxembourg, Ing.-Geol. J. Bintz, Amtsleiter a.D. und Ing.-Geol. R. Maquil, amtierender Leiter, die mich vor allem während meiner Aufenthalte in Luxemburg nach Kräften unterstützten.

An den Pumpversuchen, der hydrochemischen Analytik und der Datenbeschaffung waren, außer dem Service Géologique, folgende luxemburgische Institutionen beteiligt: Syndicat des Eaux du Barrage d'Esch-sur-Sûre, Syndicat des Eaux du Sud, Laboratoire Division des Eaux, Service de la Météorologie et de l'Hydrologie.

Der Kontakt mit Luxemburg ist im Rahmen der Brunnenbohrungen der *solution de rechange* durch die Fa. VORMANN-Brunnenbau, Nottuln, entstanden.

Kurzfassung

Im Rahmen der Bereitstellung der neuen, auf Grundwasserressourcen basierenden Spitzenbedarfs- und Notwasserversorgung Luxemburgs, der sog. *solution de recharge* (Ersatzlösung), wurden die vorliegenden Untersuchungen vornehmlich auf die Standorte Koerich und Trois Ponts konzentriert. Zum Zweck des überregionalen Vergleichs wurden die isotopenhydrologischen Untersuchungen und die damit verbundenen chemischen Daten der anderen Standorte Everlange (Aquifere in sandiger, sog. Randfazies der Trias) und Schaedhaff (überdeckter Luxemburger Sandstein) mit aufgenommen.

Beide Standorte nutzen den Luxemburger Sandstein (sandige Fazies des Unteren Lias) als Grundwasserleiter. In Koerich bedingt eine regionale, flachwellige, flexurartige Lagerung (Mulden- und Sattelbau bei LUCIUS 1948) des anstehenden und verwitterten Sandsteins das große Grundwasserdargebot im "Muldentiefsten" und den großen Reichtum an perennierenden Quellen - sofern diese Depressionszonen von Erosionsformen des Eischtals bis zur Sandsteinbasis angeschnitten werden. Die Luxemburger Sandstein-Formation fällt mit der Schichtstufenlandschaft nach Süden ein, so daß in Trois Ponts bereits unter 30-70 m mächtigen, tonig-mergeligen Deckschichten ein gespannter, unverwitterter, im Mittel 72 m mächtiger Kluftaquifer erschlossen wird. Im natürlichen Ruhezustand ist im Bereich von Trois Ponts eine Grundwasserscheide ausgebildet, so daß der Druckwasserspiegel des Luxemburger Sandstein-Aquifers nach Norden auf das Eischtal und nach Südosten auf eine überregionale Störungszone ausgerichtet ist. Für die Tonstein-Serien und die Mergelstein-, Kalkstein-Wechselfolge der Deckschichten werden eigenständige Grundwasserspiegel nachgewiesen.

Als hydraulische Untersuchungen wurden separate, mehrwöchige, jeweils den gesamten Standort umfassende Pumpversuche durchgeführt. Diese wurden von eng aufeinander abgestimmten Probenahmen für die chemischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen begleitet. Die eigenständigen Auswertungen führen in der zusammenfassenden **Diskussion** zu einer gegenseitigen Plausibilitätskontrolle und ergänzen sich zu einem standortübergreifenden Systemverständnis.

Durch die Nutzung natürlicher Tracer, der sog. Umweltisotope (^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C , ^{14}C), führen die **Isotopen-Methoden** zur Differenzierung des Inputs (Niederschläge) und der Grundwasserproben (Output), zur Gruppierung innerhalb der Grundwasserproben und schließlich zur zeitlichen Eingrenzung der beprobten Grundwässer (Mittlere Verweilzeiten, Grundwasser-Modellalter). Es wird eine regional-klimatische Einordnung und das saisonale Auftreten einer wirksamen Grundwasserneubildung diskutiert. So werden die standortspezifischen Unterschiede in den Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalten auf klimatische Bedingungen zu den Zeiten der Grundwasserneubildung zurückgeführt. Die Übereinstimmung dieser Ergebnisse mit denen der hydraulischen Untersuchungen bestätigt die Realitätsnähe.

In Koerich wird der Übergang von einem jungen, vom Niederschlag geprägten "3-Komponenten-Grundwassermischsystem" zu einem leakage-beeinflußten älteren Grundwasser verdeutlicht. Durch den PC-gestützten Einsatz von sog. "lumped-parameter"-Modellen werden die Mittleren Verweilzeiten dieser Grundwässer so weit differenziert, daß Anteile von Verweilzeit-Gruppen (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) an der jeweiligen Mittleren Verweilzeit betrachtet werden. An den tritiumfreien Grundwässern aus Trois Ponts wird der Einfluß von Leakage-Wässern, die einem deutlichen (Kohlenstoff-) Isotopenaustausch unterliegen, aufgezeigt und diskutiert.

Die **hydraulischen Untersuchungen** beschreiben und quantifizieren die unterschiedlichen Strömungssysteme. Dabei erfassen sie die hydrogeologischen (Aquifer-) Kennwerte unter Be-

rücksichtigung der jeweiligen natürlichen Grundwasserübertritte aus den "leaky"-Deckschichten, als auch unter Beachtung der influenten/effluenten Strömungsbedingungen im Eischtal.

In Koerich können alle Komponenten der Grundwasserströmung im Eischtal und einer angeschlossenen Kluftzone bestimmt werden, wobei unter den beiden Hauptkluftsystemen eine beträchtliche Anisotropie auftritt.

Für die Ruhestromung und für die Grundwasserströmung im Absenkungstrichter in Trois Ponts, der durch die Grundwasserentnahmen aus dem Luxemburger Sandstein-Aquifer während der Pumpversuche erzeugt wurde, werden die Leakage-Anteile berechnet und die Gebirgsdurchlässigkeit der Deckschichten für eine vertikal gerichtete Strömung bestimmt.

Im Rahmen der zusammenfassenden **Diskussion** werden für die Brunnen in Trois Ponts anhand der Verknüpfung der hydraulischen Ruhestromungsbedingungen mit den Grundwasser-Modellaltern sogenannte Transportweiten ermittelt, die durch die Grundwasserentnahmen des Pumpversuchs erzeugt wurden. Mit Hilfe der Pumpversuchsdauer werden mit diesen Entfernungsangaben Grundwasserströmungen berechnet. Die hierbei errechneten Durchlässigkeiten stimmen größenordnungsmäßig mit den Kluftdurchlässigkeiten am Standort Koerich überein.

Die **Kombination von hydrochemischen Daten mit Isotopengehalten** führt zur Erkennung von Grundwassermischungsreihen. Am Standort Koerich werden längerfristige anthropogene Veränderungen aufgezeigt und lokale entnahmebedingte Veränderungen erkannt.

Die Auswertung der **hydrochemischen Befunde** untermauert die aufgestellten Zusammenhänge. So treten z.B. in den Deckschichten Ionenaustauschprozesse auf. Ein hydrochemischer Leakage-Nachweis, der auf der noch natürlich geringen Chloridkonzentration ($< 5 \text{ mg/l Cl}^-$) der Luxemburger Sandstein-Wässer aus Trois Ponts basiert, war nicht zu führen. Für die Sauerstoff- und Nitratfreiheit dieser Grundwässer werden wahrscheinliche, chemische und mikrobielle Reaktionspfade angeführt.

Dem "tracer-fundierten" Systemverständnis eines Grundwasserleiters mit Input (Niederschläge→Infiltration→Grundwasserneubildung), mit unterirdischem Transport (A_{u}) und mit anschließendem Grundwasseraustritt (Output) folgend, erfassen die vorliegenden Untersuchungen alle Komponenten der Grundwassersysteme an den Standorten Koerich und Trois Ponts. Die prägnanten und z.T. äußerst detaillierten Informationen zu diesen unterirdischen Abflusssystemen im Kluftgrundwasserleiter, Luxemburger Sandstein, werden abschließend zu einer übergreifenden **Synthese** zusammengeführt.

Abstract

The present investigations were concentrated primarily on the Koerich and Trois Ponts sites within the framework of the new peak demand and emergency water supply of Luxembourg, the so-called *solution de recharge* (substitute solution). For the purpose of a supra-regional comparison, the isotope-hydrological investigations and the related chemical data for the other sites Everlange (aquifers in sandy, so-called boundary facies of the Trias) and Schaedhaff (overlaid Luxembourg sandstone) were also incorporated.

Both sites use the Luxembourg sandstone (sandy facies of the Lower Lias) as aquifer. In Koerich a regional, flat-wavy, flexure-type stratum (synclinal and anticline formation in LUCIUS 1948) of the sandstone in situ and weathered sandstone gives rise to the large groundwater availability in the "syncline low-point" and the great wealth of perennial springs - where these depression zones are cut into by erosion forms of the Eisch valley down to the sandstone base. The Luxembourg sandstone formation dips to the south with the stratum stage landscape, and so in Trois Ponts a confined, unweathered fissured aquifer which is 72 m thick on average is opened up already below 30-70 m thick, marly clay overlying strata. In natural state of rest there is a groundwater divide in the area of Trois Ponts, so that the piezometric surface of the Luxembourg sandstone aquifer is aligned to the north on the Eisch valley and to the south-east to a supra-regional fault zone. Independent groundwater levels have been demonstrated in the siltstone series and the alternating marly rock and limestone sequence of the overlying strata.

Hydraulic investigations conducted took the form of separate pumping tests lasting a number of weeks and covering in each case the whole site. These were accompanied by sampling operations organised in quick succession for the chemical and isotope-hydrological investigations. The independent evaluations in the concluding discussion lead to a reciprocal plausibility check and combine to form a system conception beyond the bounds of the individual sites.

Through the use of natural tracers, so-called environmental isotopes (^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C , ^{14}C), the **isotope methods** results in a differentiation of the input (precipitation) and the groundwater samples (output), to grouping within the groundwater samples and finally to a time-based delimitation of the groundwaters sampled (mean residence times, groundwater model ages). A regional-climatological classification and the seasonal occurrence of an effective groundwater recharge are discussed. The site-specific differences in the deuterium and oxygen-18 contents are attributed to climatic conditions at the times of groundwater recharge. The agreement between these results and those of the hydraulic investigations confirm that they are close to reality.

In Koerlich the transition from a young "3-component groundwater mixing system", characterised by precipitation to a leakage-affected older groundwater is highlighted. With the PC-aided use of so-called "lumped parameter" models, the mean residence times of these groundwaters are differentiated in such a way that portions of the respective mean residence time accounted for by the residence time groups (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) are considered. Taking the tritium-free groundwaters from Trois Ponts, the influence of leakage waters subject to a clear (carbon) isotope exchange is highlighted and discussed.

The **hydraulic investigations** describe and quantify the different flow systems. They encompass the hydrogeological (aquifer) characteristics, taking account of the respective natural

groundwater transfers from the "leaky" overlying strata and considering also the influent/effluent flow conditions in the Eisch valley.

In Koerich all components of the groundwater flow in the Eisch valley and of a connected fracture zone can be determined; a considerable anisotropy occurs between the two main fracture systems.

The leakage portions are calculated for the at-rest flow and for the groundwater flow in the cone of influence in Trois Ponts, which was produced by the groundwater withdrawal from the Luxembourg sandstone aquifer during the pumping test, and the rock mass permeability of the overlying strata for a vertically directed flow.

In the concluding discussion, so-called transport distances produced by the groundwater withdrawal of the pumping tests are determined for the wells in Trois Ponts by connecting the hydraulic at-rest flow conditions with the groundwater model ages. With the duration of the pumping test, groundwater flows are calculated using this distance data. The permeabilities calculated here agree in terms of general magnitude with the fracture permeabilities at the Koerich site.

The **combination of hydrochemical data and isotope contents** reveals groundwater mixing series. At the Koerich site, longer-term man-made changes are highlighted and local, withdrawal-related changes are recognised.

Analysis of **hydrochemical findings** underpins the relations set up. For example, ion exchange processes occur in the overlying strata. It was not possible to provide a hydrochemical leakage verification based on the still naturally low chloride concentration ($<5 \text{ mg/l Cl}^-$) of the Luxembourg sandstone groundwater from Trois Ponts. With regard to the freedom from oxygen and nitrate in these groundwaters, probable chemical and microbial reaction paths are mentioned.

In accordance with the "tracer-based" system concept of an aquifer with input (precipitation \rightarrow infiltration \rightarrow groundwater recharge), with underground transport (A_u) and subsequent discharge (output), the present investigations encompass all components of the groundwater systems at the Koerich and Trois Ponts sites. The pregnant and partly extremely detailed information on these underground runoff systems in the fissured aquifer, Luxembourg sandstone, are finally brought together to form an overall *synthesis*.

Résumé

Dans le cadre de la solution de recharge pour l'alimentation en eau potable pendant la période de vidange du lac d'Esch-sur-Sûre de nouvelles ressources en eau souterraine furent mises en exploitation. Depuis la remise en eau du lac, ces ressources servent à l'alimentation de pointe et la solution peut fonctionner comme alimentation en eau d'urgence (de secours). Les recherches décrites dans le présent ouvrage se concentrent sur les sites "Trois Ponts" et "Koerich". En vue d'une interprétation plus extensive les analyses chimiques et isotopiques s'étendent sur le site "d'Everlange" (aquifère du faciès de bordure du Trias) et "Schaedhaff" (Grès de Luxembourg sous couverture peu perméable).

Les deux sites examinés, exploitent l'aquifère du Grès de Luxembourg (faciès gréseux du Lias inférieur). A Koerich la forte disponibilité en eau est liée à des structures en anticlinal et synclinal à grand rayon de courbure (Lucius 1948) et se situe dans les zones synclinales, notamment aux endroits où l'érosion de l'Eisch recoupe la base du Grès. En accord avec le paysage à côté, dû à la structure du bassin de Paris, la formation du Grès de Luxembourg accuse un léger pendage vers le Sud. Il en résulte qu'à Trois Ponts, l'aquifère du Grès de Luxembourg, qui est un aquifère perméable par fissuration, d'une épaisseur moyenne de 72 m, est recouvert par 30 à 70 m de terrain argilo-marneux et la nappe du Grès est sous pression. En situation non-exploitée, le niveau repos de la nappe souterraine accuse, à partir d'une ligne de crête, un pendage vers le Nord, en direction de la vallée de l'Eisch, et vers le Sud-est en direction d'une zone fracturée à caractère régional. Les formations d'argilites et d'alternance de marnes et calcaires des terrains de couverture montrent des niveaux de nappes d'eau souterraine, qui sont indépendants de celui du Grès de Luxembourg.

Comme examens hydrauliques on a réalisé des essais de pompage qui s'étalaient sur plusieurs semaines et qui étaient répartis sur l'ensemble du site. Pendant ces essais de pompage on procédait à un échantillonnage en vue d'analyses chimiques et isotopiques. L'examen des résultats, représenté dans le chapitre "résumé et discussion", permet une compréhension de l'ensemble du système, dépassant le site et un contrôle des causes (Plausibilitätskontrolle).

Par l'utilisation de traceurs naturels ^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C , ^{14}C , les méthodes isotopiques mènent à la différenciation entre les "input" (précipitation) et les "output" (échantillons d'eau souterraine) et le groupement des échantillons d'eau souterraine, permettent d'établir le temps de séjour moyen, et de déterminer un âge modèle. On discute une classification climatique régionale et l'apparition d'un renouvellement saisonnier des eaux souterraines. Les différences pour chaque site, relatives aux teneurs en deutérium et en ^{18}O , sont dues aux conditions climatiques lors de la formation de ces eaux souterraines. La coïncidence de ces résultats avec ceux des examens hydrauliques confirme la proximité avec la réalité (Realitätsnähe).

Sur le site de Koerich, la transition d'une eau jeune, caractérisée par un mélange d'eaux souterraines à trois composants, à une eau plus ancienne influencée par des eaux de fuite (leakage) devient apparente. Par l'utilisation de modèles "lumped-parameter", sur base informatique, les temps de séjour moyens des eaux souterraines peuvent être différenciés et comparés à des parties de groupes de séjour (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a). Sur les eaux exemptes de tritium du site de Trois Ponts, l'influence des eaux par "leakage" qui ont subi un échange d'isotopes de carbone très net, est montrée et discutée.

Les recherches hydrauliques décrivent et qualifient les différents systèmes de courants souterrains. Elles comprennent les paramètres hydrogéologiques des aquifères et tiennent compte des débordements naturels provenant des fuites (leakage) des couches de couverture et des conditions des courants influents et effluents dans la vallée de l'Eisch. A Koerich toutes les composantes des courants d'eau souterraine de la vallée de l'Eisch et d'une zone de fracture adjacente peuvent être déterminées. Il existe une forte anisotropie entre les deux principaux systèmes de diaclases. Sur le site de Trois Ponts on a calculé la part du leakage et la perméabilité verticale des couches de couverture pour la situation repos et la situation de pompage.

Dans le chapitre portant sur la discussion des résultats, on a déterminé pour les puits de Trois Ponts, en se basant sur les relations des conditions de transfert en situation de repos et les âges modèles des eaux, des distances de transport dues aux prélèvements d'eau lors des essais de pompage. Avec l'aide des durées des essais de pompage et des distances parcourues, on a calculé des vitesses d'écoulement. Les perméabilités ainsi calculées ont un ordre de grandeur analogue, que les perméabilités de fissures calculées pour le site de Koerich.

La combinaison de données hydro-chimiques et des teneurs en isotopes, mène à l'identification de séries de mélanges d'eaux souterraines. Sur le site de Koerich on constate des changements anthropogènes de longue échéance et des changements locaux dus aux débits pompés.

L'exploitation des résultats hydro-chimiques confirme les combinaisons supposées. Ainsi on a constaté dans les couches de couverture des échanges d'ions. Sur le site de Koerich une preuve hydro-chimique d'un leakage, basé sur la faible concentration naturelle des chlorures ($< 5 \text{ mg/l Cl}^-$) des eaux du Grès de Luxembourg n'a pas pu être apportée. En ce qui concerne le manque en oxygène et en nitrates de ces eaux souterraines, on les explique par des réactions chimiques et bactérielles.

En se basant sur le système applicable par traceurs avec input (précipitations infiltrations formation d'eaux souterraines), transport sous terrain (A_{ij}) et émergences d'eaux souterraines (output), les recherches effectuées impliquent toutes les composantes du système d'eaux souterraines des sites de Koerich et de Trois Ponts. Les informations conquises et partiellement très précises de ce système d'écoulement dans l'aquifère perméable par fissuration du Grès de Luxembourg sont représentées en conclusion dans la **synthèse**.

traduisé en français par J. Bintz

Inhalt

Vorwort

Kurzfassung, Abstract, Abstraction

1	Einführung	1
1.1	Entwicklung der Wasserversorgung Luxemburgs	1
1.2	Einbindung in die <i>solution de recharge</i>	4
1.3	Untersuchungsansätze	5
2	Überblick zur Hydrogeologie Luxemburgs	7
2.1	Geologischer Bau	7
2.1.1	Trias	9
	<i>Die Randfazies der Trias</i>	9
2.1.2	Jura	10
2.1.3	Gebirgsbau	12
2.2	Klima in Luxemburg	13
3	Hydrogeologie der Standorte Koerich und Trois Ponts	16
	<i>Eisch</i>	24
4	Hydraulische Untersuchungen	26
4.1	Trois Ponts	28
4.1.1	Ausgangssituation	28
4.1.1.1	Grundwassertemperaturprofile	30
	<i>Profildarstellung</i>	30
	<i>Beziehung: Grundwasser-Temperatur / -Strömung</i>	32
	<i>Grundwasserströmung, Trois Ponts</i>	32
4.1.2	Pumpversuche in Trois Ponts	33
	<i>Ruhepegel, GwGleichenplan 16.03.1990</i>	33
	<i>GwGleichenplan 25.05.1990, Ende Pumpversuch I</i>	34
	<i>GwGleichenplan 23.08.1990, Ende Pumpversuch II</i>	34
4.1.2.1	Wiederanstieg Pumpversuch I	40
	<i>Wiederanstiegsverfahren nach THEIS</i>	40
	<i>HANTUSH'sche Wendepunktmethode</i>	42
4.1.2.2	Absenkung Pumpversuch I	43
	<i>Änderung der Entfernungen</i>	44
	<i>Angewendete Korrekturen</i>	45
	<i>Geradlinienverfahren nach COOPER & JACOB</i>	47
	<i>HANTUSH'sche Wendepunktmethode</i>	52
4.1.2.3	Abgeleitete geohydraulische Größen	54
	<i>Spezifischer Speicherkoeffizient, li_2 in Trois Ponts</i>	54
	<i>Barometrischer Koeffizient, li_2 in Trois Ponts</i>	54

	<i>Wirksamer Hohlraumanteil, li_2 in Trois Ponts</i>	55
	<i>Hydraulische Leitfähigkeit, li_3</i>	57
	<i>Gesteinsdurchlässigkeit, li_3</i>	57
	<i>Hydraulischer Widerstand, li_3</i>	57
4.1.3	Verhalten des GwLeitersystems in Trois Ponts	58
	<i>Natürliche Grundwasserströmung</i>	58
	<i>Natürliches Leakage</i>	58
	<i>Gültigkeit des DARCY'schen Gesetzes</i>	58
	<i>Grundwasserneubildung</i>	59
	<i>Stationäre GwStrömung während der Absenkungsphase</i>	59
	<i>Einzugsbereich und Leakage Pumpversuch I Trois Ponts</i>	59
	<i>Reichweite PV I Trois Ponts</i>	60
4.2	Koerich	62
4.2.1	Geohydraulische Abflußsysteme in Koerich	62
4.2.1.1	Abflußsystem der Eisch, A_o	62
4.2.1.2	Grundwasserströmung in Koerich, A_u	66
	<i>Spezielle hydrogeologische Bedingungen</i>	66
	<i>Unterirdischer Abfluß</i>	67
	<i>A_u in Muldenzone und Eischtal</i>	68
4.2.2	Zeiten der Grundwasserneubildung	69
4.2.3	Pumpversuche in Koerich	70
	<i>GwSpiegelvariationen durch Pumpversuch I und II</i>	71
	<i>Annahmen zur Pumpversuchsauswertung</i>	73
	<i>Angewendete Auswerteverfahren</i>	74
4.2.3.1	Brunnen und Piezometer im Eischtal	77
	<i>Speicherkoeffizient</i>	77
	<i>HANTUSH'sche Wendepunktmethode</i>	78
4.2.3.2	Brunnen KBR3	78
4.2.3.3	Brunnen KBR4	78
4.2.3.4	Aquiferkennwerte für Koerich	79
4.2.3.5	Abgeleitete geohydraulische Größen	79
	<i>Nutzbarer Hohlraumanteil, li_2 Koerich</i>	79
	<i>Stationäre Strömung während der Absenkungsphasen</i>	81
	<i>Anteile von Eischinfiltrat</i>	82
	<i>a) bei ungestörter Strömung im Eischtal</i>	
	<i>b) bei ausgebildeten Absenkungstrichtern im Eischtal</i>	82
5	Isotopen-Methoden	83
5.1	Sauerstoff-18 und Deuterium	84
5.1.1	Meßwerte	84
5.1.2	Auswertung / Interpretation	87
	<i>Trois Ponts und Koerich</i>	87
	<i>Input: aktuelle Niederschläge</i>	87
	<i>Br.-Sidor</i>	96
	<i>Everlange</i>	97

5.2	Tritium	97
5.2.1	Meßwerte	101
5.2.2	Auswertung / Interpretation	102
	<i>Trois Ponts und Koerich</i>	102
	<i>Schaedhaff</i>	103
	<i>Everlange</i>	105
5.2.3	Modellrechnungen	105
5.2.3.1	Piston-Flow-Modell	107
5.2.3.2	Exponentialmodell	108
5.2.3.3	Exponential-Piston-Flow-Modell	108
5.2.3.4	Inputdaten für Modellrechnungen	109
5.2.3.5	Ergebnisse der Modellrechnungen	109
5.2.3.6	Komponenten der Mittleren Verweilzeit	114
	<i>Koerich</i>	114
	<i>Schaedhaff</i>	117
	<i>Everlange</i>	118
5.3	Kohlenstoff-14; Kohlenstoff-13	120
5.3.1	Meßergebnisse	120
5.3.2	Bestimmung des Grundwassermodellalters nach der ¹⁴C-Methode	121
5.3.2.1	Chemiemischungsmodell	122
5.3.2.2	Isotopenmischungsmodell	122
5.3.3	Auswertung / Interpretation	122
5.4	Kombination von Isotopen-Methoden mit hydrochemischen Daten	127
	<i>Trois Ponts und Koerich</i>	127
	<i>Schaedhaff</i>	129
	<i>Everlange</i>	129
5.5	Hinweise auf Klimabedingungen: Quartär, Holozän	132
6	Hydrochemische Untersuchungen	137
6.1	Beprobung / Analytik	137
6.2	Ergebnisse / Aussagen	138
6.2.1	Grund- und Oberflächenwässer Luxemburgs	138
	<i>Grundwassertypen</i>	138
	<i>Schaedhaff</i>	138
	<i>Everlange</i>	138
6.2.2	Trois Ponts	138
6.2.3	Koerich	141
7	Zusammenfassung und Diskussion	155
	<i>Einfluß von Leakage auf die ¹⁴C-Modellalter der Grundwässer in</i>	164
	<i>Trois Ponts</i>	
	<i>Grundwassertransport während PVI in Trois Ponts</i>	165
	<i>Kluftdurchlässigkeiten in Trois Ponts</i>	166

8	<i>Synthese</i>	169
	<i>Synthesis</i>	172
	<i>Synthèse</i>	175
	Literaturverzeichnis	179
Anhang	ISOTOPEN - Daten Luxemburg	189
Anlage 1	Generalisierte Darstellung regionalgeologisch bedeutender Einheiten im Hinblick auf die <i>solution de recharge</i> in Luxemburg, nach R. Maquil, Serv. Géol. Lux.	

1 Einführung

Die auf Grundwasser basierende Not- und Spitzenbedarfs- Wasserversorgung Luxemburgs, die sog. *solution de recharge*, wurde während ihrer Aufbau-, Test- und Betriebsphase von den vorliegenden Untersuchungen begleitet. Als generelle Aufgabe war vorgesehen, neben der Dokumentation des Ausgangszustandes, Veränderungen zu erfassen, die durch die Grundwasserentnahmen erzeugt werden. Die hydrogeologischen Untersuchungen umfassen die Durchführung und Auswertung hydraulischer Versuche, die Gewinnung, Auswertung und Interpretation hydrochemischer Analysen, die Anwendung von Isotopen-Methoden und, ergänzend am Standort Trois Ponts, die Aufnahme geothermischer Profile. Den lokalen Untersuchungsschwerpunkt bilden die Standorte Koerich und Trois Ponts (siehe Anlage 1), während die Standorte Schaedhaff und Everlange vornehmlich der überregionalen Interpretation der Daten aus den angewendeten Isotopen-Methoden dienen.

Im folgenden wird zunächst auf die **Entwicklung der Wasserversorgung Luxemburgs** bis hin zu Planung und Aufbau der *solution de recharge* eingegangen. In diesem und im folgenden Punkt, der **Einordnung der Untersuchungen in die *solution de recharge***, werden die notwendigen Informationen zum infrastrukturellen und geologischen Rahmen gegeben, so daß die **Untersuchungsansätze** anschließend genügend prägnant und im Detail vorgestellt werden können.

1.1 Entwicklung der Wasserversorgung Luxemburgs seit 1900

Die Wasserversorgung Luxemburgs erhielt bereits um die Jahrhundertwende durch die Gründung des *Syndicat d'eau intercommunale pour les cantons de Capellen et d'Esch-sur-Alzette* (1908) einen regionalen Charakter. Von der 1911 fertiggestellten Pumpstation im Eischtal bei Koerich wurde anfangs die industriell stark aufblühende Minette-Region versorgt. Heute beliefert die SES, *Syndicat des Eaux du Sud*, von Koerich aus den Süden Luxemburgs, in dem etwa 1/3 der Landesbevölkerung lebt.

Die weitere Entwicklung der Wasserversorgung Luxemburgs ist eng an die hydrogeologischen Verhältnisse dieses geologisch zweigeteilten Landes gebunden.

Der an Grund- und Trinkwasser arme, aus devonischen Schichtfolgen aufgebaute Norden Luxemburgs, das Ösling, wird seit 1929 von der DEA (*Syndicat de Distribution d'Eau des Ardennes*, vormals *Syndicat pour la Conduite d'Eau des Ardennes*) auch mit Quellwasser aus dem Luxemburger Sandstein versorgt. Die in den Jahren von 1936 bis 1960 gegründeten fünf weiteren Wassersyndikate versorgen, ebenfalls mit Quellwasser aus dem Luxemburger Sandstein, die im Osten des Landes, im Verbreitungsbiet von Muschelkalk und Keuper liegenden Kommunen.

Da die Trinkwasserbereitstellung in die kommunale Zuständigkeit fällt, werden in den meisten Gemeinden Anteile aus lokalen Trinkwasservorkommen dem zugelieferten Wasser beigemischt. Die im Ausstrichbereich des Luxemburger Sandsteines liegenden Gemeinden können sich weiterhin aus eigenen Quellfassungen autark versorgen. In der Zeit von 1936 bis 1960 entstanden folgende regionale und kommunale Trinkwasserverbände: **SESE** (1936: *Syndicat pour la Conduite d'Eau du Sud-Est*), **SER** (1949: *Syndicat pour la Distribution d'Eau dans les Communes de Bous, Remich et Waldbredimus*), **SEE** (1950: *Syndicat de Communes pour la Construction, l'Exploitation et l'Entretien de la Conduite d'Eau de l'Est*), **SELW** (1955: *Syndicat pour la Conduite d'Eau Intercommunale des Communes de Lenningen et de Wormeldange*), **SEG** (1960: *Syndicat de Communes pour la Construction,*

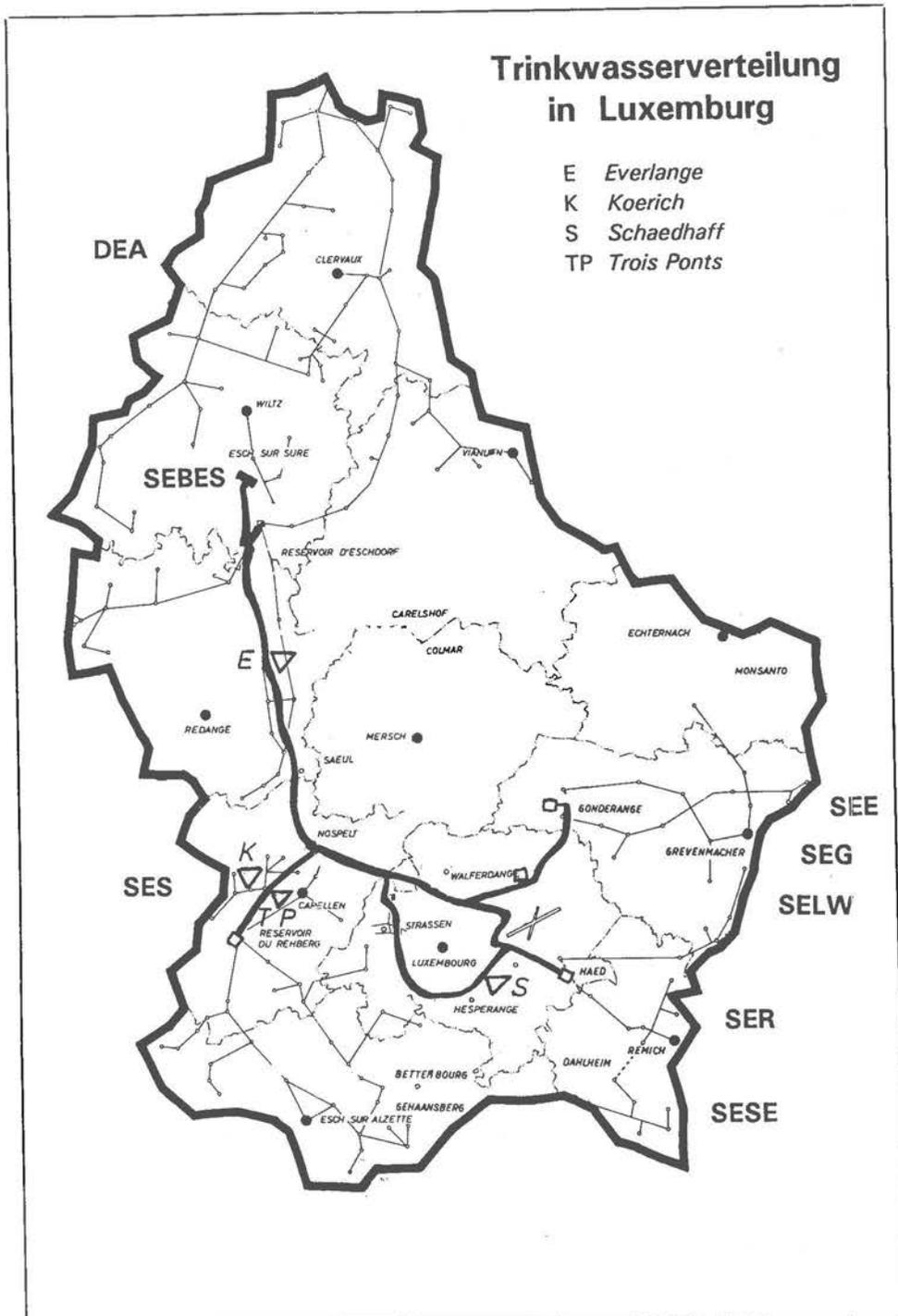


Abb. 1: Trinkwasserverteilung in Luxemburg mit SEBES-Hauptleitung und Verteilungsnetzen regionaler Trinkwasserverbände

l'Exploitation et l'Entretien d'une Distribution d'Eau des Communes de Grevenmacher, Biver, Rodenbourg et Flaxweiler). Ein steigender allgemeiner Wasserbedarf und starke saisonale Schwankungen im Trinkwasserverbrauch führten 1962 zur Gründung eines überregionalen, landesweiten Wasserversorgungsunternehmens, der SEBES (*Syndicat des Eaux du Barrage d'Esch-sur-Sûre*) durch die Stadt Luxemburg und die oben genannten Wassersyndikate. Die SEBES bereitet seit 1969 das Oberflächenwasser des Stausees von Esch/Sauer zu Trinkwasser auf. Die Talsperrre wurde in den Jahren von 1955 - 58 im oberen Sauer in den Ardennen gebaut und hat heute neben der Trinkwasserversorgung, dem Hochwasserschutz und der Energiegewinnung, auch touristische Bedeutung.

Über die Fernwasserleitung bzw. über die an den Vorratsbehältern der SEBES angeschlossenen regionalen und lokalen Verteilernetze werden ca. 75% der ca. 360.000 Einwohner Luxemburgs mit Trinkwasser aus diesem Wasserverbund versorgt. Der Trinkwasserverbrauch wird heute im Normalbetrieb zu 30% aus Oberflächenwasser und zu 70% aus Grundwasser gedeckt, wobei ca. 90% des Grundwassers den Quellen des Luxemburger Sandsteines entstammen.

Der großen Bedeutung des Luxemburger Sandsteines als Grundwasserspeicher wurde mit einer Reduzierung der einstmaligen großen Anzahl an Steinbrüchen (über 100) auf einige wenige Betriebe Rechnung getragen.

Der tägliche Wasserverbrauch Luxemburgs (incl. Industrie) liegt im Mittel bei 125.000 m³. Davon kommen durchschnittlich 37.000 m³ aus dem Stausee bei Esch/Sauer. Saisonale Verbrauchsschwankungen mit einem Spitzenbedarf von mehr als 70.000 m³/Tag werden ebenfalls mit Wasser aus dem Stausee abgedeckt. Wasserabgaben der SEBES von mehr als 50.000 m³/Tag fallen in die Zeit von Mitte Juni bis Mitte August. Wasserabgaben mit mehr als 60.000 m³/Tag sind in diesem Zeitraum auf zwei bis drei Wochen von Ende Juni bis Anfang Juli begrenzt. Daraus ergibt sich ein sog. Spitzenverbrauchs faktor von ca. 2.

Als letzten großen Schritt zu einer langfristigen Sicherung der Trinkwasserversorgung Luxemburgs wurde in Februar 1991 eine auf vier Grundwassergewinnungsanlagen basierende Not- und Spitzenbedarfs- Wasserversorgung fertiggestellt.

Dieses System hat mit einer Gesamtkapazität von ca. 50.000 m³/Tag den Großteil der Wasserentnahme aus dem Stausee für die Dauer eines Jahres ersetzt. Während dieser Zeit wurde der Stausee entleert, so daß die seit dem Bau der Bogenstaumauer bestehenden, konstruktionsbedingten Undichtigkeiten saniert werden konnten.

Diese Aufgabe stellte den Namen für das neue Wasserversorgungssystem bereit: *solution de rechange* (Ersatzlösung), unter dem bereits die Arbeiten zum Aufbau und zur Fertigstellung dieser aus Tiefbrunnen fördernden Anlagen durchgeführt wurden. Nach dem Wiederaufbau der Sauer im Herbst/Winter 1991/92 werden die vier Anlagen der *solution de rechange* in einem zentral gesteuerten sog. "standby-Betrieb" als kurzfristig einsetzbare (Not-) Wasserversorgung bei Störfällen oder zur Deckung des Spitzenbedarfs eingesetzt. Dies können technische Störungen sein, wie z.B. Defekte an der Hauptversorgungsleitung oder Pannen in der Oberflächenwasseraufbereitungsanlage, oder es sind Störfälle denkbar, die sich aus dem allgemeinen Risiko bzw. aus der Verschmutzungsempfindlichkeit eines Oberflächengewässers ergeben.

Die Voruntersuchungen für die Grundwasserentnahmen gehen auf das Jahr 1965 zurück, dem Start einer Bohrkampagne im Gutland durch den Service Géologique de Luxembourg. Die Bohrungen hatten zum Ziel, erste Informationen im Hinblick auf eine mögliche (Trink-) Wasserführung von den bis dato nur im Anstehenden bekannten mesozoischen Schichtfolgen zu liefern. In den Jahren 1968, 1972 und 1979 wurden bei Mersch, am Rehbierg bei Hivange und bei Bettborn Bohrungen niedergebracht, die bei 313 m, bei 694 m und bei 100 m Teufe die mesozoische Schichtfolge durchfahren und den Devon-Sockel erreicht haben. Mittels der Erkenntnisse aus diesen Bohrungen konnte der Service Géologique letztlich fünf Standorte vorschlagen, die Grundwasser in Trinkwasserqualität bei ausreichender Höffigkeit versprochen und zudem in der Nähe einer bestehenden Fernwasserleitung liegen.

Es wurde bis Juli 1985 eine Probebohrung mit Pumpversuch an jedem dieser Standorte durchgeführt und im Dezember desselben Jahres mit den Bohrarbeiten für die 19 Förderbrunnen und 18 Grundwassermeßstellen der Standorte Everlange, Trois Ponts, Koerich und Schaedhaff begonnen. Der Standortvorschlag Cloche d'Or wurde aus politisch-ökonomischen Gründen zu-

gunsten einer Wasserentnahme aus der fließenden Welle der Sauer bei Esch/Sauer nicht verwirklicht (u.a. Nutzung der bestehenden Oberflächenwasseraufbereitungsanlage der SEBES).

Diese Entscheidung bedingt, daß bei einer länger andauernden Trockenwetterperiode Wassersparmaßnahmen angeordnet werden müssen. Denn die Entnahme von 10.000 m³/Tag aus der Sauer muß aus ökologischen Gründen bei einer Wasserführung von 500 l/sec eingestellt werden. Diese Niedrigwasserführung kann bei dem während der Bauphase bestehenden natürlichen Trockenwetterabfluß (kein Niedrigwasserausgleich) relativ schnell erreicht werden, da das Einzugsgebiet der Sauer mit flachgründigen Böden auf den devonischen Schichtfolgen vom Oberflächenabfluß geprägt ist. Für den Spitzenwasserbedarf stehen in diesem Fall nur die 50.000 m³/Tag der vier neuen Standorte zur Verfügung. Ein darüber hinaus gehender Wasserbedarf muß durch Sparmaßnahmen verhindert werden.

Am Standort Everlange nutzen die Brunnen mehrere artesisch gespannte wasserführende Horizonte einer in sog. Randfazies ausgebildeten Triasabfolge. Das hier geförderte Wasser hat ein geringes Sauerstoffdefizit und bedarf einer Belüftung, um die Trinkwassernorm zu erfüllen. An den Standorten Trois Ponts und Schaedhaff und in der Probebohrung in Cloche d'Or (südl. Stadtrand Luxemburgs) wurde ein von Tonsteinserien überdeckter, unverwitterter Luxemburger Sandstein erschlossen, in dem ein gespanntes, z.T. artesisches, reduziertes (O₂-armes bis -freies) Grundwasser angetroffen wurde. Dieses Wasser muß belüftet werden und anschließend eine Enteisung und Entmanganung durchlaufen. In Koerich wird aufgrund einer muldenartigen Struktur ein freier, aus verwittertem Luxemburger Sandstein bestehender Grundwasserleiter genutzt, der auch die zahlreichen perennierenden Quellen speist.

Die im Anschluß an die Grundwassererschließung in Everlange, Trois Ponts und Schaedhaff erstellten Gebäude und technischen Anlagen wurden Anfang 1991 fertiggestellt, so daß Mitte Februar 1991 die Anlagen der *solution de recharge* in Betrieb genommen wurden und die Entleerung des Stausees (15.02. bis 18.03.91) durchgeführt werden konnte. Die Sanierungsarbeiten an der Staumauer waren bis zum Beginn des Winters 1991 soweit abgeschlossen, daß mit dem Wiederaufstau begonnen werden konnte. Mit der Entnahme von Talsperrenwasser zur Trinkwasseraufbereitung wurde nach Erreichen der halben Stauhöhe begonnen. Aufgrund des niedrigen Wasserbedarfs in den Herbst- und Wintermonaten konnten die Grundwasserförderungen an den neuen Standorten bereits im Herbst gedrosselt werden.

1.2 Einbindung in die *solution de recharge*

Die Einbindung der Untersuchungen des Autors, die nur z.T. in dieser Dissertation verarbeitet sind, in die *solution de recharge* ist mit dem Fortschreiten der Fertigstellung der technischen Anlagen zur Grundwasserförderung und -aufbereitung stetig enger geworden, wobei der Arbeitsumfang in gleichem Maß zunahm.

Ausgangspunkt der Aktivitäten im Rahmen der *solution de recharge* war der Wunsch des Service Géologique de Luxembourg, möglichst viele wissenschaftlich verwertbare, fundierte Informationen über den gespannten Aquifer des unverwitterten Luxemburger Sandsteines zu bekommen. Ein besonderer Anreiz war der Umstand, daß dieser Aquifer durch die Brunnen in Trois Ponts zum ersten Mal erschlossen wurde. Im Rahmen der Fertigstellung der Anlagen zur Grundwasserförderung war es notwendig, Anlagentests durchzuführen. Da sich über ca. 2 Jahre, seit dem Bau der Förderbrunnen, wieder die natürliche unbeeinflusste Grundwasserströmung eingestellt hatte, sollten diese Tests als kontrollierte Pumpversuche ablaufen und den Aus-

gangszustand erfassen und belegen. Einflüsse dieser oder der später länger andauernden Grundwasserentnahmen auf das nordwestlich liegende Gebiet, in dem diese Schichten ausstreichen, sind denkbar. Dies ließ die gleichzeitige Untersuchung des Gebietes um Koerich notwendig werden, wobei dann auch die projektierten Grundwasserentnahmen in Koerich überprüft werden konnten. Das Grundwassersystem in Koerich wird von folgenden hydraulisch verknüpften Faktoren bestimmt: von den Quellen und ihren Schüttungen, von den effluenten Strömungsbedingungen im Eischtal, von einem mulden- und sattelartigen Relief im Untergrund des Sandsteines und vom sog. "Tiefenwasser". Wechselwirkungen zwischen der Grundwasserförderung aus den neuen Bohrbrunnen und diesen Faktoren über das Kluftsystem waren bereits im Ansatz zu berücksichtigen. Es bestehen nur grobe Vorstellungen über den Übergang vom verwitterten und entkalkten, sich ähnlich wie ein Porengrundwasserleiter verhaltenden Luxemburger Sandstein bei Koerich zum unverwitterten Kluftaquifer in Trois Ponts. So schreibt LUCIUS (1948, S.142): "Wegen der leichten Umwandlung des Pyrites in Eisenoxyd ist die ursprüngliche graublau Farbe des Steines selbst in tiefen Aufschlüssen auf die Kerne der, durch die Klüfte natürlich begrenzten Gesteinsblöcke beschränkt ...".

Die Förderbrunnen wurden bereits beim Bau durch kurze Brunnentests, die eine Brunnencharakteristik ergaben, beansprucht. Mit den ersten Pumpversuchen, noch während des Aufbaus der Grundwassergewinnungsanlage in **Trois Ponts**, sollte der Aquifer aus den oben genannten Gründen erstmals durch eine großräumige Beanspruchung bei einer mäßigen Absenkung über längere Zeit getestet werden. Die Möglichkeit einer Grundwasserergänzung durch einen sog. "Leakage-Effekt" wurde durch den Bau und Betrieb von teufenorientierten Grundwassermeßstellen in den Deckschichten berücksichtigt. Gleichzeitig sollten die neuen Anlagen zur Grundwasserförderung, die automatischen Meßeinrichtungen, deren Datenfernübertragung nach Esch/Sauer und die Anlagensteuerung von Esch/Sauer aus überprüft bzw. benutzt werden, was nicht nur die Einbindung in die engen, sich ständig verschiebenden Zeitpläne der verschiedenen Bauphase, sondern auch eine aufwendige Kalibrierung des elektronischen Wasserspiegelmesssystems durch den Autor mit sich brachte. Basierend auf dem positiven Verlauf des ersten Pumpversuches wurden auf Wunsch des Betreibers die Auswirkungen der Förderung der technisch maximal förderbaren Wassermenge über einige Wochen getestet (projektierte max. kurzzeitige Förderraten).

Jeder Pumpversuch wurde vom Verfasser mit einer detaillierten Beprobung für chemische und isotopenphysikalische Untersuchungen begleitet.

Angeregt durch den insgesamt reibungslosen Verlauf der Untersuchungen in Trois Ponts und Koerich und im Bewußtsein der Einmaligkeit der Situation (natürliche Ausgangszustände), wurden vom Verfasser vergleichbare Untersuchungen auch in Schaedhaff und Everlange durchgeführt. Dies führte zu einer breiteren Basis an chemischen Daten und Isotopen-Werten, die erstmals einen überregionalen Vergleich ermöglichen.

1.3 Untersuchungsansätze

Die generelle Fragestellung nach den Auswirkungen der Grundwasserentnahmen aus dem Luxemburger Sandstein im Gebiet Trois Ponts / Koerich im Rahmen der *solution de rechange* mußte vordringlich unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit angegangen werden. Aus der bereits erwähnten Kausalität, daß die "Ersatzlösungen" den Spitzenbedarf an Trinkwasser nicht vollständig abdecken und eine einzuhaltende Mindestwasserführung der Sauer die Oberflächenwasserentnahme reduzieren kann, sollten die Untersuchungen zunächst eine Überprüfung der Er-

reichbarkeit und Förderbarkeit der projektierten (benötigten) Wassermenge ermöglichen. Die Untersuchungsansätze wurden so ausgewählt, daß - trotz nur lokal ausgerichteter Beobachtungsnetze - Aussagen über den Ausgangszustand und über das Verhalten des Aquifers im Hinblick auf eine längerfristige Beanspruchung möglich sind.

Als genereller Ansatz für die hydraulisch ausgerichteten Untersuchungen wurde die möglichst großräumige Aktivierung des Grundwasserleiters am jeweiligen Standort gewählt, um bei einer zuerst nur mäßigen Absenkung das Verhalten beim Absenkungs- und Wiederanstiegsvorgang in allen Meßstellen beobachten zu können und somit auch einen Eindruck vom Ausmaß der Überlagerungseffekte zu erhalten. Dieser erste Pumpversuch wurde auf allen Brunnen eines Standortes mit ca. $\frac{1}{2}$ der projektierten (maximalen) Fördermenge über ca. 4 Wochen durchgeführt. Der zweite Pumpversuch wurde bei voller Leistung je nach Zeitrahmen auf ca. 2-3 Wochen ausgedehnt. Den Pumpversuchen ging eine Beobachtungsphase des Ruhewasserspiegels mit seinen natürlichen Schwankungen voraus.

Bei Absenkung eines Druckwasserspiegels über einen größeren Bereich, wie in Trois Ponts, können sog. "Leakage-Effekte" auftreten. Hierbei kommt es durch die Umkehrung oder durch die Vergrößerung des Strömungsgradienten zu Wasserübertritten von den geringer durchlässigen Deckschichten in den Grundwasserleiter, die dann, großräumig gesehen, zur Grundwassererneubildung beitragen können. Unter bestimmten Voraussetzungen lassen sich diese Effekte hydraulisch, hydrochemisch oder auch isotopisch nachweisen. Hydrochemische und hydraulische Nachweise von "Leakage-Effekten" sind in den zur Grundwassergewinnung intensiv genutzten "Halterner Sanden" im Münsterland geführt worden (HOFFMANN, LANGGUTH & LARUE 1986; HOFFMANN 1986; MEINERS 1986; LANGGUTH & TRESKATIS 1987). GEYH et al. (1986) ermittelten mit Hilfe von Isotopen-Methoden und hydraulischer Modellierung eine auf "Leakage" zurückzuführende flächenhafte Grundwassererneubildung im Keuper Süddeutschlands.

In Trois Ponts wurden eigens für diese Untersuchungen, im Zentrum des Absenkungsfeldes, drei teufenorientierte Grundwassermeßstellen in den Deckschichten eingerichtet und in alle Untersuchungen einbezogen (TPPg in Abb.7 und Abb.9).

Der Frage nach dem Grundwasserumsatz, dem natürlichem Grundwasserabstrom und dem durch die Entnahmen erzeugten Strömungsfeld, soll auf zwei Wegen nachgegangen werden:

1. Im Laufe der Entnahmen kann sich eine Änderung in der chemischen Komposition der Wässer ergeben, die Rückschlüsse auf Zuflüsse aus dem möglicherweise nicht weit entfernten Einzugsgebiet oder aus den Deckschichten erkennen läßt. Hierzu bietet sich in Trois Ponts das als "natürlicher konservativer Tracer" nutzbare Cl^- -Ion an. Der Chloridgehalt liegt bei den Wässern in Trois Ponts $< 5 \text{ mg/l}$, bei denen aus den Deckschichten bei $12-15 \text{ mg/l}$, in den Quell- und Grundwässern in Koerich bei $10-15 \text{ mg/l}$ und in der Eisch bei 20 mg/l .
2. Bei der Erzeugung von Mischwässern sind in der isotopischen Zusammensetzung der Wässer Veränderungen zu erwarten, die dann oftmals eine aufschlußreiche Interpretation zulassen. Es wurden durch das Labor HYDROISOTOP GmbH, Schweitenkirchen, die folgenden Isotope analysiert: ^3H , ^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^{14}C .

Die Pumpversuche wurden durch ein detailliertes Beprobungsprogramm begleitet, das eine repräsentative Beschreibung des chemischen als auch des isotopischen Ausgangszustandes zuläßt.

Einflüsse der Klüftung auf die (Gebirgs-) Durchlässigkeit, z.B. durch das Auftreten von relativ kleinräumigen aber intensiven Strömungsbahnen, werden in Trois Ponts durch die Aufnahme von Grundwassertemperaturprofilen untersucht.

Waren die Untersuchungen in Trois Ponts mehr auf die Erkennung und Erfassung des Ausgangszustandes und die durch die Grundwasserentnahmen hervorgerufenen Veränderungen ausgerichtet, so mußte bei den Versuchen im freien Fließsystem in Koerich größeres Augenmerk auf das Erkennen von hydraulisch bedingten Wechselwirkungen der am (Grundwasser-) Fließsystem beteiligten Faktoren gelegt werden. So waren z.B. Auswirkungen der Grundwasserentnahmen aus den neuen Bohrbrunnen auf die Quellschüttungen benachbarter Quellen und auf die Strömungsbedingungen in der Eisch-Talaue zu berücksichtigen. Zudem sollte mit den Untersuchungen am Standort Koerich die Existenz eines durch Abflußmessungen und strukturelle Analyse postulierten "Tiefenwassers" (v.Hoyer 1971b) überprüft und gegebenenfalls nachgewiesen werden.

2 Überblick zur Hydrogeologie Luxemburgs

2.1 Geologischer Bau

Das Großherzogtum Luxemburg wird in zwei natürliche, sich in morphologischer, agrologischer und klimatischer Hinsicht deutlich unterscheidende Landschaften, *Gutland* und *Ösling* (*Eislek*) geteilt (BINTZ & MAQUIL 1984). Als Ösling wird der nördliche, zu den Ardennen gehörende und aus paläozoischen Gesteinen aufgebaute Landesteil bezeichnet. Die im Ösling anstehenden Schichtfolgen des Devons reichen stratigraphisch vom Siegen bis ins Ober-Ems und sind aus NE-SW (variszisch) streichenden Schiefen, Quarzsandsteinen und Quarziten aufgebaut. Als Hinweis auf eine erste Erosionsphase des paläozoischen Sockels sind die basalen Geröllhorizonte der Buntsandsteinablagerungen aus aufgearbeitetem permischem Material anzusehen. Die Ausarbeitung der Rumpffläche hat erst mit der relativ stärkeren Heraushebung des Öslings (im Vergleich zum Gutland) während der epirogenen Hebung des gesamten Luxemburger Raumes an der Wende Plio-/Pleistozän eingesetzt und zu einer völligen Ausräumung der mesozoischen Schichtfolgen im Ösling geführt. Das Gutland bildet in Form einer aus mesozoischen Einheiten aufgebauten Schichtstufenlandschaft den Südteil Luxemburgs.

Diese Zweiteilung ist scharf an die Zone der Öslinger Randverbiegung (la flexure marginale du Sud de l'Ösling) gebunden. An diesem flexurartig ausgebildeten, im Generalstreichen (NE-SW) verlaufenden, tektonischen Lineament tauchen die Schichten des paläozoischen Sockels mit flachem Einfallen (5° - 9° , LUCIUS 1950) nach Südwesten unter das mesozoische Deckgebirge ab. Diese Zone ist durch die diskordante Auflagerung mesozoischer Sedimente geprägt. Die mächtigen triassischen und jurassischen Schichtfolgen des Gutlandes bilden das nordöstliche Flankengebiet des seit dem Rhät einsinkenden Pariser Beckens. Das generelle Einfallen der Schichten des Deckgebirges folgt mit 5° nach Südwesten dem Einfallen des paläozoischen Sockels.

Das Ösling ist mit einer flachgründigen Bodenbildung im wesentlichen vom Oberflächenabfluß geprägt. Ausnahmen bilden lokal auftretende geringmächtige alluviale Terrassenschotter mit begrenztem Speichervermögen. In den Sedimentgesteinen des Gutlandes ist dagegen eine reiche Wasserführung anzutreffen. Grundwässer mit Trinkwasserqualität werden aus den in sog. Randfazies ausgebildeten Formationen der Trias und lokal aus den Kalksteinen des Muschelkalks gewonnen. Als Grundwasserspeicher mit großem "Quell-Reichtum" und einer überregionalen Bedeutung für die Trinkwasserversorgung ist die sandige Sonderfazies des unteren Jura, der Luxemburger Sandstein, anzusehen.

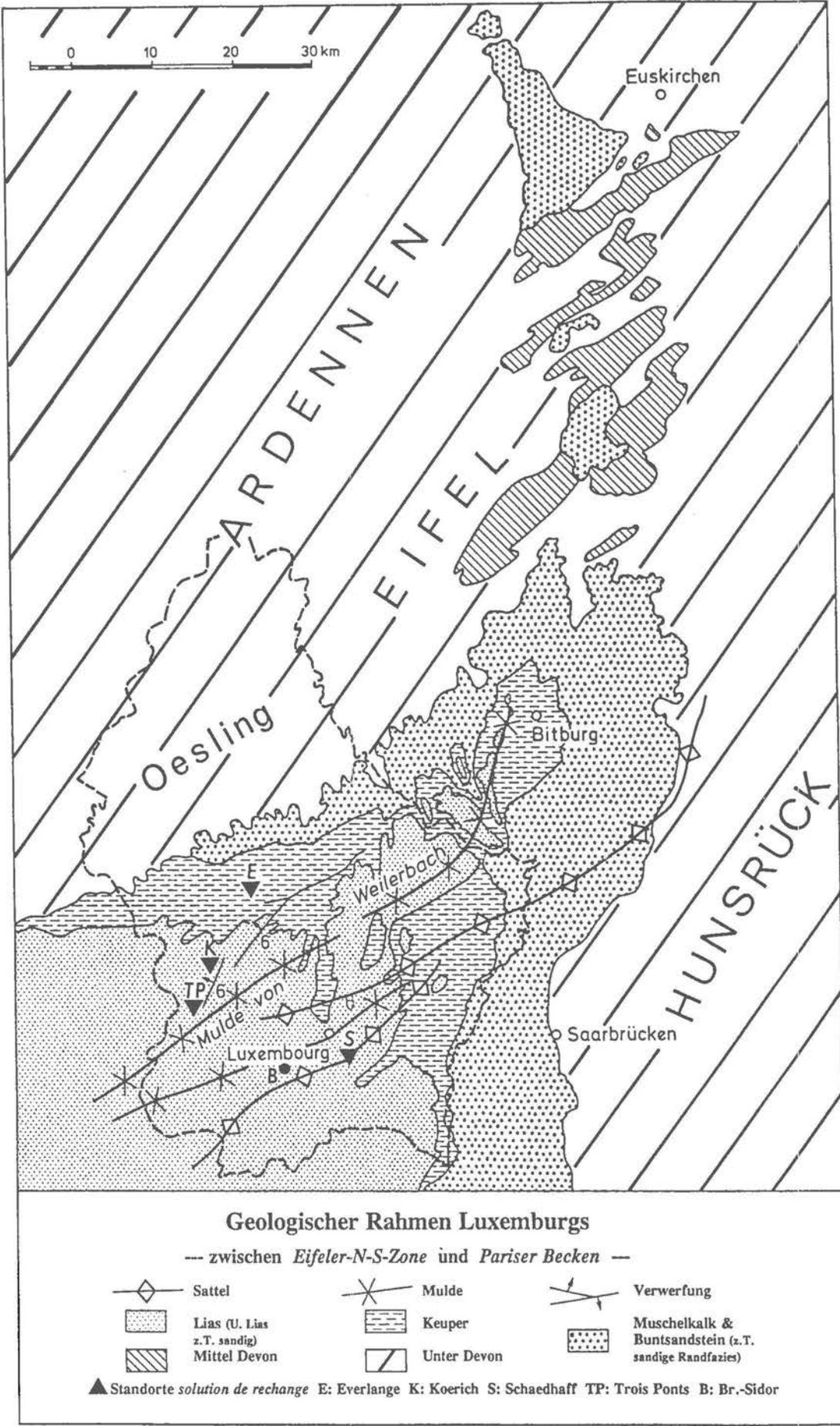


Abb. 2: Geologischer Rahmen Luxemburgs; in Anlehnung an: "Tektonische Übersicht der Eifel-Luxemburger Quersenke", Sonderkarte aus: Carte géologique du Luxembourg, Feuille No.5 Redange 1:25000

Auf die erdgeschichtliche Entwicklung bezüglich der lithofaziellen Bedingungen und der strukturellen Besonderheiten (worauf letztlich die Wasserversorgung Luxemburgs beruht) dieses immer randlich mit großen geologischen Strukturen in Verbindung stehenden luxemburgischen Sedimentationsraumes wird nicht näher eingegangen. Der interessierte Leser wird auf die Veröffentlichungen des Service Géologique de Luxembourg, auf BINTZ et al. (1973) oder (als Zusammenfassung) auf STRUFFERT (1989) verwiesen. Die Position des Luxemburger Raumes am nordöstlichen Rand des Pariser Beckens und zugleich im südlichen Teil der Eifeler-N-S-Zone, sowie die Einrahmung durch Ardennen, Eifel und Hunsrück ist in Abb.2 zu erkennen.

Die im folgenden vielfach für die lithofaziellen Einheiten: Pylonoten-Schichten, Luxemburger Sandstein, Mergel und Kalke von Strassen, Fossilarme Tone, verwendeten Kürzel: li₁, li₂, li₃, li₄, entsprechen der Konvention der "nouvelle carte géologique du Grand-Duché de Luxembourg" (BINTZ & MULLER 1966). Die (bio-) stratigraphische Einordnung dieser Kartiereinheiten unterliegt aufgrund der Fossilarmut einem gewissen Wandel (DITTRICH 1989). Maßgebend für die Ansprache und Einordnung dieser Einheiten ist ihre lithofazielle Ausbildung. Die Verwendung der obigen Namen und Kürzel geschieht ausschließlich im Sinne dieser ursprünglichen Definition, was einer Klassifizierung unter hydraulischen Gesichtspunkten entgegenkommt.

2.1.1 Trias

Die Ablagerungen der Trias treten, generell gesehen, in zwei lithofaziell verschiedenen Ausbildungen auf. Die Trennung zwischen beiden Einheiten bildet das S-N verlaufende Tal der Alzette (LUCIUS 1959; siehe hierzu Abb.3 und 9). Östlich dieser Linie sind die Ablagerungen der mittleren und oberen Trias in germanisch-lothringischer Fazies ausgebildet. Im Westen setzt eine sandig-konglomeratische Litoralfazies mit reduzierten Schichtmächtigkeiten ein (WAGNER 1982). Sie ist westlich der N-S streichenden Rodbach-Linie nur noch schwierig mit der normalen Schichtfolge zu korrelieren (HARY & MULLER 1967). Den Transportweg der Geröll- und Sandmassen der Uferfazies stuft WIEBEL (1968) als "nicht weit" ein.

Die Randfazies der Trias

Der westliche Beckenrand des Germanischen Triasbeckens tritt in West-Luxemburg und Süd-Belgien in einer sandig-konglomeratischen Ausbildung auf, die die Merkmale des "Braided-River-Typs" zeigt. Die Randfazies ist im Vergleich mit der germanisch-lothringischen, kalkig-mergelig ausgebildeten Normalfazies durch eine Reduzierung der Schichtmächtigkeiten, durch einen nach Westen hin zunehmenden Anteil an grobklastischem Material und durch ein transgressives Übergreifen der jüngeren Schichtglieder auf die paläozoische Rumpffläche gekennzeichnet. Die Entwicklung und Ausbildung dieser drei, die Randfazies prägenden Merkmale wird bei BERNERS et al. (1984, S.370-373) anhand von zwei NE-SW gerichteten Profilschnitten verdeutlicht, wobei eine Mächtigkeitsreduzierung der Triasabfolge von bis zu 180 m auftritt.

Der Standort Everlange der *solution de recharge* liegt im Bereich dieser sandig-konglomeratischen Randfazies der Trias.

Den Abschluß der triassischen Ablagerungen bilden die nur 3-5 m mächtigen Roten Tone des oberen Rhät (BINTZ et al. 1970), deren "Ausstrich-Linien" die Grundlage für weitergehende Vorstellungen über den Gebirgsbau des westlichen Gutlandes bilden. Dies erlangt im Zusammenhang mit der Trinkwasserversorgung und den stark schüttenden Quellgruppen am Standort Koerich besondere Bedeutung. Bei einem Tonanteil von mindestens 50% sind die

primär feinblättrigen rotgefärbten Tone stellenweise infolge der Auflast des mächtigen unterliassischen Sedimentstapels stark verquetscht und entschichtet. Ein hoher Smectit-Anteil (DITTRICH 1984) bedingt bei Wasserzutritt eine große Quellfähigkeit. Da die hangenden Pylonoten-Schichten als Aquitarde im Liegenden des größten Aquifers Luxemburgs, des Luxemburger Sandsteins, angesehen werden müssen, werden die Roten Tone ganzjährig durchfeuchtet und bilden im aufgequellten Zustand eine hervorragende Gleitmasse. Auf ihr wird, bei einer dem Talverlauf parallelen tiefgreifenden Klüftung, der gesamte auflagernde Schichtenstapel verstellt und gleitet schließlich ab. Die Roten Tone bilden somit die Grundlage für die typischen Verwitterungserscheinungen der luxemburgischen Lias-Landschaft und bilden die hydrogeologische Begrenzung im Liegenden des Luxemburger Sandstein - Aquifers. Beschreibungen des Sedimentationsmilieus sind z.B. bei LUCIUS (1948, 1955) zu finden, wobei SPIES (1982) die gute Übereinstimmung der lithologisch fixierten Rhät/Lias-Grenze (Rote Tone/Pylonoten-Schichten) mit der biostratigraphischen Grenzziehung durch palynologische Untersuchungen untermauert.

2.1.2 Jura

Mit der großen Transgression im Hettangium wird die Phase einer im Luxemburger Raum zunächst einheitlich ausgebildeten marinen Sedimentation eingeleitet. Die Korrelation der im Unteren Lias in Lothringischer Fazies abgelagerten Schichten mit denen benachbarter Gebiete ist unproblematisch. Bis zum Mittleren Lias wird ein Einfluß des seit dem Rhät einsinkenden Pariser Beckens nicht deutlich. Die Eifeler Nord-Süd-Zone beherrscht, nachdem die Neigung ihrer Längsachse im Laufe der Trias nach Süden umgekippt ist, mit ihren klastischen Schüttungen in Richtung auf das Pariser Becken den Luxemburger Ablagerungsraum. Diese sandigen, von NNE nach SSW gerichteten, seitlich scharf begrenzten Schüttungen verlagern im Laufe des Oberen Hettangiums ihre Längsachse nach Westen. Bei diesem Vorgang werden die bereits abgelagerten Sande von den mergelig-kalkigen Sedimenten der Lothringischen Fazies eingedeckt. Diese diachrone Sandfazies wird als "**Luxemburger Sandstein**" (STEININGER 1828) bezeichnet. Der Luxemburger Sandstein bildet, großräumlich betrachtet, eine schief gestellte, nach Westen aufsteigende Sandlinse innerhalb der Lothringischen Fazies (LUCIUS 1948, BINTZ & MULLER 1966). Der größte Teil dieser Sandlinse wird von den Pylonoten-Schichten des Unteren Hettangiums unterlagert und von den "Mergeln und Kalken von Strassen", dem Äquivalent der Arieten-Schichten, abgedeckt.

Losgelöst von der biostratigraphischen Zonengliederung des Jura (BINTZ, MULLER & HARY 1976) haben sich im Luxemburger Sedimentationsraum verschiedene, zum Teil mit Lokalnamen versehene, nach Nordwesten in jüngere stratigraphische Einheiten aufsteigende, diachrone Lithofaziesseinheiten entwickelt (vergl. Abb.3 nach L. VAN WERVEKE, 1901). Diese können oftmals chronologisch weiter differenziert werden. So tritt z.B. im Bereich der nordwestlichen Cuesta des Luxemburger Sandsteines zwischen der surface taraudée (BINTZ & MULLER 1966), dem horizontbeständigen Top des Luxemburger Sandstein i.e.S. und den Mergeln und Kalken von Strassen, eine vermittelnde Übergangsfazies (Faciès de transition: BINTZ et al. 1970; STRUFFERT 1989) auf.

W

E

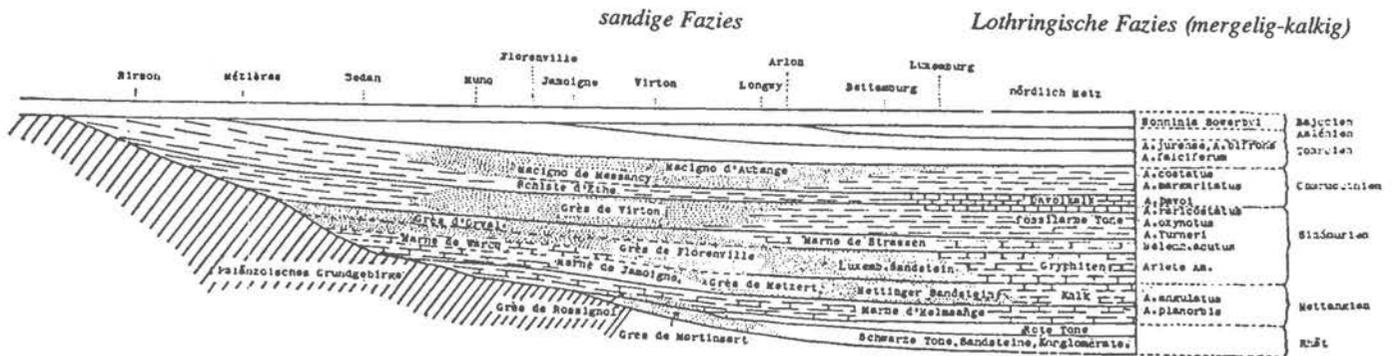


Abb. 3: Die Fazies des Lias am Rande der Ardennen (nach L. VAN WERVEKE in LUCIUS 1955, S.343)

Die sandige Fazies setzt innerhalb der mergelig-kalkig ausgebildeten Angulaten-Schichten westlich einer Linie Emeringen - Ellingen ein (LUCIUS 1948, 1950) und läßt sich nach Westen hin, in Richtung auf das ehemalige Festland, bis nach Belgien in die Gegend westlich Arlon verfolgen (über ca. 30 km). In südwestlicher Richtung erstreckt sich das Vorkommen von Luxemburger Sandstein über ca. 80 km, etwa von Bitburg in der Südeifel bis in die Gegend von Hettange, Moselle France. Bei einer Verbreitung in Luxemburg über ca. 490 km² werden Mächtigkeiten von z.T. >100 m erreicht. Die Iospachen verlaufen etwa parallel einer durch Schrägschichtungsmessungen bestimmten Hauptschüttungsrichtung von NNE nach SSW. Zur Klärung der Frage der Art und Weise der Sedimentation, der Ablagerungsbedingungen und des Environments wurden verschiedenste Modellvorstellungen erarbeitet. Aus granulometrischen Untersuchungen des Luxemburger Sandsteines im Gebiet von Syren, Munsbach, Sandweiler, Itzig und Hassel schließen MULLER & RASCHE (1971) auf einen aus mehreren langgestreckten Ellipsoiden aufgebauten Sandkörper, dessen Sedimentationsbedingungen einem marinen Ablagerungsmilieu des Strand- und Schelfbereiches mit häufiger Umlagerung zugeordnet werden müssen. SCHRECK (1976) schließt aufgrund der guten Übereinstimmung der Einfallrichtungen der Schrägschichtung mit der Streckung des Sandkörpers eine litorale Entstehung aus. Der textuelle Aufbau des Sandkörpers, sein Fossilinhalt sowie paläogeographisch-regionalgeologische Zusammenhänge belegen nach BERNERS et al. (1984) einen flachmarinen Ablagerungsraum mit Sandbarrenbildungen. In Anlehnung an die Arbeit von MERTENS (1982) zieht DITTRICH (1984, S.60) folgendes Résumé: "Der Gesamtkomplex des heute noch erhaltenen Sandsteines ist nach derzeitiger Auffassung als gezeitenbeeinflusster, landferner (distaler) Teil eines ausgedehnten Delta-Körpers anzusehen, dessen randnaher (proximaler) Bereich nicht erhalten ist (<<subsequente Erosion>> im Uferbereich)".

Die Kalke und Mergel von Strassen werden von dunklen Tonsteinserien, den sog. "Fossilarmen Tonen" des oberen Sinemuriums bzw. des unteren Pliensbachiums, überlagert.

Auf die jüngeren, nur noch reliktsch erhaltenen jurassischen Gesteine und tertiären Schotterdecken sowie auf die alluvialen Terrassenbildungen der Attert und Alzette wird nicht weiter eingegangen, sondern auf die Veröffentlichungen des Service Géologique de Luxembourg hingewiesen.

2.1.3 Gebirgsbau

Die folgenden Ausführungen gehen im wesentlichen auf die Arbeiten von LUCIUS (1937 und 1948), BERG (1965), DÉsirÉ-MARCHAND (1985) und DITTRICH (1989) zurück.

Die Luxemburg-Trierer Bucht wird als nordwestlicher Saum des Pariser Beckens von den Massiven Ardennen/Eifel und Hunsrück im großstrukturellen Sinn eingerahmt. Richtungsweisend für das gesamte tektonische Inventar des Luxemburger Raumes sind die abwechselnd vorherrschenden NNE-SSW (10°-20°; rheinischen), die ENE-WSW (30°-55°; diagonalen) und die NE-SW (60°-70°; variszischen) Richtungen, die im Streichen der Falten und im Verlauf der Brüche und Verwerfungen deutlich werden. Das Ösling wird von vier NE-SW streichenden tektonischen Hauptelementen (Sättel und Mulden) geprägt (vergl. Abb.2). Auf deren Flanken treten einige gleichsinnige kleinere Nebensättel und -mulden auf.

Die Hauptphase der tektonischen Bewegungen des Luxemburger Raumes muß nach LUCIUS (1948, S.347) in das Alttertiär gestellt werden. Die jüngsten Bewegungen müssen an die Wende Plio-/Pleistozän gelegt werden. Sie schufen die Grundlage für die heutige morphologische Landschaftsgestaltung. Unter Belebung der alten, bereits im Basement angelegten Bewegungsrichtungen, die variszische und die rheinische, wurde der Luxemburger Raum mit seiner Umgebung "en bloc" gehoben. Dabei wurde der paläozoische Rahmen stärker gehoben als die mesozoische Senke, was zur Entstehung von engräumigen flexurartigen Aufbiegungen, zu einem Bruchschollensystem und zu weitgespannten Verbiegungen führte, sowie den heutigen Gegensatz zwischen Ösling und Gutland begründet. Der Verlauf der sog. Öslinger Randverbiegung (Abb.10 und in Abb.2 südl. Grenze des Ösling) ist dabei NE-SW ausgerichtet, während die Aufbiegungen am Westrand des Hunsrücks in NNE-SSW-Richtung verlaufen. Durch das Wiederaufleben der im Variszikum angelegten Strukturen, bei sich periodisch ändernder Vorherrschaft der beteiligten Richtungen, wird im östlichen Gutland ein Bruchschollenmosaik mit raufenförmigen Horst- und Grabenstrukturen angelegt. Im Nordwesten des Gutlandes, westlich der Großstruktur der Mulde von Weilerbach, tritt im Gegensatz zum Ostteil, als Ausdruck der Konkurrenz der beiden Hauptrichtungen, eine Gitterfaltung auf. "Insofern handelt es sich bei dem strukturellen Inventar im Deckgebirge lediglich um eine mehr oder weniger getreue Abbildung eines älteren, unter gänzlich anderen tektonischen Rahmenbedingungen entstandenen Gefügemusters": DITTRICH (1989, S.10).

An diese differenziellen vertikalen Bewegungen ist die Entstehung des antezedenten Flußsystems gebunden. Die Hebung des Gutlandes ging so langsam vor sich, daß die Flüsse durch Eintiefung ihre Fließrichtung nach Norden beibehalten konnten, während das Entwässerungssystem des Öslings nach Süden umkippte.

Bei der Verwendung der Abb. 2 in Verbindung mit den Profilschnitten der Anlage 1 wird der Einfluß des Gebirgsbaus mit seinem strukturellen Inventar auf die vier Standorte der *solution de recharge* deutlich. Einige der wichtigsten Störungen mit größeren Versetzungsbeträgen sind im Schnitt *Nospelt-Schaedhaff* der Anlage aufgenommen worden. Die vielen NE-SW ausgerichteten Flexuren im Keuperlandstrich zwischen Attert und der Cuesta des Luxemburger Sandsteines (DITTRICH 1989) konnten im Schnitt *Esch/Säre-Nospelt* nicht dargestellt werden. Im Profilausschnitt *Koerich* läßt sich eine gewisse flache Morphologie im Auflager des Hettangiums erkennen. Dies ist ein Hinweis auf die unter Kap. 3 " *Hydrogeologie der Standorte Koerich und Trois Ponts* " eingehend beschriebene Vorstellung von einer Aneinanderreihung von NNE-SSW ausgerichteten flachen Kuppeln und Senken (Mulden und Sättel bei LUCIUS) im Auflager der jurassischen Schichten. Diese Darstellung der Lagerungsverhältnisse des westlichen Gutlandes, in dem lediglich die Klüftung der kalkhaltigeren Partien des Luxemburger Sandsteines Hinweise auf tektonische Beanspruchungen geben können, begründet sich auf der Höhenlage der Roten

Tone des oberen Rhät. Die z.T. auf der Basis dieser Daten von LUCIUS (1948) erstellte "Tektonische Übersichtskarte des Gutlandes" ist Grundlage der Abb. 10 in Kap. 3.

2.2 Klima in Luxemburg

Das Klima Luxemburgs zeigt durch gemäßigte Temperaturen und ausgeglichene, hohe Niederschläge einen dominanten ozeanischen Einfluß. In größeren Talbereichen kommt es regional, z.B. im Talkessel von Echternach, zur Ausbildung von Kleinklimaten (NEUMANN-REDLIN 1971). Die Niederschläge liegen im langjährigen Mittel in Ostluxemburg zwischen 700-

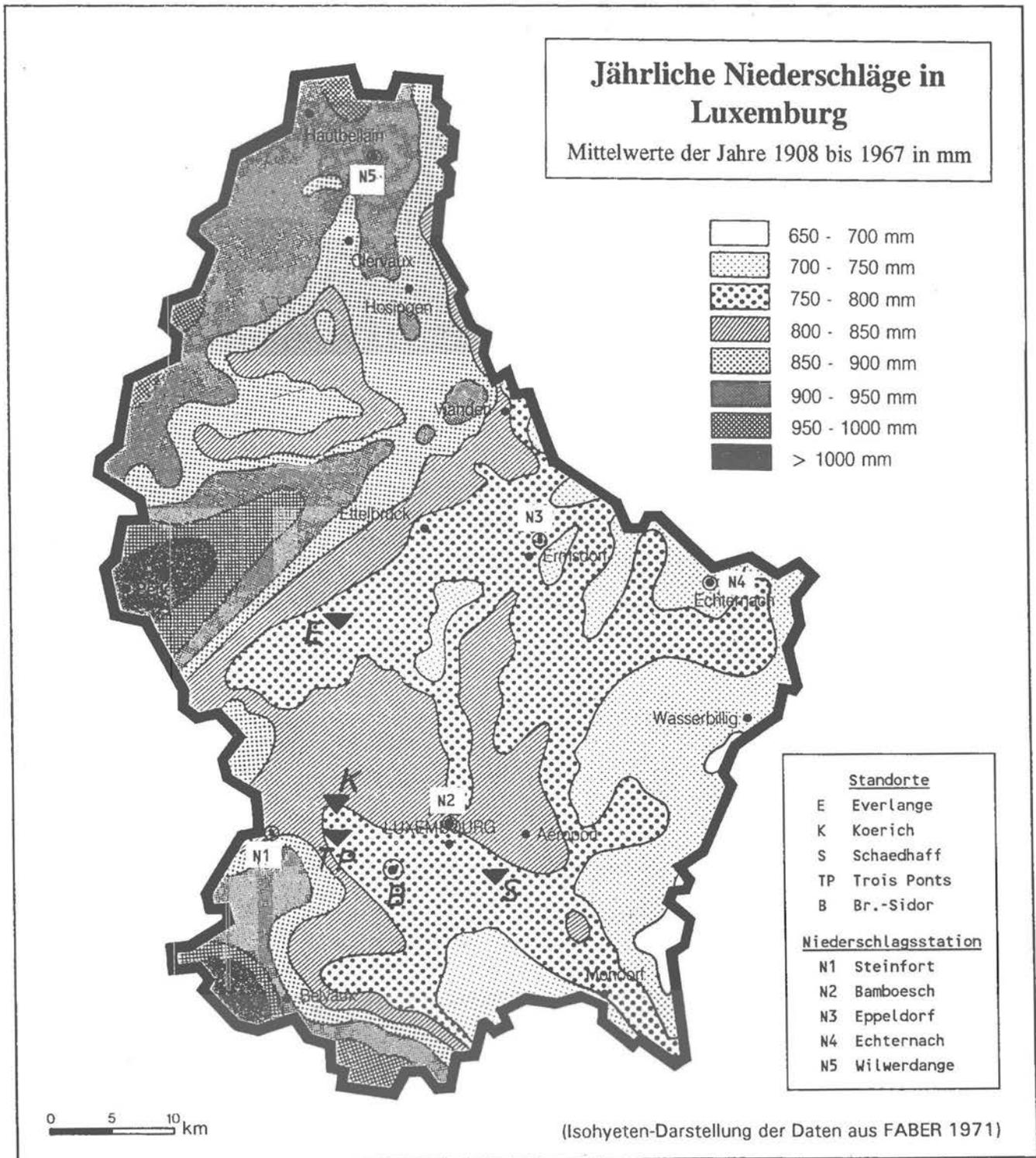


Abb. 4: Jährliche Niederschläge in Luxemburg (Isohyetendarstellung nach FABER 1971, ergänzt)

800 mm/a und in Westluxemburg bei 850 mm/a. Die Niederschlagsverteilung ist dabei höhenabhängig, so daß die Talbereiche der Mosel (150 m üNN, 600 mm/a), der Sauer und der Alzette die geringsten Niederschläge erhalten, während im Ösling (Wilwerdange: 540 m üNN, 900 mm/a) ergiebige Niederschläge fallen (vergl. Abb.4).

Der mittlere jährliche Niederschlag der 16-jährigen Meßreihe für die Station SES-Koerich von $792 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ läßt sich auf alle Standorte der *solution de rechange* übertragen. Die Niederschläge dieser Meßstation sind für den Untersuchungszeitraum, Januar 1990 bis Juli 1992, als Tages- und Monatswerte in Abb. 5 dargestellt. Die Monatswerte werden in hydrologische Winter- und Sommerhalbjahre eingeteilt. Aus der Zuordnung der Monatswerte zum jeweiligen Jahresmittelwert bzw. Mittelwert werden die saisonalen Schwankungen in den Niederschlägen deutlich. Der Vergleich der Jahresmittelwerte mit dem 16-jährigen Jahresmittel (FABER 1971) ermöglicht eine bilanzierende Einordnung des jährlichen Niederschlagsdargebotes. Der Gesamtniederschlag des Jahres 1990 (899 mm) liegt deutlich über dem mittleren Jahresmittelwert, während im Jahr 1991 (680 mm) und in der ersten Hälfte von 1992 ein Defizit an Niederschlag auftritt.

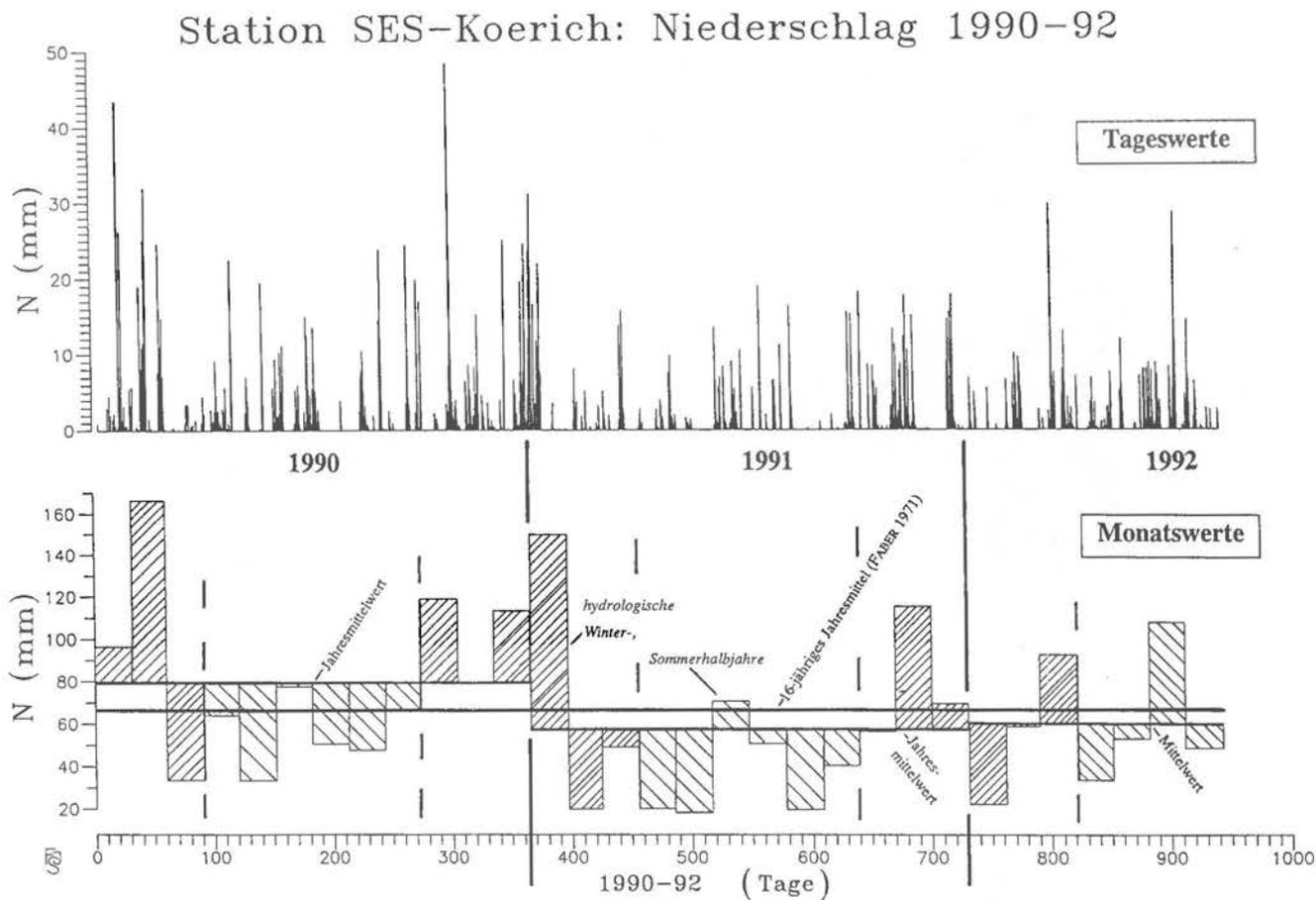


Abb. 5: Niederschlag 1990-92, Station SES-Koerich

In den Jahren 1987 - 1989 wurde von der "Administration de l'Environnement, Division Air/Bruit" in Zusammenarbeit mit der "Administration des Eaux et Forêts" ein "programme d'observation des pluies en milieu forestier" durchgeführt. An 8 Meßstellen in Waldgebieten (vergl. Abb.4) wurden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Konzentration an Cl^- , NO_3^- - und SO_4^{2-} -Ionen bestimmt und als Wochenmittelwerte von 5 Lokalitäten veröffentlicht (Ministère de

l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement 1990). Die Auswertung dieser Daten ist in Abb. 6 a, b veranschaulicht.

Der pH-Wert der Niederschläge schwankt zwischen 3,3 und 6,5 mit einer Verdichtung der Meßwerte zwischen 4,5 und 6 pH. Die LF-Meßwerte [25°C] variieren um den Wert $28 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ bei einem Verteilungsmaximum zwischen $11 - 34 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Hieraus errechnen sich überschlägig nach (FAUTH 1969) Abdampfrückstände der Niederschlagswässer von 6,5 - 19,5 mg/l.

Diese Werte und die Anionenkonzentrationen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) der Niederschläge an den Meßstationen in Steinfort, Bamboesch (Waldgebiet am nordwestlichen Stadtrand von Luxemburg), Eppeldorf und bedingt Echternach (temporäre Ausbildung von Kleinklimaten) können als repräsentative Anfangsgehalte der infiltrierenden Wässer (input) für das Verbreitungsgebiet des Luxemburger Sandsteins angesehen werden (vergl. Abb.4 mit der "Vereinfachten Geologischen Karte" in der Anlage 1. Besonderes Augenmerk soll schon jetzt - im Hinblick auf die Ausführungen zu Trois Ponts - auf die nur gering schwankenden Chloridgehalte (0,52 mg/l Cl^- [Steinfort] bis 0,86 mg/l Cl^- [Bamboesch]) gelegt werden. Der jährliche atmosphärische Eintrag dieser Anionen (als Teile der Luftschadstoffe) über den Niederschlag in die Bio- und Pedosphäre (feuchte Deposition) wird bei Berücksichtigung der Niederschlagsverteilung mit Abb. 6 b dargestellt. Bei der Betrachtung beider Teilabbildungen (Abb.6a, b) wird deutlich, daß sowohl die ortsspezifischen Säulenverteilungen (mg/l; kg/ha·a), als auch deren Relationen zu denen der anderen Lokalitäten beibehalten werden. Dies weist auf die Verknüpfung der Konzentration an gelösten Gasen und suspendierten Aerosolen mit der Niederschlagsmenge hin und kann über das Henry'sche Gesetz auf die lokale/regionale Luftzusammensetzung zurückgeführt werden (SIGG & STUMM 1991; MAJEWSKI 1991).

Die langjährige mittlere Lufttemperatur (1931-1960) beträgt nach FABER (1971) in Luxemburg-Stadt und Ettelbrück $9,3^\circ\text{C}$.

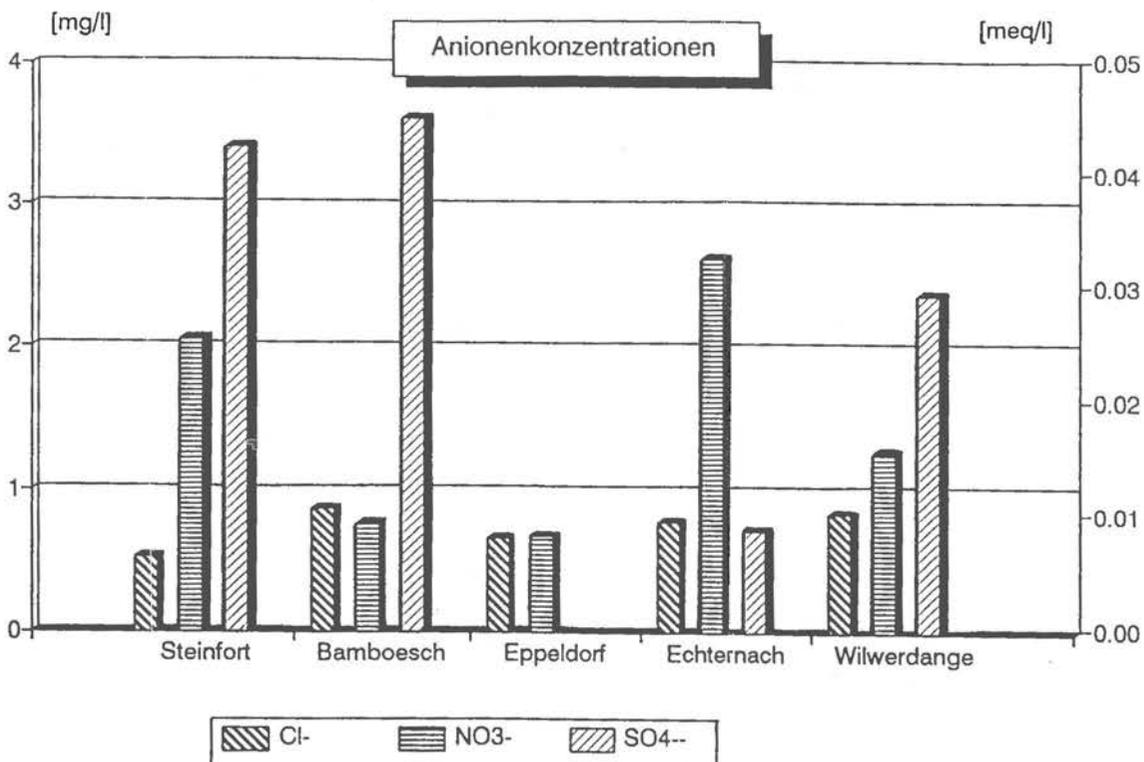


Abb. 6 a: Niederschläge in Luxemburg 1987-1989; Anionenkonzentrationen

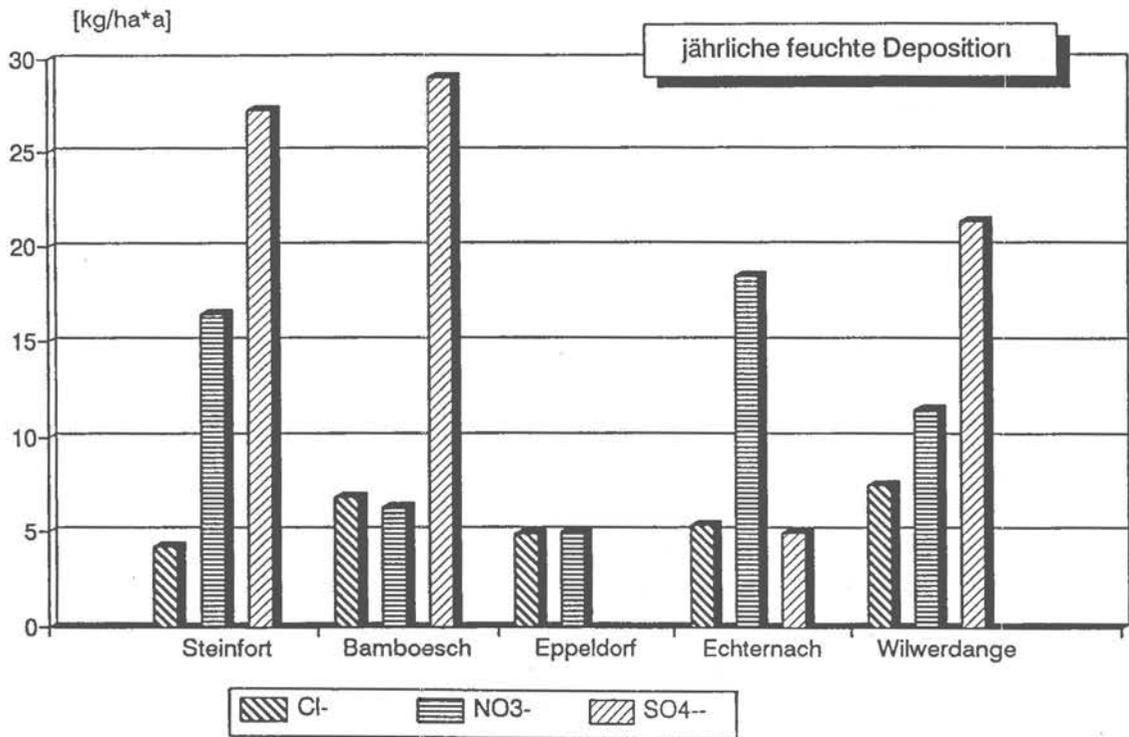


Abb. 6 b: Niederschläge in Luxemburg 1987-1989; Jährliche feuchte Deposition

3 Hydrogeologie der Standorte Koerich und Trois Ponts

Das linsenförmige Vorkommen an Luxemburger Sandstein inmitten weniger gut durchlässiger Gesteine in Lothringischer Fazies bildet die Voraussetzung für den größten und höffigsten Grundwasserspeicher Luxemburgs. Der Luxemburger Sandstein tritt in Form einer nach Südwesten unter jüngere Einheiten abtauchenden Sandsteinplatte höhenbildend auf. Auf dem Lias-Plateau wird die Sandsteinfazies stellenweise von den Kalken und Mergeln von Strassen, weiter nach Süden (Trois Ponts) komplett und zusätzlich von Tonsteinserien abgedeckt. Die liegenden kalkig-mergeligen Pylonoten-Schichten bilden zusammen mit den unterlagernden Roten Tonen einen vollkommenen Stauhorizont (vergl. geol. Karte und geol. Profilschnitte der Anlage 1).

Der **Luxemburger Sandstein** steht in der Gegend um den Standort **Koerich** (Gebiet: Steinfort, Eischen, Hobscheid, Saeul, Nospelt, Septfontaines, Tal der Eisch) als ein bankiges bis massiges, relativ homogenes Gesteinspaket an, das mit seinem relativ steilen und zum Teil schroffen Abbruch die Steilstufe am nordwestlichen Erosionsrand des Lias-Plateaus bildet. Der hellgefärbte, weiße bis gelbe, selten ockergelbe oder rötliche Sandstein wird im wesentlichen aus gut bis sehr gut sortierten Fein- bis Mittelsanden aufgebaut. Untergeordnet treten im oberen Bereich in geringmächtig aushaltenden (kartierbaren) Lagen und Horizonten sowohl feinkiesige Gerölleinschaltungen mit lokal bis zu 10 cm großen Sand- und Siltsteinkomponenten, als auch Muschelschillbänke auf (STRUFFERT 1989). Das Bindemittel ist bei den zutage anstehenden Partien karbonatisch. Der Karbonatanteil stammt zum großen Teil von biogenen, kalkigen Einlagerungen, von denen nach Lösung und Wiederausfällung als Gesteinszement nur noch Hohlräume Zeugnis geben.

In den durch eine besonders tiefgründige tertiäre Verwitterung geprägten Sandsteinpartien am unmittelbaren Nordwestrand des Lias-Plateaus (Cuesta), am Ditzeberg (siehe Profilschnitt *Everlange* in der Anlage 1), kann bei einem Kalkgehalt von 2% von einer fast vollständigen Entkalkung ausgegangen werden. Dünnschliffuntersuchungen dieser Gesteinspartien veranlaßten BAUMEISTER (1979) zum Schluß, daß der heute offene und wenig Hämatit enthaltende Porenraum ehemals von einem kalkigen Bindemittel erfüllt gewesen sei. Den Anteil an Quarzkörnern beziffert er auf 95 Gew.%, wobei die Quarzkörner Rundungsgrade von "angular" bis "rounded" aufweisen.

Abseits der Cuesta läßt der Kalkgehalt eine klare Zweigliederung des Luxemburger Sandsteines erkennen (DITTRICH 1984). Partien mit einem hohen Anteil an primärem, biogen-kalkigem Detritus weisen Karbonatgehalte von 30% auf und solche ohne von 15%. Dieser Unterschied im karbonatischen Bindemittelanteil führt zu der auch für dieses Gebiet typischen und an den steilen Talflanken oftmals aufgeschlossenen Wechselfolge von härteren, helleren Kalksandsteinen mit stärker entkalkten, leicht zerfallenden, gelben Sandsteinen.

Der Übergang vom Luxemburger Sandstein zu den im Liegenden folgenden Psilonoten-Schichten erfolgt hier, im Gegensatz zu anderen Gegenden Luxemburgs, kontinuierlich. In den unteren Metern des Sandsteines schalten sich zunächst einige dünne tonig-mergelige Bänder ein, die zum Liegenden hin in mergelig-sandige und dann in mergelige Partien übergehen. Der Übergang der sandigen Fazies in die hangenden Mergel und Kalke von Strassen erfolgt abrupt (die *Faciès de transition* wird in diesem Zusammenhang nicht ausgeschieden). Einen Eindruck vom Schichtaufbau in Koerich gibt Abb. 48 in Kap. 5 und der Profilschnitt Koerich in Anlage 1.

Wird der Sandstein durch auflagernde Schichten vor einer Verwitterung geschützt, wie in **Trois Ponts**, so ist die ursprüngliche blaugraue, von feinst verteiltem Pyrit herrührende Färbung erhalten. An einigen Bohrproben aus dem obersten Bereich der Sandsteinabfolge sind Pyritkristallanreicherungen, die auf die Surface taraudée hinweisen (mdl. Mitt. BINTZ), makroskopisch erkennbar. Die Surface taraudée (BINTZ et al. 1966) bildet in Form eines Emersionshorizontes mit Grab- und Wühlspuren den Abschluß der *Faciès de transition* und somit der Luxemburger Sandstein-Formation. An den erbohrten Luxemburger Sandstein-Proben aus Trois Ponts ist kein Porenraum sichtbar.

Aus dem "Fence-Diagramm" (Abb.8) ist der geologische Aufbau, wie er in Trois Ponts angetroffen wird, ersichtlich. Die Mächtigkeit der Bedeckung variiert zwischen 26 m (TPPz5) und 84 m (TPBR4). Bei TPPz5, am W-Ausgang von Hagen (siehe auch Lageplan Trois Ponts, Abb.7), stehen die Mergel und Kalke von Strassen geringmächtig an, während die Mächtigkeit der Fossilarmen Mergel bei TPBR4 am größten ist.

Der Aufbau und Ausbau der Mehrfachmeßstelle in den Deckschichten, TPPg, ist in Abb. 9 mit lithologischer Beschreibung der Kernproben dargestellt.

Die Kennzeichnung der Brunnen und Piezometer (BR, Pz) erfolgt nach der ersten, durch den Service Géologique vergebenen Nummerierung. Im Text und in den Tabellen werden die jeweiligen Initialen der Standortnamen (K, TP, S, E) den Kürzeln vorangestellt. Später eingeführte Bezeichnungen des Betreibers sind in einigen Lageplänen auszugsweise angefügt.

Der **Luxemburger Sandstein** ist im **Anstehenden**, so z.B. in **Koerich**, intensiv geklüftet. Neben einer generellen, kleinräumigen Zerklüftung sind des öfteren Klüfte der Hauptkluftrichtungen um cm- bis m-Beträge erweitert und mit sandigen Verwitterungs- und kalkig/mergeligen Ausfällungs- bzw. Residualprodukten verfüllt. Die größeren Klüfte durchsetzen den gesamten

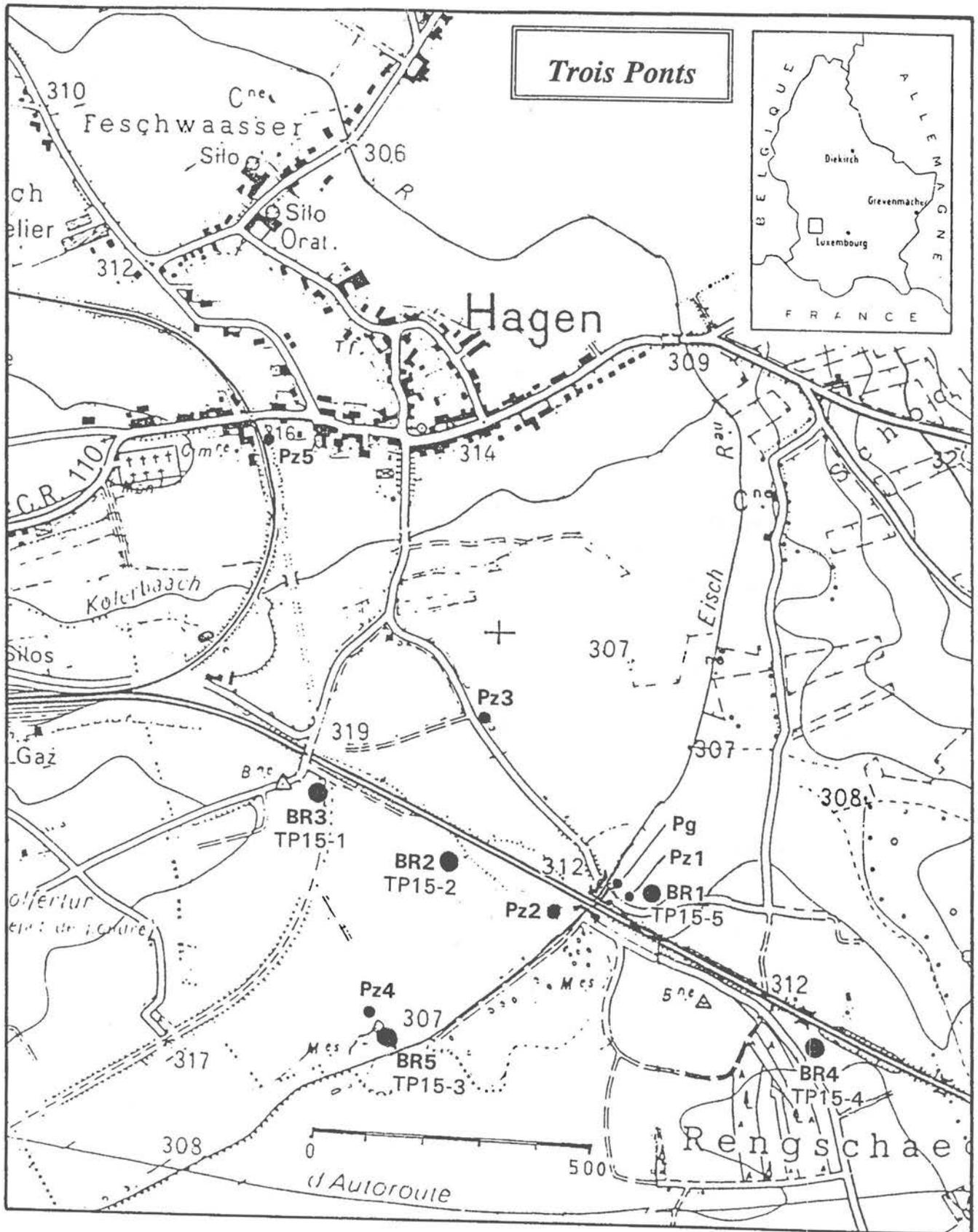


Abb. 7: Lageplan Trois Ponts. Im Text und in den Tabellen wird den Brunnen- und Piezometerbezeichnungen jeweils das Kürzel "TP", für Trois Ponts, vorangestellt.

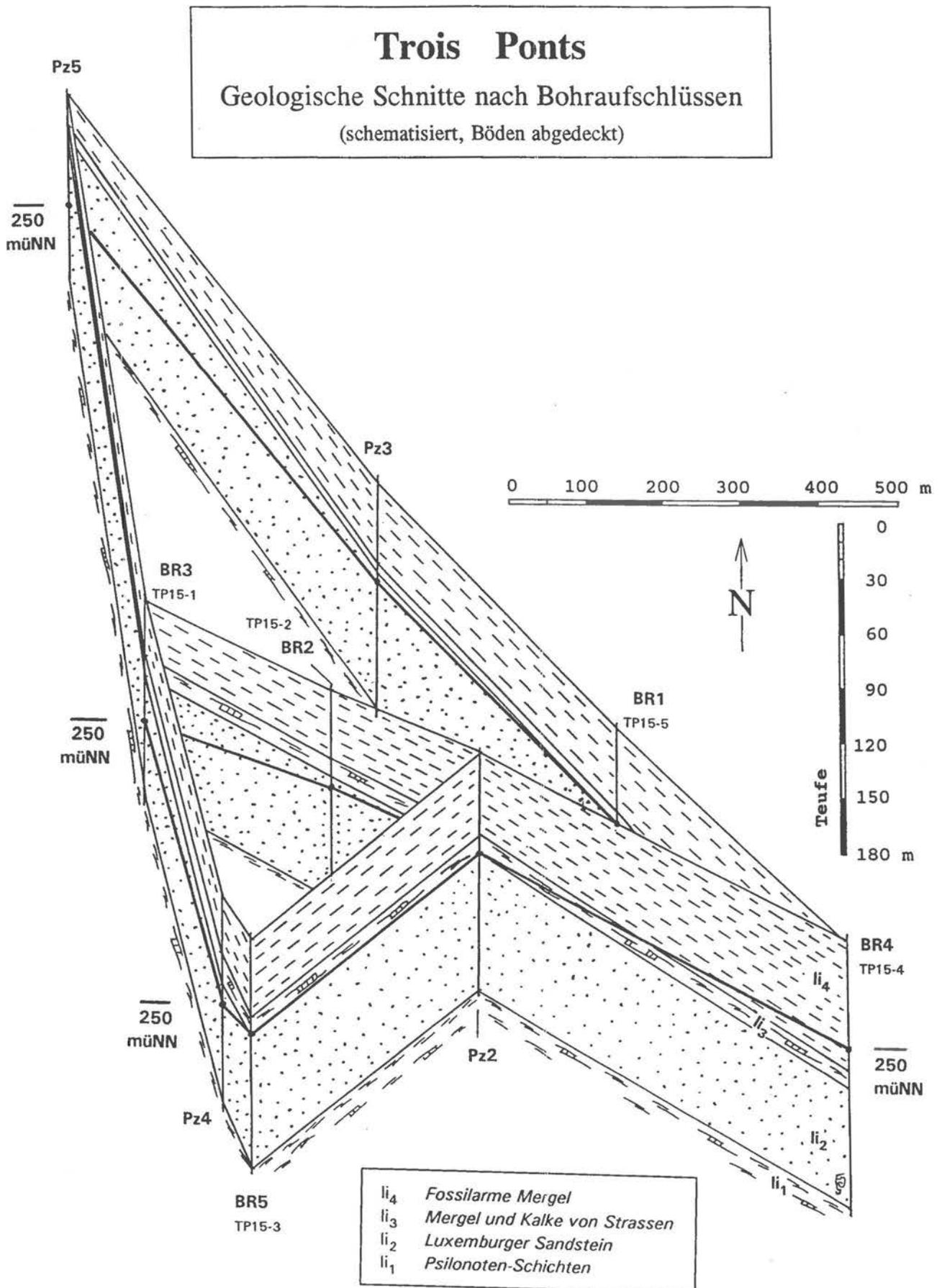
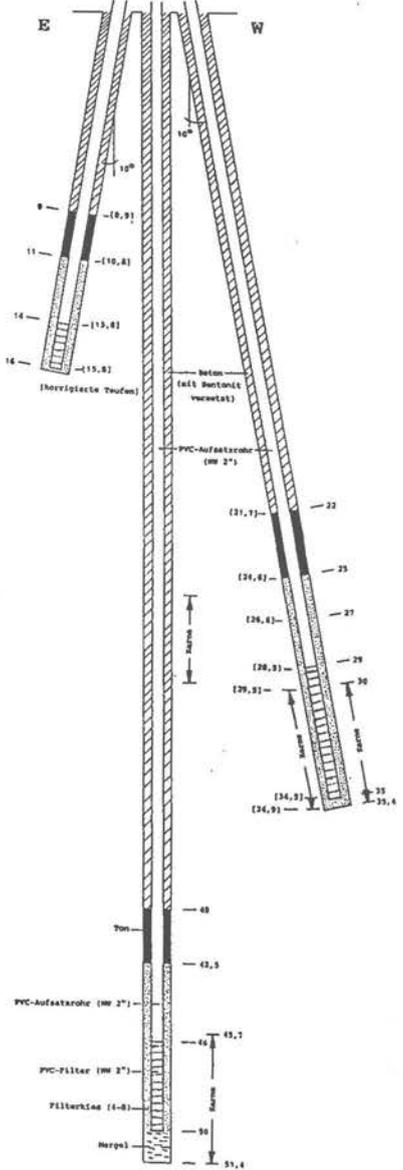
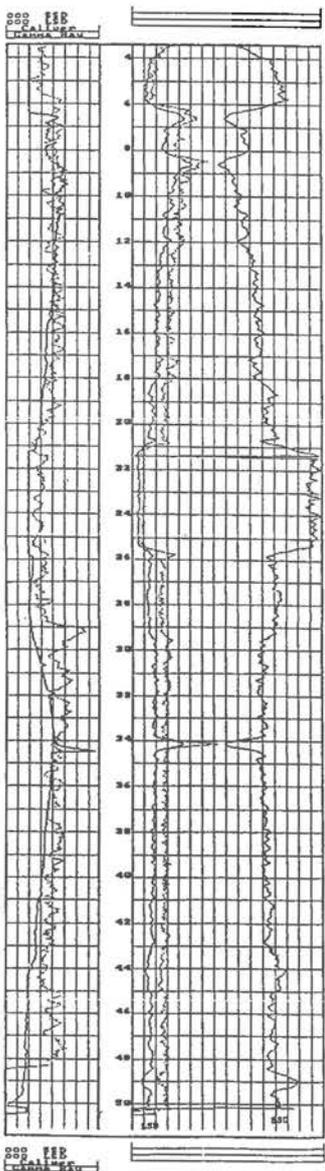
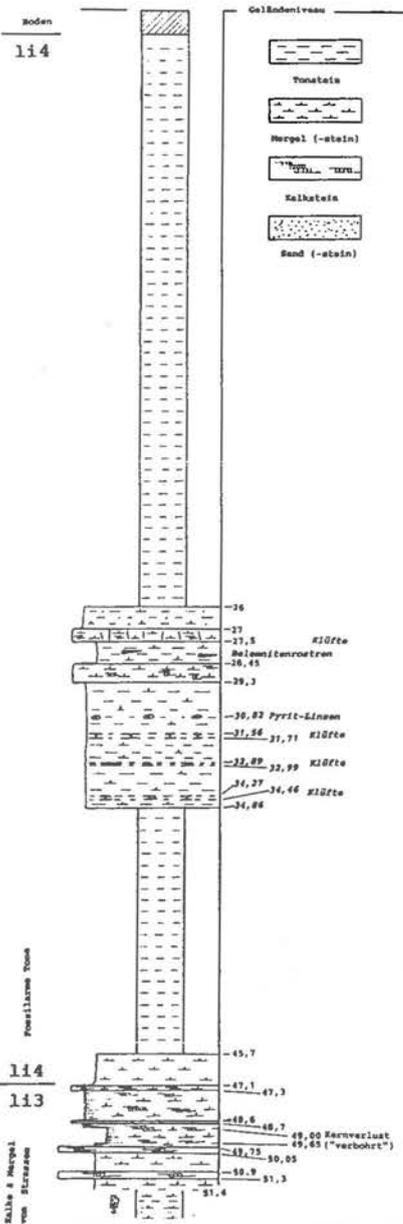
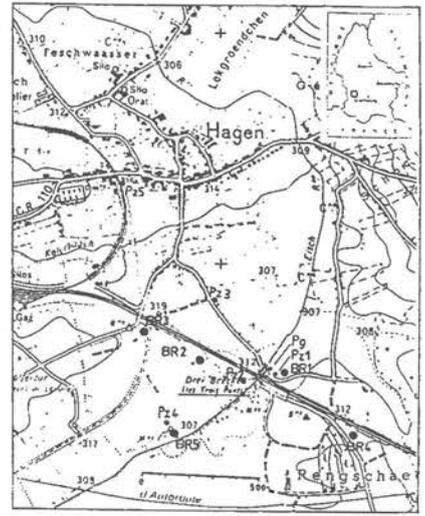


Abb. 8: Geologische Schnitte nach Bohraufschlüssen, Trois Ponts; sog. Fence-Diagramm

Lithologie

Bohrlochgeophysik TPPg50 open hole

Ausbauzeichnung TPPg16 TPG35 TPPg50



GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG
 MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

PONTS ET CHAUSSEES

SERVICE GEOLOGIQUE
 TROIS PONTS

PIEZOMETERGRUPPE
 TPGG 16, TPGG 35, TPGG 50
 JANUAR 1990

PROJETÉ LE	INTITULÉ DE LA NOUVELLE ÉDITION	DATE
DRESSÉ LE	PLANS N°	
REVISÉ	PROCES-VERBAUX	

Abb. 9: Lithologie und Meßstellenausbau zur Piezometergruppe in Trois Ponts

Sandstein und drainieren ihn bis auf sein Unterlager. In der SES-Quellfassung "Wykerloth" an der Pumpstation im Eischtal bei Koerich (Abb.11) und in der SES-Quellfassung "Fischbour" in Gaichel ist diese Drainage gut sichtbar.

Der Luxemburger Sandstein wird in dieser Gegend als eine Kombination aus Poren- und Kluftaquifer angesprochen, der nach den Untersuchungen von v.HOYER (1971a) in Naßjahren beträchtliche Wassermengen aufnehmen kann und diese nur stark gedämpft und mit einjähriger Verzögerung wieder an die Vorfluter abgibt.

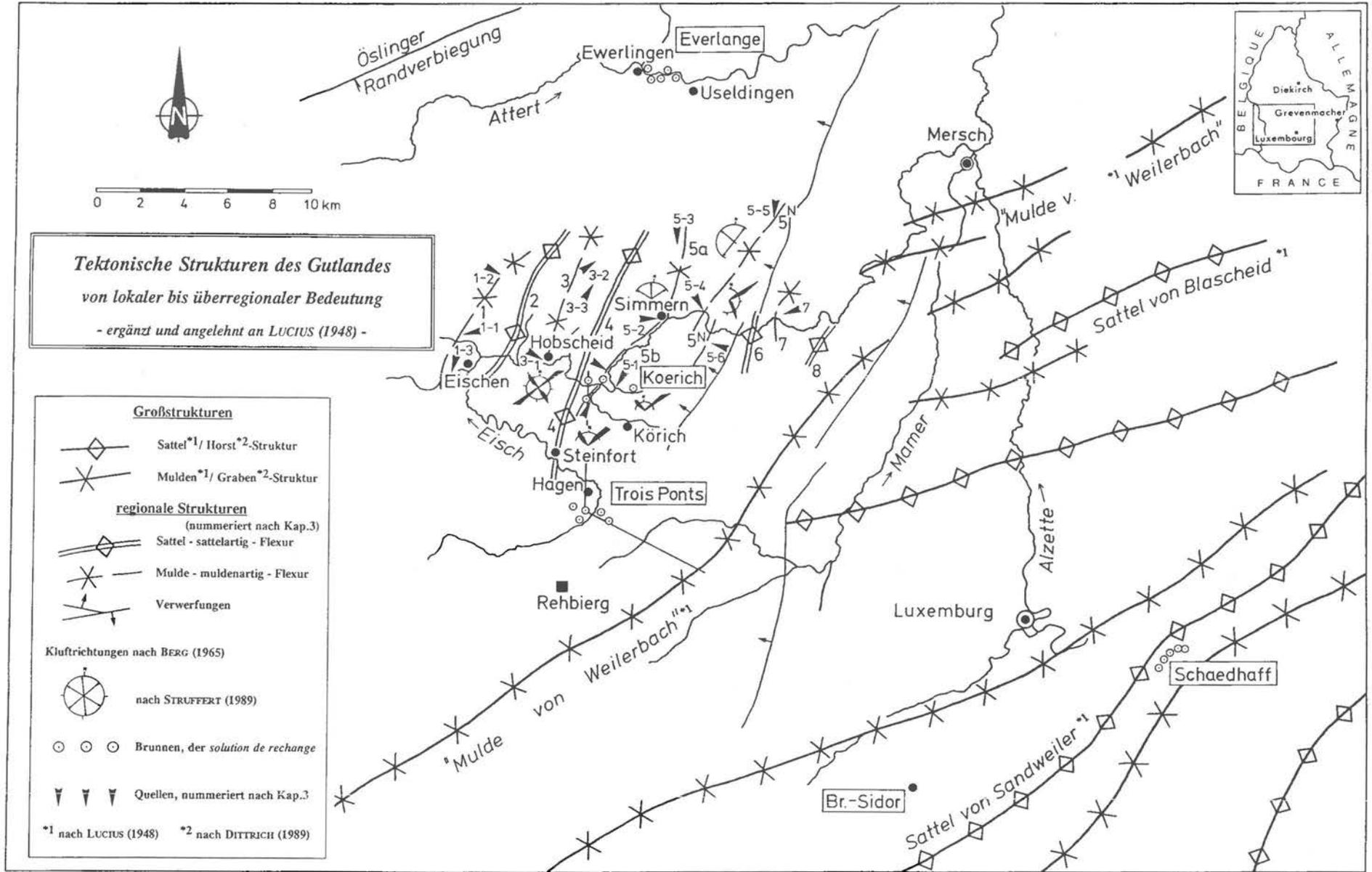
In Koerich ermittelte v.HOYER (1971b) mittels eines Tracerversuches über eine Strecke von 300 m zwischen zwei Brunnen bei einer Förderleistung von 40 m³/h (in einem der ehemaligen Brunnen *Bafelt*) eine maximale Fließgeschwindigkeit von $4 \cdot 10^{-3}$ m/sec. In anderen Gebieten Luxemburgs ermittelte er, ebenfalls durch Tracerversuche, im Luxemburger Sandstein maximale Fließgeschwindigkeiten von $1 \cdot 10^{-2}$ und $3 \cdot 10^{-2}$ m/sec. Für die Grundwasserneubildungsrate hat sich in der Praxis des Service Géologique eine Größenordnung von 25% bis 30% des Niederschlages als praktikabel herausgestellt (vergl. BINTZ 1965). Hierbei muß die Bodenbildung auf der Luxemburger Sandstein-Schichtstufe berücksichtigt werden. Im Bereich der sandigen, fast vollständig bewaldeten Böden wird dieser Wert größer sein, was sich aus Beobachtungen einiger Quellschüttungen ableiten läßt. V.HOYER (1971a, S.15) gibt für diese Böden Versickerungsgeschwindigkeiten zwischen $3,5 \cdot 10^{-5}$ und $7 \cdot 10^{-5}$ m/sec an. Sind in den Böden des Lias-Plateaus noch Reste mergeliger Schichtfolgen vorhanden oder ist gar eine mergelig-kalkige Bedeckung verbreitet, so ist der Oberflächenabflußanteil dominant. Eine Infiltration des Niederschlages erfolgt dann erst, wenn die Entwässerungssysteme den Luxemburger Sandstein anschneiden. Die Versickerung in diesen Entwässerungsrissen ist so gut, daß ein oberflächlicher Abfluß in den Vorfluter nur nach längeren kräftigen Niederschlägen stattfindet.

Liegt die Kontaktfläche Luxemburger Sandstein/Psilonoten-Schichten oberhalb des Vorflutniveaus, folgen die Grundwasserfließrichtungen dem Relief des Stauhorizontes. Dieser Horizont tritt im Gutland auf einer Länge von 220 km zutage und ist aufgrund vieler ergiebiger, zur Trinkwassergewinnung gefaßter Quellen der wichtigste Quellhorizont Luxemburgs. Die Mehrzahl der 63 Quellfassungen der SES nutzt solche Schichtquellen, deren perennierende Schüttungen nur einer geringen saisonalen Variation unterliegen. Aus der eigentümlichen Verteilung dieser Quellen im Tal der Eisch, aus der Höhenlage des Kontaktbereiches, aus den Aufwölbungen der Roten Tone und aus der Kenntnis der tektonischen Großstrukturen und Lineamente läßt sich auf einen im folgenden zu beschreibenden NNE-SSW streichenden Mulden- und Sattelbau schließen.

Die in Abb. 10 eingetragenen tektonischen Elemente und die ergänzten mulden- bis sattelförmigen Strukturen bzw. Depressionszonen werden durch die folgenden Ausführungen von LUCIUS (1948, S.155ff) erläutert (W-E nummeriert; [] Ergänzungen des Autors).

- 1 Die Mulde der Gaichel bei Eischen, die in NE-Richtung bis in den Langengrund bei Hovelingen [Hovelange] zieht. Diese Mulde bildet das Einzugsgebiet der Quellengruppen der Gaichel [1-1], des Langengrund südlich Hovelingen [1-2] sowie des "Bach" im Faubourg bei Eischen [1-3].
- 2 Im Eischtal zeigt sich zwischen Eischen und Hobscheid ein Hauptsattel, in dessen Kern sich die roten Tone des Rhät über das Talniveau erheben. Der Sattel setzt sich nach NE fort und ist durch die hohen Lagen der Pylonoten-Schichten sowie das Auftreten der roten Tone des Rhät in hoher Lage zwischen Hovelingen und Schweich deutlich ausgeprägt. Der auffallende Mangel an Quellen im Tale der Eisch zwischen Clairefontaine und Hobscheid sowie am Nordrande zwischen Hovelingen und Schweich ist durch die sattelförmige Lage der Sandsteine bedingt

Abb. 10: Tektonische Strukturen des Gutlandes



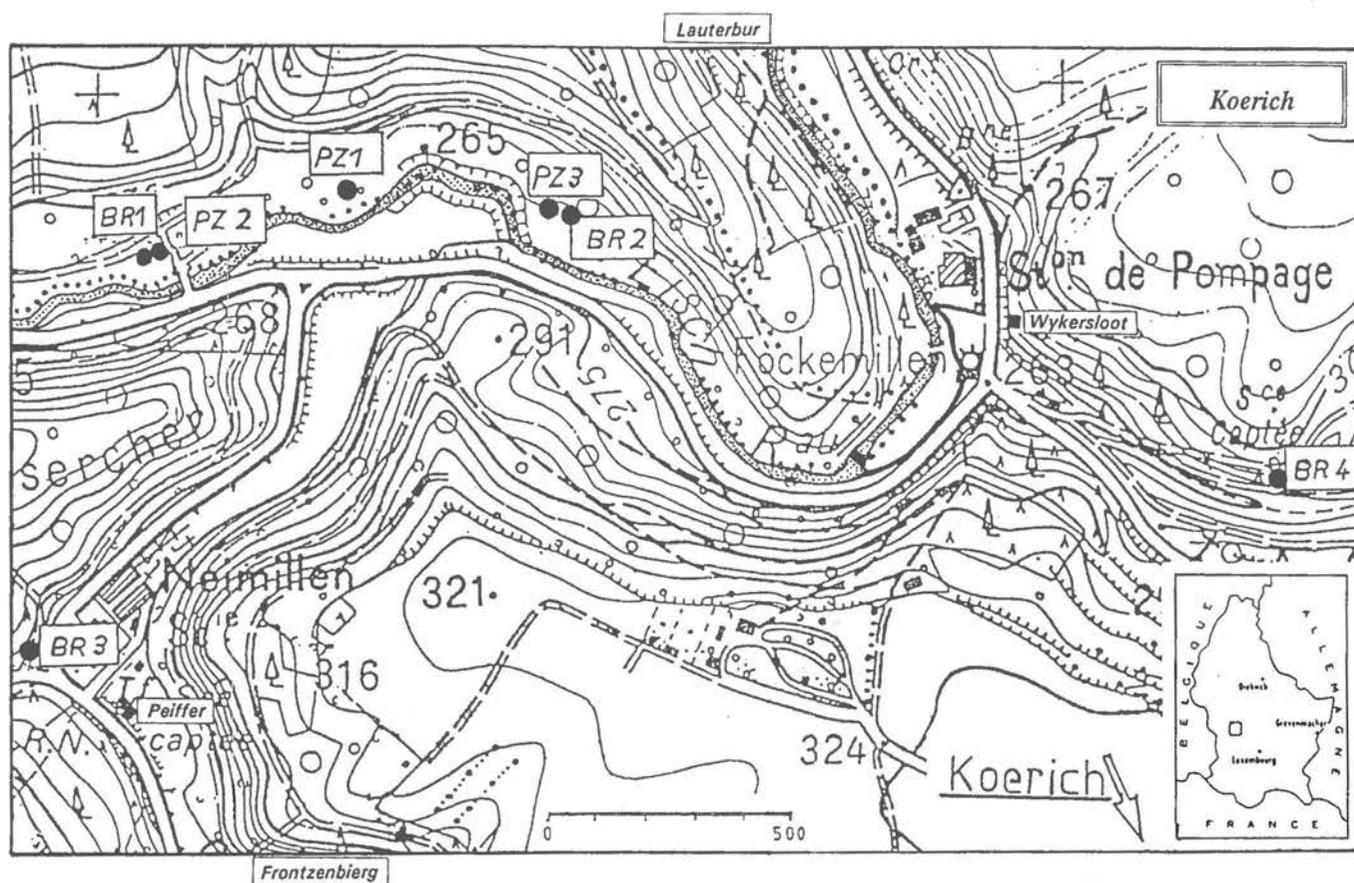


Abb. 11: Lageplan Koerich

- 3 Die Mulde von Hobscheid läßt sich nach Norden bis an den Wasserbach bei Ehner verfolgen und umschließt die Quellgruppen von Hobscheid [3-1] im Süden, sowie die Gruppen des "Letzert" [3-2] und des "Wasserbach" bei Ehner [3-3] im Norden.
- 4 Der Sattel Steinfort-Ehner ist im Süden durch das weite Vorspringen des Sandsteines bis nördlich Hagen, im Norden durch die Lage der roten rhätischen Tone gekennzeichnet. Im Eischtal ist er kaum angedeutet. Die Zone fällt jedoch hier durch das Fehlen aller Quellen auf.
- 5 Die **Hauptmulde Körich-Simmern** [Septfontaines] -**Ditzenberg** [Ditzebiert; bei Calmus]. Bei Körich ist die Mulde durch das weite Vordringen des Arieten-Kalkes [Mergel und Kalke von Strassen] nach Norden, bei Ehner durch das Vordringen des Sandsteines nach Norden, bezeichnet. Im Tal der Eisch ist die Mulde in zwei Teilmulden zerlegt, die sich ablösen: a) Die Mulde Simmern-Calmus im Norden, b) Die Mulde des Fraschtenhof bei Körich im Süden. Diese Zone bildet jedenfalls die tiefste Einbiegung des Sandsteines im Eischtal und umfaßt drei Hauptgruppen von starken Quellen: a) Die Quellen von Körich [5-1], b) Die Quellen von Simmern [5-2], c) Die starke Einzelquelle bei Calmus [5-3].
Im Ostflügel der Hauptmulde sind mehrere **Nebenumulden** eingeschaltet mit gut begrenzten Quellengruppen. Es sind dies die Nebenumulde von Greisch, die bis nach Brouch hinzieht. In ihr treten im Süden die Quellengruppe der Mühle Leesbach [5-4], im Norden die Quellengruppe westlich Brouch [5-5] auf. Südlich der Eisch liegt die Nebenumulde der Simmerschmelz mit einer starken Quellengruppe [5-6].
- 6 Im Osten wird die Hauptmulde Körich-Simmern durch einen Rücken begrenzt, in dessen Kern bei Roodt[-sur-Eisch] die roten Tone des Rhät anstehen. Nach Süden wird der Sattel von Roodt durch eine Verwerfung abgelöst, die bis nach Göblingen [Goebblange] zu verfolgen ist [nicht auskartierbar, STRUFFERT 1989]. Nach Norden geht der Sattel in die Verwerfung von Tüntingen [Tuntange] über, die bis nach Bissen hinzieht.

- 7 Östlich des Sattels von Roodt liegt die Mulde von Bour mit einer Quellengruppe bei Bour [7].
- 8 Im Osten wird diese Mulde durch den kräftig betonten Hauptsattel von Dondelingen [Dondelange] begrenzt, welcher die stärkste Aufwölbung des Eischtals bildet. Im Sattelkern tritt Steinmergelkeuper auf. Doch wird der Sattel im Eischtal selbst durch eine West-Ost streichende Verwerfung im Norden abgeschnitten.

Die Quellengruppen am nördlichen Erosionsrand der Sandstein-Schichtstufe, "Letzert"[3-2], "Wasserbach"[3-3] und die Quelle bei Calmus [5-3] werden von der DEA genutzt. Die Quellgruppe bei Hovelange [1-2] dient zur Trinkwasserversorgung der Kommune Beckerich. Die Quellen im Bereich des Eischtals sind von der SES gefaßt.

Die Förderbrunnen der *solution de rechange* sind inmitten der Hauptmulde Koerich-Septfontaines-Ditzebiert (Nr.5) positioniert (vergl. Lageplan Abb.11). Die Brunnen KBR1, KBR2 und KBR3 liegen im südlichen Teil der Hauptmulde (Nr.5b, Abb.10), im Bereich der tiefsten Einsenkung des Sandsteines. Der Brunnen KBR3 ist in der Nachbarschaft zur Quelle "Peiffer", am südlichen Talrand von Eisch und Koerbach, abgeteuft worden. KBR1 und KBR2 sind im Eischtal nördlich der Eisch aufgereiht und üben einen Einfluß auf die weiter nördlich gelegene Quelfassung "Lauterbur" aus. Beide Brunnen sind jeweils nur wenige Meter neben den alten Brunnen Bafelt I bzw. Bafelt II, heute als KPz2 und KPz3 bezeichnet, abgeteuft worden. Der Brunnen KBR4 liegt einige hundert Meter östlich der Pumpstation, auf der östlichen Flanke der Hauptmulde.

Diese Brunnenpositionen gehen auf eine Untersuchung von v.HOYER (1971b) zurück. V.HOYER errechnete, gestützt auf Abflußmessungen, eine maximal mögliche Grundwasserförderung im Raum Koerich von 720 m³/h. Dieses Grundwasserangebot stellt er in einem Profilschnitt als sog. "Tiefenwasser" (wassererfüllter Raum des Aquifers, der nicht von Quellen entleert werden kann) dar. Hierbei weist er deutlich auf die sich bei einer Grundwasserförderung einstellenden, hydraulisch bedingten Wechselwirkungen zwischen den Quellschüttungen und den Strömungsbedingungen der Vorfluter (Effluenz / Influenz) hin und zeigt potentielle Verschmutzungsgefährdungen auf.

Eisch

Im Oberlauf der Eisch herrschen, wie z.B. im Gebiet von Trois Ponts, auf den geringdurchlässigen Deckschichten schwere Böden vor. Bei größeren oder längerfristigen Niederschlägen nimmt die Eisch in diesen Gebieten den gesamten Oberflächenabfluß (A_0) auf, so daß es regelmäßig zu Hochwässern und Überschwemmungen kommt. Mit dem Eintritt der Eisch in den Luxemburger Sandstein wird die Wasserführung, bedingt durch die gute Korrespondenz mit dem Grundwasserleiter, ausgeglichener. Ihr relativ großer Niedrigwasserabfluß (NNQ) ist ein Zeichen für ergiebige natürliche Grundwasserzuflüsse aus dem Luxemburger Sandstein (Effluenz).

Diesen Grundwasserzutritten ist auch ein gewisser Verdünnungseffekt bei der Betrachtung der Abwasserbelastung der Eisch durch die anliegenden Gemeinden zuzuschreiben. Bei den im Sommer 1973 von der "Administration de l'Environnement Luxembourg" durchgeführten Zustandsanalysen sind die Meßstellen Steinfort, Eischen, Hobscheid als "mäßig belastet" eingestuft worden, während im Bereich der Pumpstation der SES ein "gering belasteter" Verschmutzungsgrad angetroffen wurde. Auf der Fließstrecke Eischen-Hobscheid fließen der Eisch in den Som-

mermonaten nur geringe Mengen aus den Überläufen der Quellfassungen zu (wegen großen Trinkwasserbedarfs). Ein Zutritt von Grundwasser in größerer Menge ist erst unterhalb der Ortschaft Hobscheid zu erwarten, wo die Muldenposition den Einschnitt des Eischtales in den unteren, wasserfüllten Teil des Luxemburger Sandsteines bedingt, so daß eine Verdünnung nur auf der Strecke: Hobscheid - SES-Koerich erfolgen kann (NNQ Okt. 1969 Pegel Hobscheid: 250 l/sec; Pegel *Bafelt*: 400 l/sec; Pegel SES_(alt)-Koerich: 480 l/sec; v.HOYER 1971b). Nach Inbetriebnahme der Kläranlage mit biologischer Aufbereitungsstufe in Steinfort im Jahre 1979 war die Eisch im Sommer 1988 an allen erwähnten Meßstellen als "gering belastet" einzustufen. Mit der Fertigstellung der Kläranlage für die Gemeinden Hobscheid und Koerich ist eine weitere Verbesserung der Wasserqualität der Eisch zu erwarten. Die sensibleren, auf einen längeren Zeitraum übertragbaren hydrobiologischen Analysen von 1986 zeigen ebenfalls den Hinweis auf Verdünnungseffekte im Eischverlauf, nach dem Eintritt in den Luxemburger Sandstein. So sind die Meßstellen in Steinfort "stark" bis "mäßig" belastet, während in Eischen, Hobscheid und an der Pumpstation der SES eine "gering belastete" Eisch angetroffen wurde.

Die Verbindung des Talverlaufes der Eisch mit den strukturellen Bedingungen des westlichen Gutlandes ist erstmals von LUCIUS (1948) anhand der Verteilung der Quellgruppen des Luxemburger Sandsteines beschrieben worden (s.o.). Der Einfluß der Klüftung auf das Gewässernetz in Luxemburg ist von BERG (1965) ausgearbeitet worden. Unter Verwendung der entsprechenden Kluftdiagramme (BERG 1965) läßt sich der generelle Verlauf des Eischtales zwischen Trois Ponts und Septfontaines (Simmern) in Bezug auf die Hauptkluftrichtung und die orthogonal dazu verlaufende Querklüftung wie folgt beschreiben (siehe hierzu Abb.10 und Abb.30, 31 in Kap.4).

Zwischen Hagen (bei Trois Ponts) und Eischen verläuft das Eischtal in Richtung der Querklüftung. In der Gegend von Eischen folgt das Eischtal ungefähr der Richtung der Hauptklüftung, um unweit nördlich von Eischen wiederum in einen querklüftungsparellen Verlauf umzuschwenken. Diese Richtung wird bis zur Pumpstation der SES bei Koerich eingehalten. Der "U-förmige" Bogen des Eischverlaufes westlich von Hobscheid läßt sich wiederum auf die beiden dominanten Kluftrichtungen zurückführen. Im Arbeitsgebiet, bei der Pumpstation der SES in Koerich, ändert das Eischtal mittels einer Flußschlinge die Richtung und biegt in die Hauptkluftrichtung ein. Von da an folgt der Talverlauf der Depressionsachse der "Hauptmulde" *Koerich-Simmern-Ditzbiereg* (Sattel-/Mulde-Nr.5 s.o.) bis nach Septfontaines (Simmern). Mit dem Eintritt in die Hauptmulde verbreitert sich das Eischtal sehr schnell. Die Erosion hat dabei das Eischtal bis zur Basis des Sandsteines, z.T. bis in die Pisonoten-Schichten, eingeschnitten und ausgeräumt. Die relativ breite Talau wird von typischen Talauensedimenten bzw. -böden aufgebaut (STRUFFERT 1989)

4 Hydraulische Untersuchungen

Die geohydraulischen Untersuchungen in Koerich und Trois Ponts stützen sich in erster Linie auf Pumpversuche. Die Pumpversuche wurden unter Beachtung der allgemeinen Hinweise zur Durchführung von Pumpversuchen (z.B.: KRUSEMAN & de RIDDER 1973) und mit Berücksichtigung der speziell auf Pumpversuche in Festgesteinen ausgerichteten Hinweise bei STOBBER (1984, 1986) und STRAYLE (1983) durchgeführt. Eine aktuelle Literaturzusammenfassung zur Ermittlung hydrogeologischer Parameter in Kluftgrundwasserleitern findet sich im Teil I bei HUBER (1992).

Bei einem ersten Langzeitpumpversuch sollte jeweils der Grundwasserleiter mit der Hälfte der projektierten maximalen Leistung und einer Förderung aus allen Brunnen möglichst großräumig aktiviert werden. Um einen auswertbaren Eindruck von der Höflichkeit der Kluftgrundwasserleiter an den Standorten zu bekommen, sollten bei mäßigen Absenkungen quasistationäre Strömungszustände erreicht und für einige Zeit dokumentiert werden. Die folgenden Pumpversuche dienen mehr dem Test maximaler Betriebszustände mit maximalen Absenkungen und den sich daraus ergebenden Prognosen. In Kap. 1.3 wurden diese und weitere Untersuchungsansätze dargestellt. Die Grundwasserentnahmen durch die SEBES (vergl. Abb.18) dienen dem Test der Anlagensteuerung und abschließend der Durchführung eines Testbetriebes.

In Trois Ponts wurden zusätzlich in den Piezometern Grundwassertemperaturprofile aufgenommen. Diese zu unterschiedlichen Grundwasserströmungsbedingungen aufgezeichneten Temperatur-Logs lassen über signifikante Kurvenverläufe Rückschlüsse über Durchlässigkeit, Klüftung und Lithologie zu.

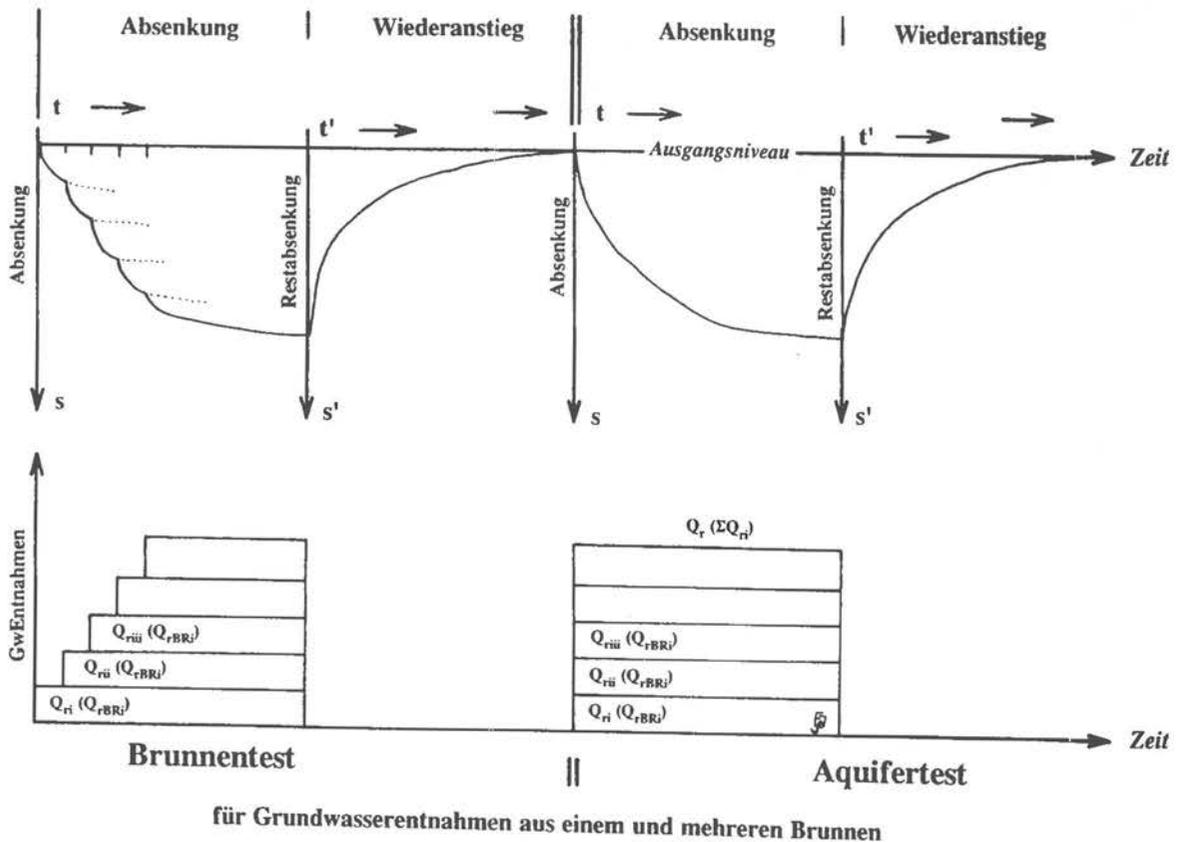


Abb. 12: Nomenklatur, Konventionen, Aufgabenstellung von Pumpversuchen

In diesem Kapitel werden die folgenden Abkürzungen durchgehend verwendet.

spezielle Abkürzungen in Kap. 4

B	Leakage-Faktor [m]
B_p	barometrischer Koeffizient [%]
b	Breite
E_{GWL}	Elastizitätsmodul des Korngerüstes des Grundwasserleiters
E_W	Elastizitätsmodul von Wasser; $E_W = 1 \cdot K^{-1}$
e	EULER'sche Konstante; 0,5772
F	Fläche; Einheitsfläche $F^* = 1 \text{ m}^2$
h	Höhe des Wasser- oder Druckspiegels über Aquiferbasis [m]
i	hydraulischer Gradient; GwSpiegelgefälle
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert; $k_f = T \cdot h^{-1}$ [m sec ⁻¹]
$k_{f \rightarrow v}$	k_f -Wert für vertikal gerichtete Strömung
K	Koeffizient der Kompressibilität von Wasser; $4,789 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$
L	Länge des hydraul. Anschlusses der GwMeßstelle an Schichtfolge [m]
m_w	wassererfüllte Mächtigkeit des Grundwasserleiters [m]
\bar{n}	Porosität (Gesamtporosität), Hohlraumanteil [%]
\bar{n}_{eff}	effektive Porosität, nutzbarer bzw. wirksamer Hohlraumanteil [%]
P_0	Luftdruck
Q	Grundwasservolumenstrom [m ³ /h]
Q_r	mittlere gewichtete Förderrate [m ³ /h]
Q_g	Gesamtentnahme an Grundwasser durch Pumpversuch [m ³]
r	Entfernung, Abstand: Brunnen - GwMeßstelle [m]
R	Reichweite einer GwSpiegelabsenkung [m]
s	Absenkung gegenüber dem Ausgangswasserspiegel [m]
s'	Restabsenkung der Wiederanstiegsphase [m]
δs	Absenkung pro log.-Zyklus [m]
S	Speicherkoeffizient
S_s	spezifischer Speicherkoeffizient; $S = S_s \cdot H$; $S = S_s \cdot h$
t	Zeit in der Pumpphase eines Pumpversuches
t'	Zeit in der Wiederanstiegsphase eines Pumpversuches [m]
t^*	"gewogenes log. Mittel", korrigierte Zeit von $s_{(tn)}$
T	Transmissivität [m ² /h]
$T_{\rightarrow v}$	T-Wert bei vertikal gerichteter Strömung
v_a	Abstandsgeschwindigkeit
v_f	Filtergeschwindigkeit
W	Wasserstand, Standrohrspiegelhöhe [mNN]
$W_{(u)}$	sog. Brunnenfunktion nach THEIS (well function)
Γ	spezifische Dichte von Wasser; 9807 N m^{-3}
Δ	aufgetretene Differenz
ϕ_{Brg}	Durchmesser der Bohrung
σ, τ	Variable

Die Meßstellennetze sind lokal um die jeweiligen Entnahmestellen herum eingerichtet, so daß eine überregionale Betrachtung großräumiger Grundwasserströmung nur durch eine interpretative Einbindung der Untersuchungsergebnisse in den Rahmen regionaler, hydraulisch wirksamer Elemente möglich ist.

Die Auswertung der Pumpversuchsdaten aus Koerich und Trois Ponts wird mit Auswerteverfahren für instationäre Strömungszustände durchgeführt. Die hierdurch ermittelten Aquiferkennwerte führen unter Betrachtung stationärer Strömungsbedingungen zu weiteren abgeleiteten geohydraulischen Größen und charakteristischen Aquifereigenschaften.

Mit Hilfe dieser neuen Erkenntnisse werden die natürlichen (Ruhe-) Strömungszustände und die aktivierten Strömungsbedingungen der Absenkungsphasen quantitativ erfaßt.

4.1 Trois Ponts

4.1.1 Ausgangssituation

Eine hydrogeologische und hydraulische Gliederung der am Standort Trois Ponts durch fünf Brunnen, fünf Piezometer und eine Piezometergruppe aufgeschlossenen Schichtfolge soll anhand der Abb. 7, 8 und 9 erfolgen. Der im Mittel 72 m mächtige Grundwasserleiter aus unverwittertem Luxemburger Sandstein (li_2) führt ein gespanntes und chemisch reduziertes Kluftgrundwasser. Bei einem hier nach Südwesten gerichteten Einfallen nimmt die Überdeckung von TPPz5 (26 m) über TPBR3 (38 m) nach TPBR4 (83,5 m) zu. Die Deckschichten bestehen aus insgesamt gering durchlässigen, im Mittel 8 m mächtigen Mergeln und Kalken von Strassen (li_3) und aus den Fossilarmen Tonen (li_4). Drei eigenständige Grundwassermeßstellen TPPg16, TPPg35 und TPPg50 erschließen, als Piezometergruppe bezeichnet, diese Schichtfolge (Abb.9). Mit 16, 35 und 50 ist die Endteufe (in m) der jeweiligen Filterstecke angegeben. TPPg50 erschließt, ca. 4 m im Hangenden des Luxemburger Sandsteins, Grundwasser aus der Kalkstein-Mergel-Wechselfolge. Aus den Problemen bei der Erstellung dieser Grundwassermeßstelle wird geschlossen, daß das Mergelpaket, in dem ein Kernverlust (vergl. Abb.9) auftrat, maßgeblichen Einfluß auf den hydraulischen Anschluß der Grundwassermeßstelle an die Gesteine der Mergel und Kalke von Strassen hat (STRUFFERT 1990). Die Filterstrecken der anderen beiden Piezometer sind in den Fossilarmen Tonen in Positionen angeordnet, die bei den Voruntersuchungen als klüftiger und somit wasserwegsam erschienen.

Die Kürzel (li_1 , li_2 , li_3 , li_4) werden auch im folgenden ausschließlich im Sinne der in Kap. 2.1 dargestellten Definition verwendet.

Die Aufzeichnungen der Standrohrspiegelhöhen der Grundwassermeßstellen der Pegelgruppe und des Piezometers TPPz1 (im li_2) zeigen vier unterschiedliche Grundwasserspiegel (siehe Abb.13). Mit 305,79 m üNN liegt der Grundwasserspiegel von TPPg50 1,2 m unter Gelände und 1,35 m über dem Druckspiegel des Aquifers Luxemburger Sandstein. Bei diesem Ruhespiegel am 16.03.1990 liegen die Grundwasserspiegel in TPPg16 bei 305,61 m üNN, in TPPg35 bei 305,26 m üNN und im TPPz1 bei 304,44 m üNN. Eine graphische Darstellung des Ruhespiegels im Luxemburger Sandstein geben Abb. 15 und 18.

Aus Abb. 13 ist über einen Zeitraum von 29 Monaten erkennbar, daß keine der Grundwasserganglinien der Deckschichten auf die entnahmebedingten Schwankungen im Druckspiegel des Luxemburger Sandsteines reagiert. Die geringen Schwankungen (wenige cm) in den Ganglinien von TPPg16 und TPPg35 sind gut mit stärkeren Niederschlagsereignissen zu korrelieren. Der monotone Anstieg in TPPg50 zeigt den Wiederanstieg in der Meßstelle, nachdem sie im April von Bohrspülungsresten gereinigt und geleert wurde. Bei diesen Arbeiten

Trois Ponts - TPPg - TPPz1

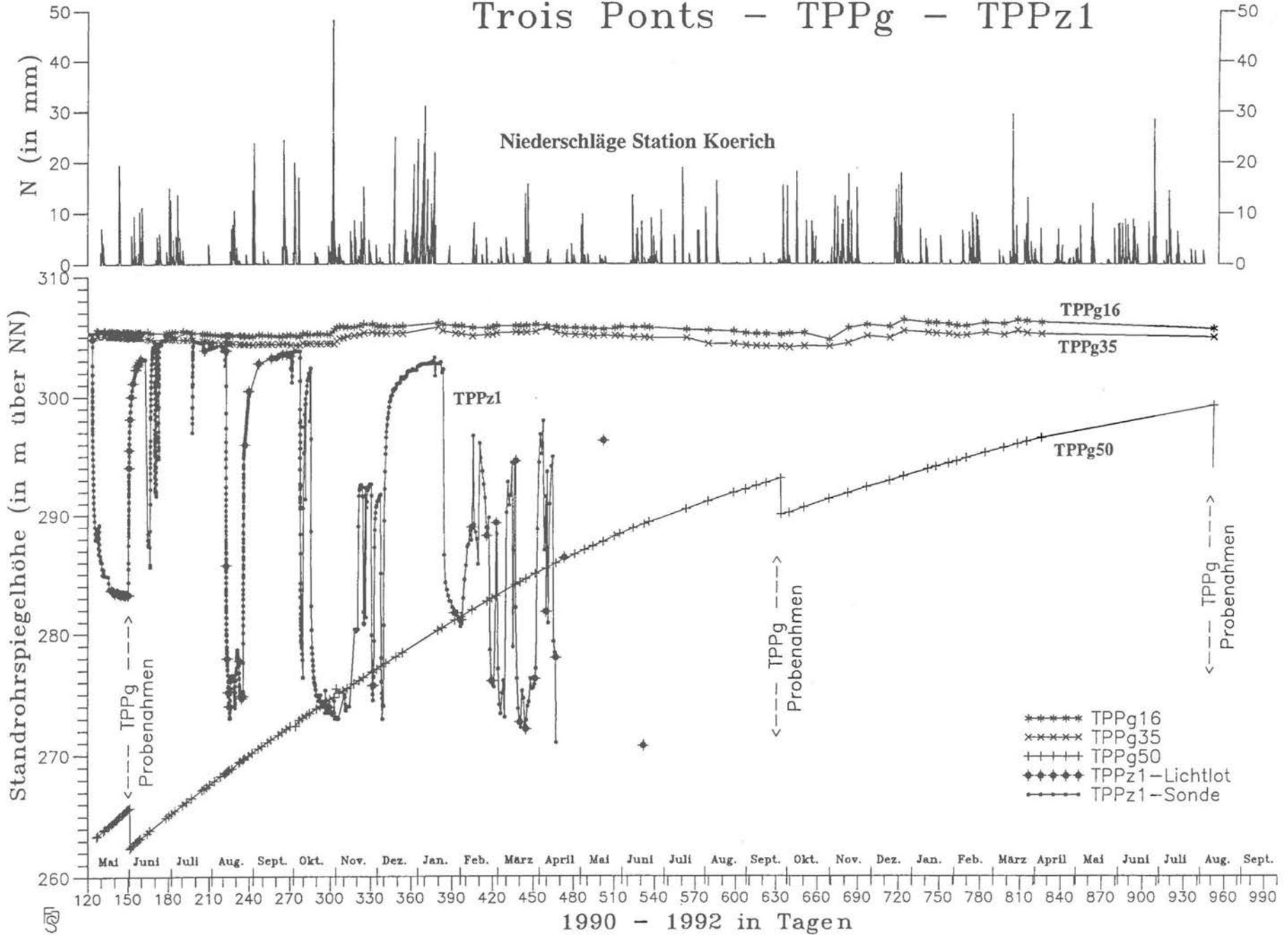


Abb. 13: Ganglinien der Piezometer der Deckschichten (TPPg16, TPPg35, TPPg50) und des Luxemburger Sandsteines (TPPz1) in Relation zu den Niederschlägen an der Station Koerich

zeigte sich, daß in den Meßstellen TPPg16 und TPPg35 bereits nach einigen Stunden der Ausgangsspiegel wieder erreicht war.

4.1.1.1 Grundwassertemperaturprofile

Mit Hilfe von teufenorientierten Grundwassertemperaturmessungen in den Piezometern in Trois Ponts sollen Bereiche in der aufgeschlossenen Schichtfolge lokalisiert werden, in denen unterschiedliche Grundwasserströmungen herrschen. Aus diesen Informationen lassen sich dann Rückschlüsse auf Zonen besonderer (Kluft-) Durchlässigkeit und auf die unterschiedlichen Aktivierungszustände des Aquifers ableiten. Für diese Messungen wurden die Piezometer ausgewählt, da in ihrem Umfeld keine entnahmebedingten Störungen des Fließgeschehens auftreten.

Die Piezometer sind mit einem 2"-Ausbau erstellt worden und, wie die Entnahmebrunnen, vollkommen verfiltert. Es wurden zwei Meßserien zu unterschiedlichen Grundwasserströmungsbedingungen aufgenommen. Eine Meßserie dokumentiert die natürliche Grundwasserströmung. Kurzzeitig auftretende, geringfügige Entnahmen aus TPBR3 verändern diesen Ruhezustand nicht. Die andere Meßserie wurde zum Zeitpunkt einer seit mehreren Tagen bestehenden maximalen Grundwasserförderung erstellt. Die Temperaturaufnahmen wurden im Herunterlassen mit einer Messung pro m-Teufe und einer Genauigkeit von $\pm 0,025^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Temperaturverteilung in der Luftsäule im Standrohr oberhalb der Grundwassersäule wurde nicht aufgenommen.

Pofildarstellung

Die Grundwassertemperatur-/Teufenprofile sind auf NN bezogen, auf ein Bezugsniveau von 300 m üNN eingehängt und in Abb. 14 dargestellt. Zur besseren Interpretation der Temperaturkurven sind die Meßstellenausbauten nebst erbohrter Lithologie und stratigraphischer Gliederung angefügt.

Aus den Temperaturverläufen lassen sich charakteristische Temperaturgradienten ermitteln. Auf den ersten Blick zeigen die Temperaturprofile eine Dreigliederung, die sich in drei Gruppen von Temperaturgradienten widerspiegelt.

Es wird im folgenden bei der Steigung der Ausgleichsgeraden an die jeweiligen Temperaturkurvenabschnitte von (Grundwassertemperatur-) Gradienten gesprochen, da bei der Interpretation der (GwTemperatur-) Kurven eine Beziehung zwischen Grundwasserströmung und GwTemperatur-/Teufenverlauf aufgestellt wird. Bei diesen differenzierten Betrachtungen stehen die auftretenden Temperaturverteilungen im Untergrund mittelbar mit dem regionalen geothermischen Gradienten in einem Zusammenhang.

- In den Deckschichten (Profile TPPg) und im Übergangsbereich von den Deckschichten (li_4/li_3) in den Grundwasserleiter (li_2) verlaufen die Temperaturkurven streng gleichsinnig bis z.T. kongruent. Dabei treten Temperaturgradienten von $3,3 \pm 0,4^\circ\text{C}/100\text{m}$ auf.
- Die Temperaturgradienten der Ruhestromung liegen bei $1,4 \pm 0,7^\circ\text{C}/100\text{m}$.
- Bei maximaler Grundwasserförderung verteilen sich die Kurvenverläufe zu Gradienten von $0,7 \pm 0,1^\circ\text{C}/100\text{m}$.

Die schnellen Temperaturzunahmen in den letzten 9 bzw. 11 Messungen der Meßreihen maximaler Entnahmen in TPPz2 und TPPz3 zeigen einen deutlichen Rückgang der Durchströmung der untersten Bereiche der Meßstellen an. In diesen basalen Bereichen des Aquifers findet der sukzessive Übergang vom Luxemburger Sandstein in die liegenden kalkig-mergeligen Sedimente der Pylonoten-Schichten statt. In TPPz1 und TPPz4 kann dies nicht beobachtet werden, da die Messungen nicht mehr bis in diese Teufen durchgeführt werden konnten.

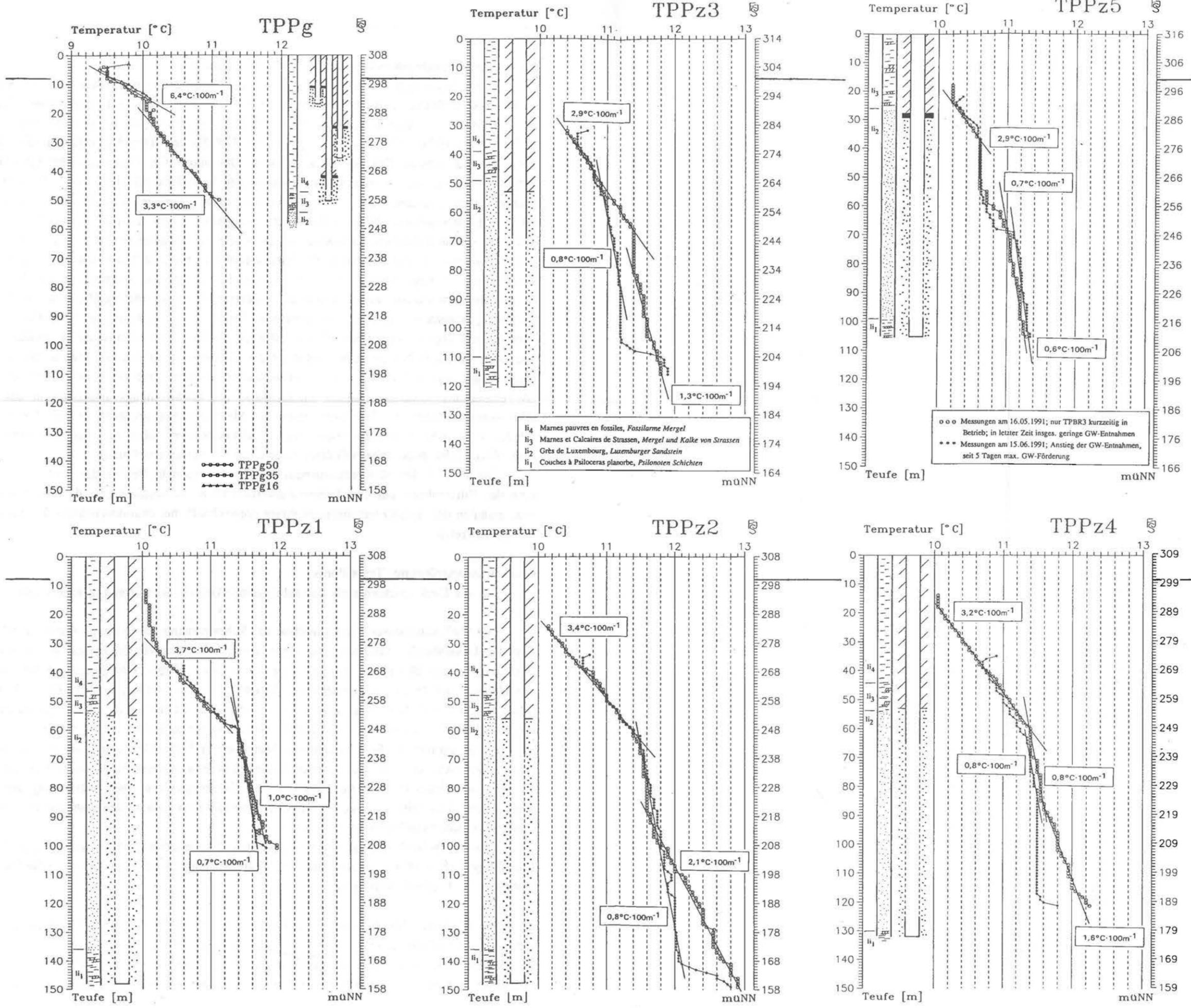


Abb. 14: Grundwassertemperaturprofile in Trois Ponts



Beziehung: Grundwasser-Temperaturprofil / -Strömung

In Bereichen (ggf. Zonen) des Untergrundes, in denen eine ungestörte bzw. unbeeinflusste geothermische Temperaturverteilung auftritt, nimmt die Temperatur mit zunehmender Teufe um ca. $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ zu. Der Übergangsbereich ($li_4/li_3/li_{2(\text{Top})}$) spiegelt diese Bedingungen wider ($3,3 \pm 0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Die Temperaturprofile in TPPg50 und TPPg35 bestätigen dies für den mittleren und tieferen Teil der Deckschichten. Der obere Teil dieser Schichtfolge (TPPg16, TPPg35) ist von den Lufttemperaturschwankungen beeinflusst (Gradient: $6,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Der geothermische Gradient wird in den Temperaturkurven oberhalb einer Wassertemperatur von 10°C und unterhalb von 20 m Teufe sichtbar (langjährige mittl. Lufttemperatur $9,3^{\circ}\text{C}$, FABER 1971). In diesen Bereichen der Deckschichten ist die Grundwasserströmung so gering, daß zwischen Grundwasser und Gestein keine Temperaturunterschiede auftreten und eine unbeeinflusste Temperaturverteilung ermittelt wird. In den von der Grundwasserströmung durchmischten Bereichen des Grundwasserleiters nimmt die GwTemperatur mit zunehmender Teufe nicht zu; es werden \pm konstante Temperaturen gemessen. Dieser strömungsbedingte Temperatenausgleich wird bei mächtigen, weit ausgedehnten, langsam strömenden Systemen der Konvektion zugeschrieben. In kleinräumigeren Systemen ist die Durchmischung des Grundwasserleiters hauptsächlich auf die herrschende lokale Grundwasserströmung zurückzuführen. Unterschiedliche GwTemperaturgradienten erlauben Rückschlüsse auf GwStrömungsvariationen in der aufgeschlossenen Schichtfolge. Die Auswertung der Meßreihen von unterschiedlichen Strömungszuständen bzw. Aktivierungszuständen des Grundwasserleiters führt zu einer halb-quantitativen Einschätzung der quasi unbeeinflussten, natürlichen Grundwasserströmung.

Der Einfluß des Meßstellenausbaus (verfilterter Bereich, Beginn der Kiesschüttung, Beginn des Filterrohres) auf den Temperaturverlauf ist zu vernachlässigen, da in den stehenden Wassersäulen der Aufsatzverrohrung mehrere unterschiedliche, charakteristische Temperaturgradienten auftreten.

Grundwasserströmung, Trois Ponts

Für die Deckschichten muß eine sehr geringe Grundwasserströmung angenommen werden (s.o.).

Die GwTemperaturen der Meßreihen der Ruhestromung gehen einige Meter unterhalb des Top des Luxemburger Sandstein von einem den geothermischen Gradienten widerspiegelnden Verlauf in einen Bereich konstanter Temperatur über. Diese Übergangszone tritt in allen Grundwassermeßstellen im Luxemburger Sandstein auf und variiert in ihrer Erstreckung zwischen ca. 10 m und 20 m. Dieser Bereich des Grundwasserleiters wird ständig gut durchströmt. Die unterhalb dieser Zone einsetzenden flacheren Temperaturkurven zeigen für den quasi Ruhezustand des Aquifers größere Gradienten (Mittelwert: $1,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) und somit eine deutlich geringere Durchströmung an. Die Temperaturkurven bei maximaler Grundwasserförderung verlaufen erheblich steiler (Mittelwert: $0,74^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). Sie zeugen von einer Aktivierung des Grundwasserleiters über seine gesamte Mächtigkeit. Dies läßt sich auch an den über größere Teufenbereiche konstanten GwTemperaturen nachweisen.

Aus diesen Beobachtungen, dem Auftreten von unterschiedlichen Temperaturgradienten in einem Aquiferbereich bei unterschiedlicher Beanspruchung, wird eine veränderliche Durchströmung des Kluftsystems abgelesen.

In TPPz5 tritt dies nicht auf. Hier wird aus den parallelen Kurvenverläufen auf eine kaum veränderte Durchströmung geschlossen. Die geringen Temperaturgradienten von $0,6$ und $0,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ zeigen, daß der Grundwasserleiter in diesem Gebiet voll aktiviert ist. In dieser Meßstelle tritt in 55-70 m Teufe ein Bereich auf, der in seinem Temperaturverhalten dem

geothermischen Gradienten entspricht. Diese Zone geringerer Durchlässigkeit wird mit dem Auftreten von erhöhten Ton- bzw. Mergelanteilen (z.B. dünne Mergellagen) in Zusammenhang gebracht. Die GwTemperaturen dieser Meßstelle sind etwas niedriger als die der anderen, wobei hier die Werte der Meßreihe bei maximaler Grundwasserentnahme geringfügig wärmer sind. Bei allen anderen Temperaturkurven verbleiben die GwTemperaturen bei maximaler Beanspruchung deutlich unter denen der Ruhestromung.

Ein Zusammenhang von gut durchströmten Meßstellenbereichen mit genauer bestimmbareren (Groß-) Kluftzonen ist nicht erkennbar. Aus den insgesamt sehr einheitlich ausgebildeten Segmenten der Temperaturprofile wird auf ein insgesamt gleichmäßig ausgebildetes bzw. sich so auswirkendes (Klein-) Kluftsystem geschlossen, dessen Durchlässigkeit im Ruhezustand nur zum Teil genutzt wird. Diese Vorstellung von einer homogenen formationspezifischen Durchlässigkeitscharakteristik wird im Laufe der Untersuchungen um die Anisotropiebedingungen erweitert. Die Anwendung von "dualen Modellen" im Bezug auf heterogene Kluftsystembedingungen ("double porosity system" oder "double permeability system" z.B.: GRINGARTEN 1984, 1986, PUSCH et al. 1991) scheint bei den auftretenden Durchlässigkeiten nicht angezeigt. Auf die Verwendung von Begriffen wie z.B. Permeabilität, Permeabilitätskapazität usw., die zwar in den Zusammenhang der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit gehören, aber aus der Erdöl- und Erdgasexploration stammen, wird bei diesen rein hydrogeologisch ausgerichteten Untersuchungen verzichtet.

Die differierenden GwTemperaturgradienten führen zu einer Abschätzung der natürlichen Grundwasserströmung. Die Gradienten unterscheiden sich bei den unterschiedlichen Strömungsbedingungen um den Faktor 2. Die quasi unbeeinflusste, natürliche Grundwasserströmung ist deutlich geringer als die durch die maximale Grundwasserentnahme erzeugte Grundwasserströmung. Der Grundwasserleiter Luxemburger Sandstein ist in Trois Ponts unter natürlichen unterirdischen Abflußbedingungen nur zum Teil aktiviert.

Die Auswertung der Pumpversuche zeigt, daß sich die Filtergeschwindigkeiten der Ruhestromung und der vollen Aktivierung um mehrere Größenordnungen unterscheiden können.

In Bezug auf Grundwasserprobenahmen (Kap.6.1) zeigt die Zone konstanter GwTemperaturen, im oberen Bereich der Filterrohre, eine gute Durchmischung des Grundwassers an. Eine Grundwasserprobe aus diesem Bereich kann also als repräsentativ angesehen werden, ohne daß in der Meßstelle vor der Beprobung ein Grundwasseraustausch mit einem Volumen der mehrfachen Kapazität der Meßstelle stattgefunden hat (DVWK 1992).

4.1.2 Pumpversuche in Trois Ponts

Ruhespiegel, Grundwassergleichen 16.03.1990

Den Pumpversuchen ging eine mehrmonatige Beobachtungsphase der Standrohrspiegelhöhen an allen Meßstellen voraus. Hierbei wurden die unbeeinflussten, z.T. täglichen Schwankungen erfaßt. Als Beispiel für natürliche Strömungsbedingungen im Grundwasserleiter Luxemburger Sandstein am Standort Trois Ponts wurde der Grundwassergleichenplan vom 16.03.1990 (Abb.15) ausgewählt.

Die umlaufenden Grundwassergleichen der unbeeinflussten Grundwasserströmung spiegeln das Wechselspiel der im Untergrund dieses Gebietes hydraulisch wirksamen Elemente wider. Die im Abstand von 0,2 m dargestellten Isolinien biegen im Bereich des Standortes von einem \pm W-E Verlauf in einen \pm N-S Verlauf um. Aus den recht gleichmäßigen Abständen der

Isolinien läßt sich ein Grundwasserspiegelgefälle von $\approx 0,08\%$ ableiten. Dieses Gefälle spricht für eine großräumige Ausrichtung des Druckspiegels auf regionale Vorfluter oder auf regional wirksame Wasserwegsamkeiten. Der nach Norden gerichtete unterirdische Abfluß ist auf die Eisch ausgerichtet. Nach Osten, Südosten und Süden findet ein Grundwasserabfluß in die Mulde von Weilerbach statt. Dieses tektonische Lineament biegt unweit östlich von Trois Ponts von einem NNE-SSW Verlauf in einen südwestlichen Verlauf um (siehe Abb.10). Der muldenförmige Charakter der bruchtektonisch beeinflussten Mulde von Weilerbach spiegelt sich in der lokalen Ausrichtung des Schichteinfallens wider. Das generelle Einfallen der Sandsteinplatte bleibt dabei bestehen. Die Mulde von Weilerbach stellt eine besondere, im Einfallen gelegene, unterirdische Wasserwegsamkeit dar. Die Ausrichtung des Ruhewasserspiegels in Trois Ponts auf die Mulde von Weilerbach ist möglicherweise durch eine südliche Fortsetzung des Sattels *Ehner-Steinfort* (Nr.4 in Kap.3 und in Abb.10) verstärkt. Hierfür sprechen die hohen, im Westen gelegenen Standrohrspiegelhöhen. Eine südlich ausgerichtete, unweit westlich Trois Ponts verlaufende Fortsetzung der relativ flachen Sattelstruktur (Nr.4) steht im guten Einklang mit dem relativ steilen Einfallen des Luxemburger Sandsteins nach Südwesten bzw. mit der Heraushebung nach Nordosten. Anzumerken bleibt, daß diese Sattelstruktur im Bereich der Eisch und weiter nach Norden, bis nach Ehner, den Charakter einer unterirdischen Wasserscheide hat.

Grundwassergleichen 29.05.1990, Ende Pumpversuch I

Der Grundwassergleichenplan vom 29.05.1990 (Abb.16) stellt die Grundwasserströmung im Luxemburger Sandstein nach 26 Tagen der Grundwasserentnahme und einen Tag vor Ende der Pumpphase des PV I dar. Mit $40 \text{ m}^3/\text{h}$ wurde in jedem Brunnen ungefähr die Hälfte der projektierten maximalen Förderrate entnommen. In den Piezometern hat sich zu diesem Zeitpunkt bereits seit 5-6 Tagen ein quasistationärer Fließzustand eingestellt (siehe Abb.21).

Das Bild der Grundwasserströmung läßt sich in drei Absenkungsbereiche gliedern.

- Um den Standort herum hat sich ein großräumiger Absenkungstrichter mit einem mittleren Gefälle von $i = 1\%$ gebildet. Die maximale Reichweite der Absenkung ist, bedingt durch das auf die Lokalität begrenzte Meßstellennetz, nicht meßbar. Sie wird in Kap. 4.3 berechnet. Eine Vorstellung zum Einzugsbereich ist in Abb... für die nach Norden gerichtete Grundwasserströmung dargestellt.
- Um jeden der Entnahmebrunnen hat sich im Niveau von ca. 290 bis 280 m üNN der mittlere Teil des Absenkungstrichters ausgebildet. In diesem Bereich beträgt die mittlere Potentialdifferenz ca. 10%.
- Von ungefähr 280 m üNN an versteilen sich die Absenkungstrichter erheblich. So besteht bei einem Abstand von 33,7 m zwischen TPBR1 und TPPz1 ein Unterschied in der Absenkung von 25,32 m (Werte vom 16.03. und 29.05.1990; TPBR1 $s=46,46 \text{ m}$; TPPz1 $s=21,14 \text{ m}$). Die zeichnerische Darstellung kann diese Verhältnisse nur mit Hilfe eines Symbols (Kreis mit radialen Strichen) als inneren Absenkungstrichter wiedergeben. Die größte Absenkung tritt mit 51,5 m in TPBR4 auf. In diesem Brunnen erreicht der Luxemburger Sandstein in einer Teufe ab 85 m seine tiefste Position am Standort Trois Ponts.

Die Prämisse, daß nicht bis in das Niveau des Luxemburger Sandsteins abgesenkt werden soll, ist in diesem Pumpversuch eingehalten worden.

Grundwassergleichen 23.08.1990, Ende Pumpversuch II

Mit dem Grundwassergleichenplan vom 23.08.1990 (Abb.17) wird die Grundwasserströmung am Ende des zweiten Pumpversuches dargestellt. Nach 13 Tagen maximaler (technisch möglicher) Grundwasserentnahmen ist die Gesamtförderrate im Laufe der Absenkung von anfangs $412 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $364 \text{ m}^3/\text{h}$ zurückgegangen.

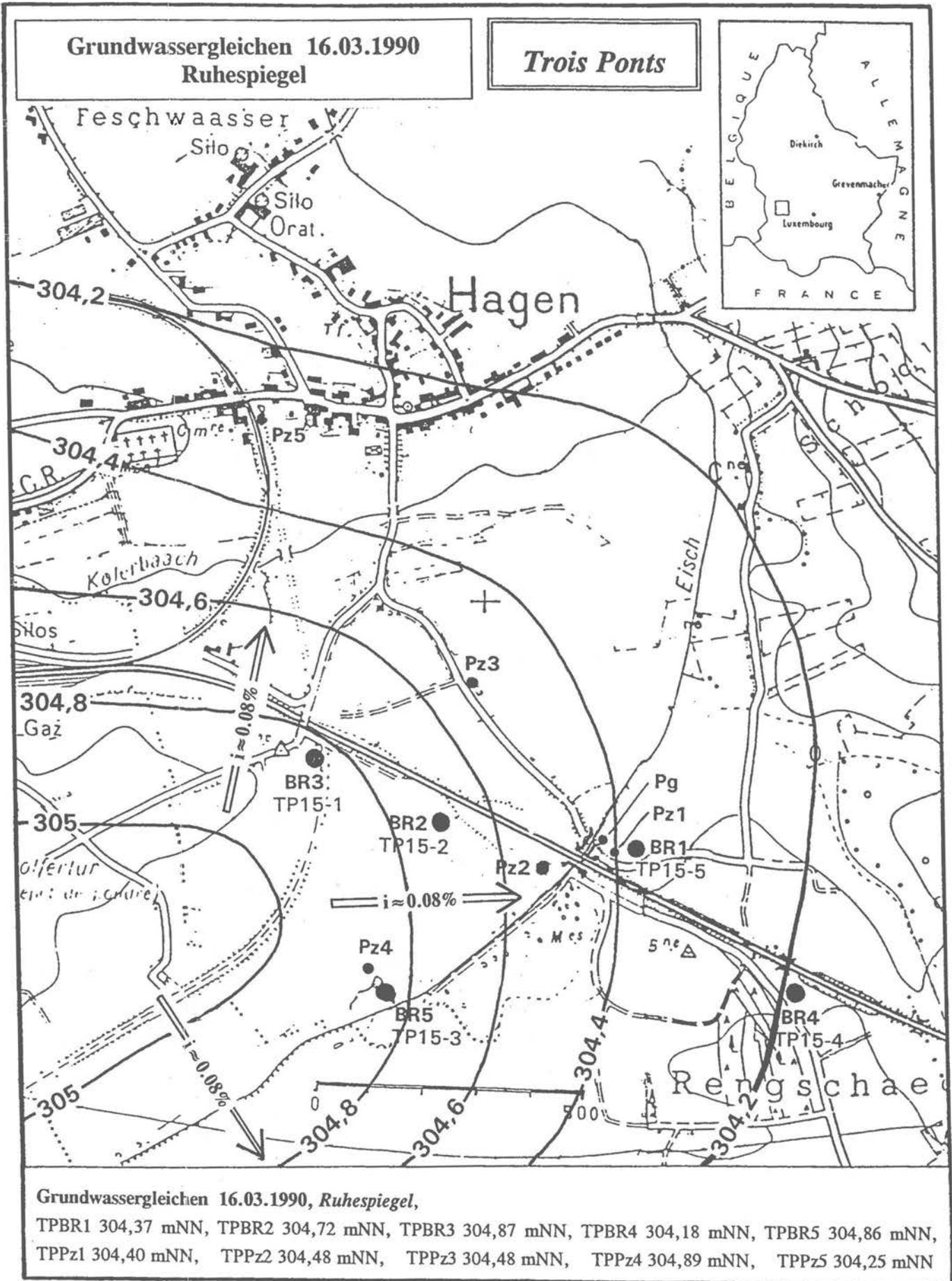


Abb. 15: Plan der Grundwassergleichen vom 16.03.1990 in Trois Ponts (Ruhespiegel)

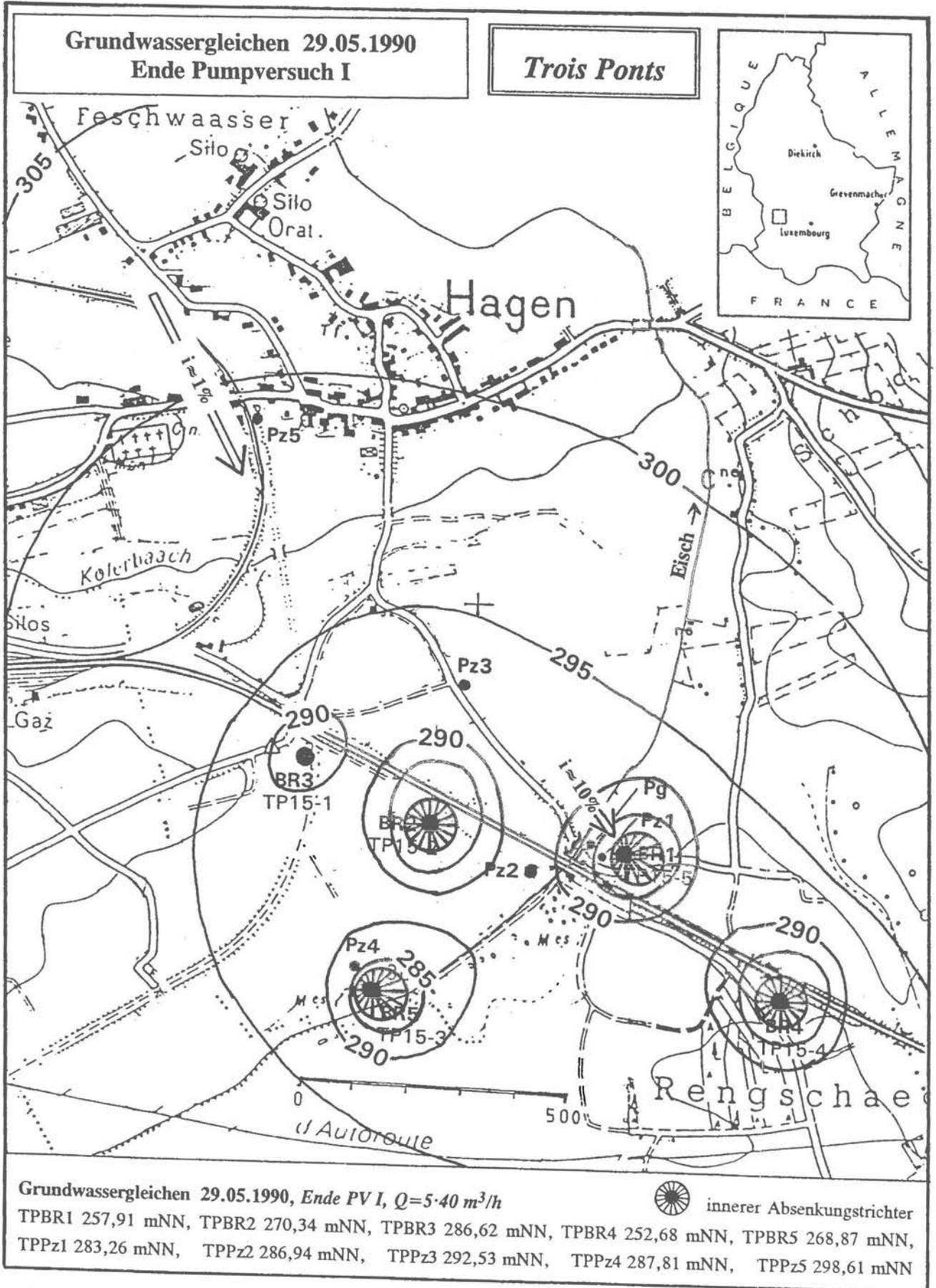


Abb. 16: Plan der Grundwassergleichen vom 29.05.1990 in Trois Ponts (Ende Pumpversuch I)

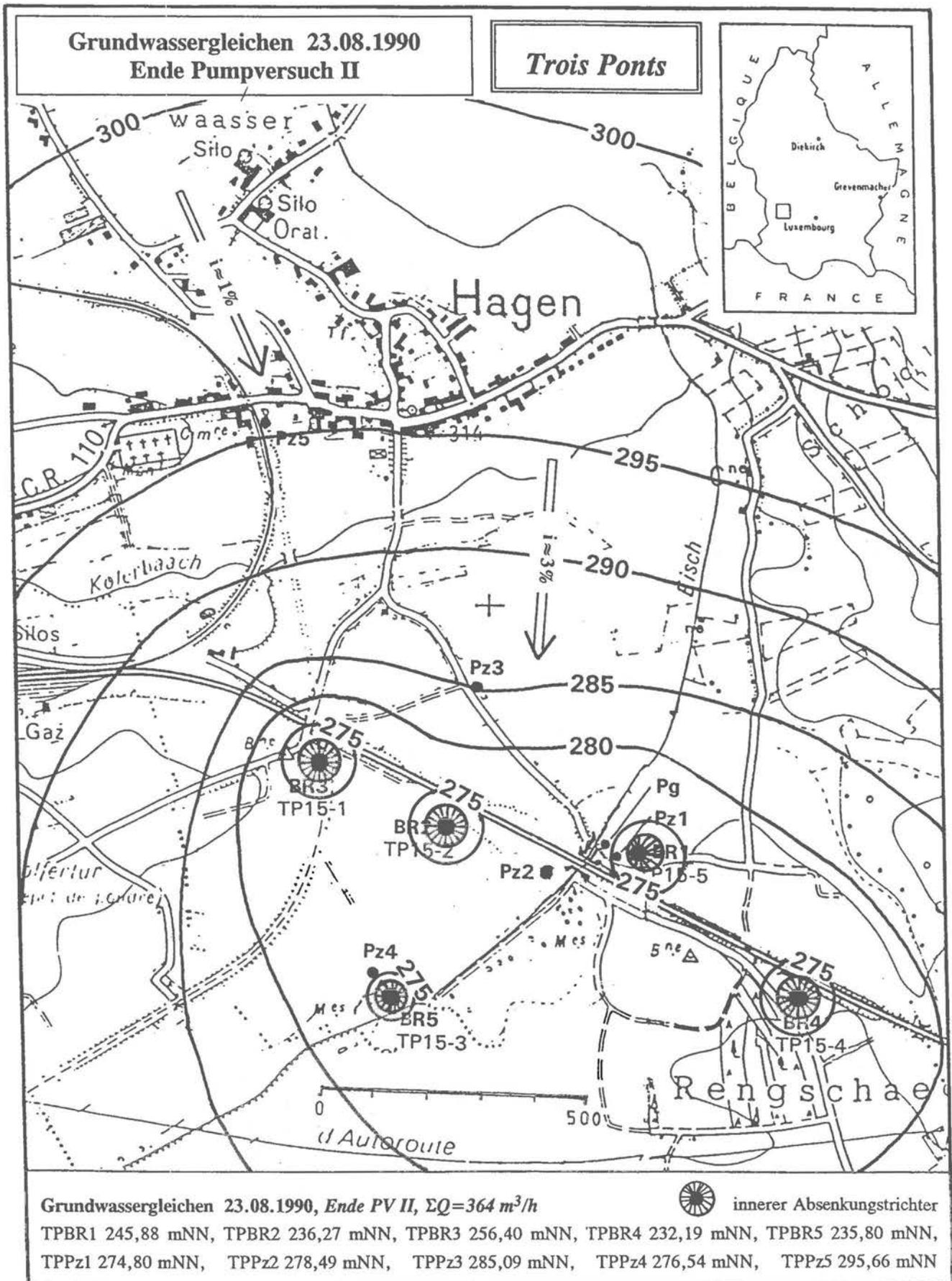


Abb. 17: Plan der Grundwassergleichen vom 23.08.1990 in Trois Ponts (Ende Pumpversuch II)

- Der äußere Absenkungstrichter hat sich vergrößert. Er ist ohne Versteilung nach außen gewandert. Das mittlere Grundwasserspiegelgefälle liegt im Bereich um TPPz5 bei ca. 1%
- Der mittlere Bereich des Absenkungstrichters hat sich unter Verflachung von den einzelnen Brunnen gelöst. Die Absenkungsniveaus zwischen 290 und 280 m üNN umgeben das gesamte Brunnenfeld. In diesem Bereich beträgt das Gefälle des Grundwasserspiegels ungefähr 3%.
- Die inneren Absenkungstrichter haben sich ausgeweitet und vertieft. Die Absenkungsdifferenz zwischen TPBR1 und TPPz1 beträgt jetzt 28,9 m.

Die größte Absenkung hat sich mit $s = 72$ m in TPBR4 eingestellt. Dank der tiefen Position des Luxemburger Sandsteins verbleibt der Grundwasserdruckspiegel in diesem Bereich 3,9 m oberhalb des Luxemburger Sandsteins in den Deckschichten. In nordwestlicher Richtung wird die maximal erreichte Absenkung geringer. Da sich der Luxemburger Sandstein nach NE heraushebt, reichen die inneren Absenkungstrichter der Brunnen (TPBR1, TPBR2, TPBR3, TPBR5) weit in den Luxemburger Sandstein hinein. In TPBR2 tritt mit 23,3 m die tiefste Absenkung eines inneren Absenkungstrichters in den Luxemburger Sandstein hinein auf. Daß in TPBR5 mit 69,1 m die zweitgrößte Absenkung entsteht, wird auf die Position im Entnahmeschatten der weiter nördlich gelegenen Brunnen zurückgeführt.

Die gleichmäßige, z.T. deutlich dreiteilige Ausbildung der Absenkung läßt auf ein gleichmäßig ausgebildetes Kluftsystem schließen, in dem keine hydraulisch bevorzugte Kluftichtung deutlich wird. Mit der Wechselwirkung zwischen TPBR5 und den weiter nördlich gelegenen Brunnen scheint sich eine Richtungsabhängigkeit des Grundwasserzuströmes anzudeuten. Die großräumige Absenkung des Grundwasserdruckspiegels des Luxemburger Sandsteins verbleibt innerhalb der Deckschichten. Die sich bei maximaler Auslastung der Grundwassergewinnungsanlage einstellenden Absenkungen der inneren Absenkungstrichter, in den Luxemburger Sandstein hinein, sind auf die engere Umgebung einiger Brunnen beschränkt. Dies kann dazu führen, daß im Nahbereich dieser Brunnen, während des Betriebszustandes maximaler Entnahmen, durch Belüftung des chemisch reduzierten Milieus Oxidationsprozesse gefördert werden, die sich auf die Anströmung der Brunnen negativ auswirken können.

Da in den Brunnen starke, auf die Förderleistung zurückzuführende Schwankungen der Standrohrspiegelhöhen auftreten und für eine Aussage über die Aktivierung und Höffigkeit des Aquifers das erreichte großräumige Absenkungsniveau maßgebend ist, werden für die folgenden Pumpversuchsauswertungen die Meßwerte der Piezometer herangezogen.

Die Grundwasserentnahmen der Jahre 1990 und 1991 sind den erzeugten Grundwasserspiegelschwankungen im Luxemburger Sandstein in Abb. 18 gegenübergestellt. Die Auswirkungen der engen zeitlichen Einbindung der vom Autor betreuten Pumpversuche in die Arbeiten zur Fertigstellung der Grundwassergewinnungsanlage sind in dieser Abbildung sichtbar. So konnten die Wiederanstiegsphasen nicht bis zum Erreichen der Ausgangsspiegel verfolgt werden. Der Ausgangsspiegel des PV II liegt deutlich unter dem des PV I. Beide Pumpversuche sind von Schwankungen der Förderraten beeinflusst. Bei PV II erzeugten einige Ausfälle von Förderpumpen erhebliche Variationen der maximalen Absenkung. Der PV I ist von Änderungen der Förderraten zu Beginn der Pumpphase beeinflusst. Trotz dieser Auswirkungen auf den Verlauf der Absenkungskurven sind Absenkungs- und Wiederanstiegsphase dieses Pumpversuches auswertbar. Bereits in dieser Darstellung fällt die gleiche Krümmung der Absenkungs- und Wiederanstiegskurven auf. Zudem sind die während der Betriebsphase der *solution de rechange* auftretenden Spiegelschwankungen erkennbar.

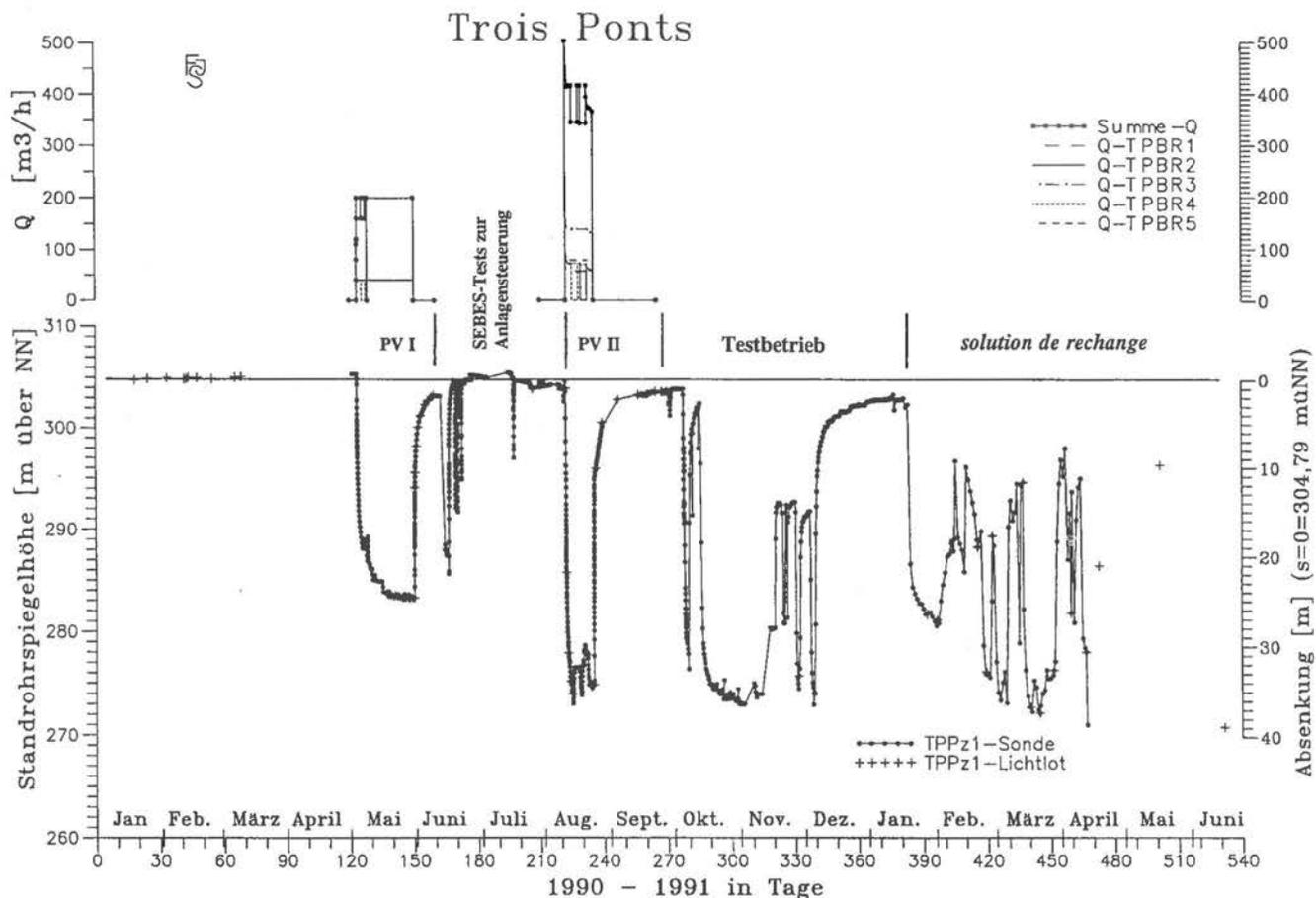


Abb. 18: Grundwasserspiegelvariationen im Luxemburger Sandstein in Trois Ponts (Ganglinie TPPz1) in Kombination mit den Grundwasserentnahmen der Pumpversuche, sowie der Test- und Betriebsphasen

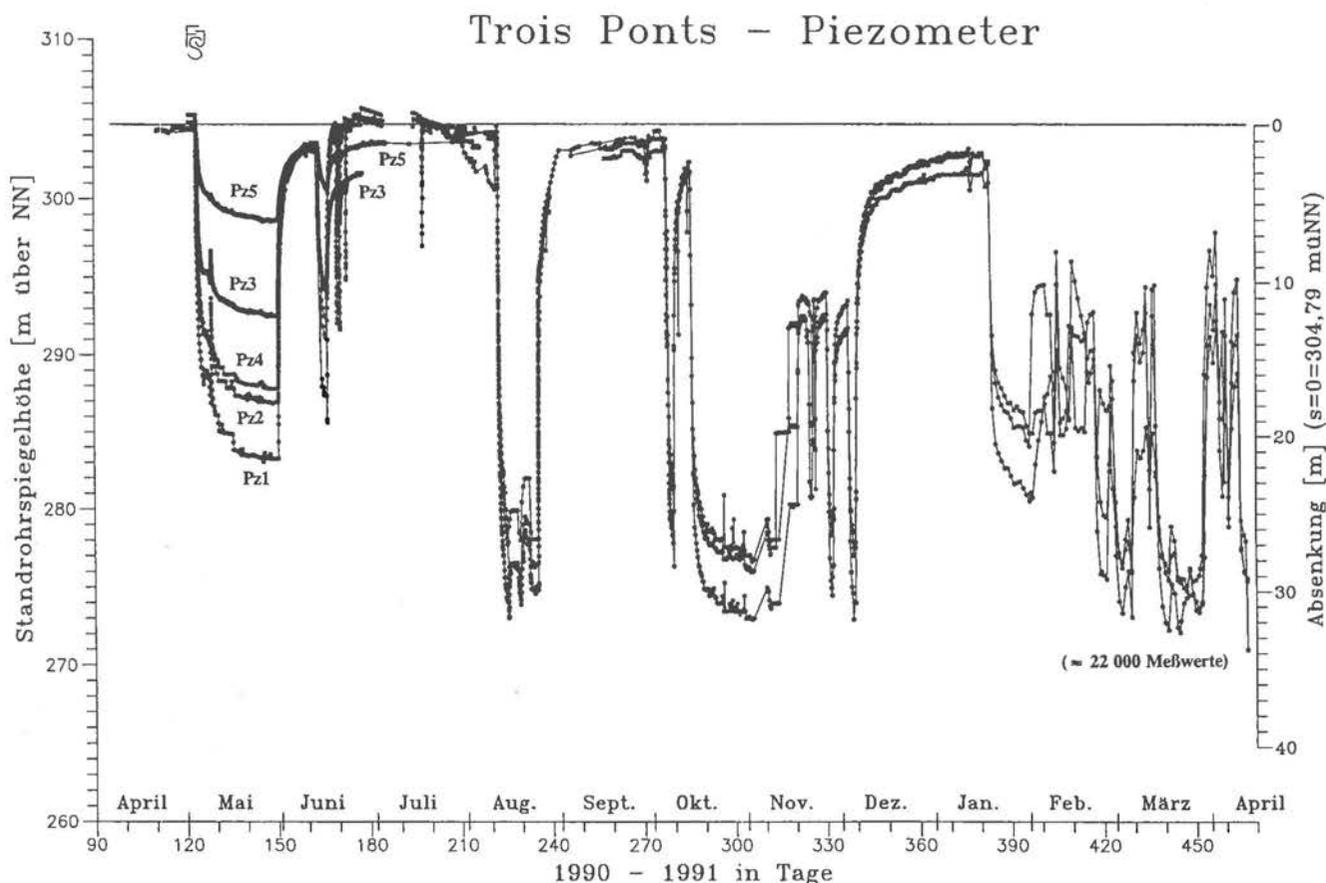


Abb. 19: Grundwasserganglinie der Piezometer im Luxemburger Sandstein in Trois Ponts.

In Abb. 19 sind die Ganglinien aller Piezometer im Luxemburger Sandstein von Trois Ponts auf NN eingehängt. Eine Absenkung bzw. Restabsenkung zum Ausgangsspiegel (304,8 m üNN) ist ablesbar. Die Verläufe der Ganglinien zeigen eine gleiche Krümmung der verschiedenen Absenkungs- bzw. Wiederanstiegskurvenabschnitte der jeweiligen Piezometer, obwohl unterschiedliche Ausgangsspiegel und Förderraten auftreten. Trotz der nicht idealen Durchführung der Pumpversuche belegen die kongruenten Kurvenverläufe, daß die Absenkungs- und Wiederanstiegskurven des PV I ein charakteristisches Bild vom hydraulischen Verhalten des Untergrundes in Trois Ponts wiedergeben. Ein idealer Pumpversuchsverlauf soll möglichst allen, den Auswerteverfahren zugrundeliegenden theoretischen Anforderungen genügen (siehe "Annahmen" bei KRUSEMAN & de RIDDER 1973). Da dies in Natur und Praxis oft nicht erreicht wird, muß durch Korrekturverfahren eine ausreichende Anpassung an die modellhaften Annahmen erfolgen. Für die Ermittlung von repräsentativen Aquiferkennwerten aus den Aufzeichnungen des PV I muß der Einfluß der aufgetretenen Förderratenänderungen auf das Zeit-/Absenkungsverhalten der Piezometer ermittelt und korrigiert werden.

4.1.2.1 Wiederanstieg Pumpversuch I

Der Verlauf der Wiederanstiegskurven ist von den Entnahmeschwankungen der frühen Pumpphase relativ unbeeinflusst. Der Absenkungstrichter wird seit dem Abschalten der Pumpen vom zuströmenden Grundwasser wieder aufgefüllt. Diese Grundwasserströmung wird ausschließlich von den Eigenschaften des Untergrundes bestimmt. Das wiederaufzufüllende Volumen entspricht dem der Entnahme. Als Berechnungs- und Auswertungsgrundlage wird eine gewichtete mittlere Förderrate Q_r ermittelt.

$$Q_r = \Sigma Q_{ri} t_i \cdot \Sigma t_i^{-1} \quad (1)$$

Q_{ri} tatsächlich über alle BR entnommene Förderrate einer Leistungsstufe

t_i Dauer einer Leistungsstufe

Die Schwankungen in der Förderrate haben damit einen statistischen Einfluß auf die Auswertung, so daß die Ergebnisse aus dem Wiederanstiegsverfahren als relativ genau und repräsentativ angesehen werden können. Für PV I beträgt Q_r 196,35 m³/h.

Wiederanstiegsverfahren nach THEIS

In Abb. 20 sind die Meßwerte der Wiederanstiegsbeobachtungen des Pumpversuches PV I in Trois Ponts eingetragen. Der Ausgangswasserspiegel (Druckspiegel des Luxemburger Sandstein 304,8 m üNN) wird in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum nicht wiedererreicht. Es verbleiben mangels genügender Beobachtungszeit Restabsenkungen kleiner 2 m (siehe Kap.1.2). Der asymptotisch auf den Ausgangsspiegel zulaufende Endteil der Wiederanstiegskurve ist eindeutig erreicht und für einige Zeit fortgesetzt worden.

Für die Auswertung nach THEIS (1935) werden die Geraden an die Wiederanstiegskurvenabschnitte mit den größten Gradienten gelegt. Geringe Schwankungen im Kurvenverlauf werden im Sinne größter Steigung ausgeglichen. Hierbei werden zwar die niedrigsten geohydraulischen Kennwerte ermittelt, doch eine repräsentative Erfassung der Aquiferkennwerte ist nur mittels der charakteristischen, steilen Segmente der Wiederanstiegskurven gegeben.

Trois Ponts - TPPz

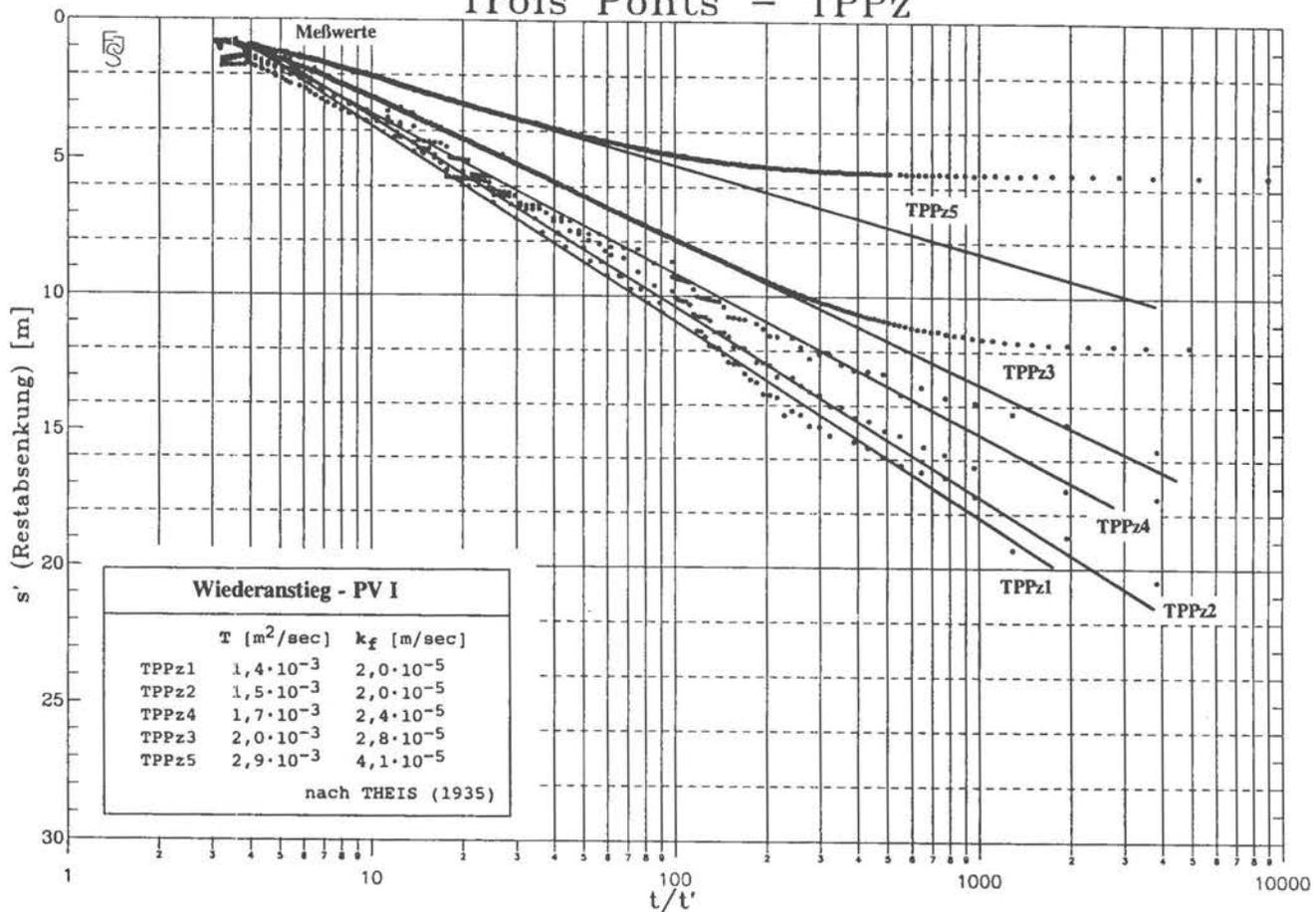


Abb. 20: Wiederanstiegskurven zu Pumpversuch I in Trois Ponts

Mit Gleichung (2) errechnen sich folgende Kennwerte:

$$T = (2,3 Q_r) \cdot (4 \pi \delta s)^{-1} \quad \text{und mit} \quad k_f = T \cdot m_{w(li2)}^{-1} \quad (2)$$

T Transmissivität

Q_r mittlere gewichtete Förderrate; für PV I 196,35 m³/h

δs Absenkung pro log.-Zyklus

k_f Durchlässigkeitsbeiwert

$m_{w(li2)}$ mittlere wassererfüllte Aquifermächtigkeit des Luxemburger Sandsteins in Trois Ponts,
 $m_{w(li2)} = 72$ m

Wiederanstieg nach THEIS (1935), Trois Ponts PV I		
	T	k _f
TPPz1	1,4 · 10 ⁻³ m ² /sec	2,0 · 10 ⁻⁵ m/sec
TPPz2	1,5 · 10 ⁻³ m ² /sec	2,0 · 10 ⁻⁵ m/sec
TPPz4	1,7 · 10 ⁻³ m ² /sec	2,4 · 10 ⁻⁵ m/sec
TPPz3	2,0 · 10 ⁻³ m ² /sec	2,8 · 10 ⁻⁵ m/sec
TPPz5	2,9 · 10 ⁻³ m ² /sec	4,1 · 10 ⁻⁵ m/sec

keine Berücksichtigung von Leakage

Tab. 1: Aquiferkennwerte für den Luxemburger Sandstein in Trois Ponts aus Wiederanstiegsdaten vom Pumpversuch I; ausgewertet nach THEIS (1935); ohne Berücksichtigung von Leakage-Effekten

In allen Berechnungen der Pumpversuchsauswertungen werden für den Parameter der wassererfüllten Mächtigkeit Mittelwerte eingesetzt. Dies ist insofern sinnvoll, da der lithofazielle Übergang vom Luxemburger Sandstein in die liegenden tonig-mergeligen Psilonoten-Schichten unscharf und uneinheitlich ausgebildet ist (siehe Kap.3). In Trois Ponts wird $h_{li2} = 72$ m gesetzt. Für die Bedingungen des Ruhe- bzw. Ausgangszustandes werden in Koerich die Anfangswerte der wassererfüllten Mächtigkeit entsprechend Tab. 6 eingesetzt, wobei die strukturell bedingten Mächtigkeitsänderungen berücksichtigt sind.

Die mit zunehmender Entfernung zu den Entnahmebrunnen abnehmende maximale Absenkung wird in Abb. 20 (Restabsenkung, s' , gegen den logarithmisch aufgetragenen Quotienten aus der Zeit seit dem Beginn der Pumpphase, t und der Zeit der Wiederanstiegsphase, t') deutlich. Die fächerförmige Anordnung der Wiederanstiegskurven ist durch diese Kausalität nicht zu erklären, so daß diese hydraulische Besonderheit im folgenden eingehender untersucht wird.

Die Unterteilung von Pumpversuchen in Phasen und ihre Nomenklatur ist in Abb. 12 dargestellt.

Angaben zu den Entfernungen zwischen den Brunnen und den Grundwassermeßstellen werden im folgenden Kapitel zur Auswertung der Pumpphase gegeben (Tab.3).

Die Theorie zum Zeit-/Absenkungs- bzw. zum Zeit-/Wiederanstiegsverhalten von gespannten Grundwasserleitern fordert eine parallele Lage der steilen, den Aquifer beschreibenden Kurvensegmente (DÜRBAUM 1973, S.693ff). Der Einsatzzeitpunkt dieser geraden Segmente ist vom Abstand zwischen Piezometer und Entnahmebrunnen abhängig. Dies ist in Trois Ponts nicht ganz erfüllt. Mit zunehmender Entfernung zu den Punkten maximaler Absenkung nehmen die Gradienten der steilen Kurvensegmente ab. Die gekrümmten Anfangs- und Endbereiche der Wiederanstiegskurven verflachen dabei ebenfalls, so daß sich eine \pm deutliche "S-Form" ausbildet. An den Kurven von TPPz3 und TPPz5 wird dies deutlich. Diese Verflachungen sind Ausdruck von zusätzlich in den Aquifer eintretenden Grundwässern (Leakage oder Leckage nach DIN 4049). In Trois Ponts treten diese Wässer aus den hangenden, geringer durchlässigen Schichten der Mergel und Kalke von Strassen in den Luxemburger Sandstein über. Mit dem Wiederanstiegsverfahren von THEIS werden diese geringen Leakage-Effekte nicht berücksichtigt.

HANTUSH'sche Wendepunktmethode

Das Auftreten von Leakage macht es notwendig, diese Einflüsse auf die Bestimmung der Aquiferkennwerte durch den Ansatz von semigespannten Strömungsbedingungen und angepaßten Auswerteverfahren in die Berechnungen einzubeziehen.

Die Wiederanstiegsphase eines Pumpversuches kann auf der Grundlage des Kontinuitätsprinzips bzw. der Kontinuitätsgleichung (siehe z.B.: DÜRBAUM 1973, S.695 dortige (8)) mit dem rechnerischen Ansatz

$$Q + (-Q) = 0 \quad (3)$$

betrachtet werden. Die mathematische Ableitung der Strömungsgleichung für den instationären Wiederanstiegsvorgang entspricht nur näherungsweise der für die Absenkung, da während der Anfangs- und Endphasen der Absenkungs- und Wiederanstiegsvorgänge Unterschiede auftreten. Die Lage und die Steigung der charakteristischen, steilen, geraden Segmente der Absenkungs- und Wiederanstiegs- Kurvenverläufe sind vergleichbar, so daß eine Anwendung der HANTUSH'schen Wendepunktmethode unter den gegebenen hydraulischen Bedingungen auch auf die Wiederanstiegsdaten von PV I in Trois Ponts möglich ist.

Die Steigungen der Geraden aus dem Wiederanstiegsverfahren nach THEIS (Abb.20) sind in Abb. 26 (Kap.4.2.2) eingetragen und bilden die Berechnungsgrundlage für die in Tab. 2 zusammengestellten Ergebnisse aus den Berechnungen nach der HANTUSH'schen Wendepunktmethode (HANTUSH 1964), die nach den Ausführungen von DÜRBAUM (1973, S.708ff) durchgeführt wurden.

HANTUSH'sche Wendepunktmethode Wiederanstieg PV I Trois Ponts	
<u>direkt berechnet</u>	<u>abgeleitet</u>
$T_{(li2)} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ $B_{(li3)} = 651,0 \text{ m}$	$k_{f(li2)} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$ $T_{(li3) \rightarrow v} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ $k_{f(li3) \rightarrow v} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m/sec}$

Tab. 2: Aquiferkennwerte für den Standort Trois Ponts aus Wiederanstiegsdaten von Pumpversuch I unter Berücksichtigung von Leakage-Effekten mit HANTUSH'scher Wendepunktmethode

Weitere Details zu diesem Verfahren und zu den hydraulischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen des zugrunde liegenden Ansatzes sind zusammen mit einem Vergleich der Ergebnisse aus den Absenkungs- und Wiederanstiegsberechnungen, unter gleicher Überschrift, in Kap.4.1.2.2 aufgeführt.

4.1.2.2 Absenkung Pumpversuch I

Wie bereits mit Abb. 18 angesprochen, haben die Änderungen der Förderrate zu Beginn des PV I zu Veränderungen im Absenkungsverlauf der Piezometer geführt. Deutlich wird dies an den kleinen Wiederanstiegsspitzen der ersten Absenkungskurven. Um diese Einflüsse genauer erkennen und zuordnen zu können, werden in Abb. 21 in halblogarithmischem Maßstab die Förderraten aus PV I den Meßwerten der Absenkungsphase gegenübergestellt. Die kurzfristigen Wiederanstiegsspitzen stammen von einem 60-minütigen, die gesamte Anlage betreffenden Stromausfall. Der logarithmische Zeitmaßstab schließt die Anfangsphase des Pumpversuches detailliert auf. So wird deutlich, daß das damals technisch bedingte einzelne Einschalten der Brunnen nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf den Absenkungsverlauf hat.

In allen Piezometern tritt ein quasistationärer Fließzustand ein. Die Kurvenabschnitte mit den größten Gradienten verlaufen so geradlinig, daß eine Auswertung mittels Geradenlinienverfahren nach COOPER & JACOB (1946) sinnvoll ist.

Wie bereits beim Wiederanstieg angesprochen, treten auch beim Absenkungsvorgang sog. Leakage-Effekte auf. Mit zunehmendem Abstand von den jeweils wirksamen Förderbrunnen wird die Steigung der steilen Kurvenabschnitte geringer und der Verlauf der Absenkungskurve "S-förmiger".

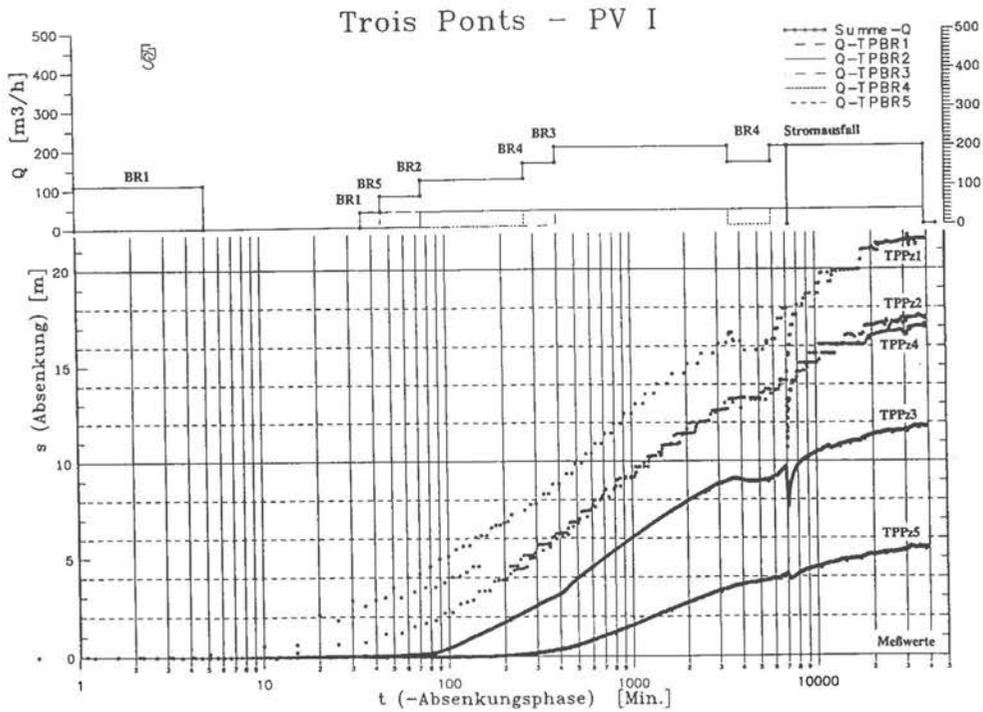


Abb. 21: Absenkungskurven der Piezometer im Luxemburger Sandstein in Trois Ponts in Kombination mit den Grundwasserentnahmen des Pumpversuchs I

Änderung der Entfernungen

Bei der Beobachtung und Auswertung von Pumpversuchen ist die Entfernung zwischen Grundwassermeßstelle und Entnahmekunnen von großer Bedeutung für das Zeit-/ Entfernungs-/ Absenkungsverhalten. Durch das einzelne Anstellen der Pumpen im PV I verändern sich für die Absenkungsvorgänge in den Piezometern mit jedem Zuschalten die wirksamen geometrischen Bedingungen. Eine schematisierte Vorstellung hierzu ist in Tab. 3 zusammengestellt.

Eine Aussage, wann sich die zusätzliche Förderung aus dem neu hinzugeschalteten Brunnen in den Piezometern bemerkbar macht, kann nicht gemacht werden. Eine Zuordnung von Absenkungskurvenvariationen zu bestimmten Leistungsstufen ist nur in den Fällen des allgemeinen Stromausfalls und bei dem Ausfall der Pumpe des TPBR4 möglich (vergl. Abb.21).

Piezometer und nächstgelegener fördernder Brunnen Trois Ponts PV I						
r [m]	BR1 ein	BR5 ein	BR2 ein	BR4 ein	BR3 ein	BR4 ein/aus
TPPz1	33,7	→	(338)	→	→	→
TPPz2	110,3	→	(237,3)	→	→	→
TPPz3	428,8	→	246,7	→	(308,2)	→
TPPz4	507,1	13,5	→	→	→	→
TPPz5	1065,4	→	821,7	→	634,2	→
Δt [min]	35	43	75	270	400	3460 / 5884

Tab. 3: Piezometer und jeweils wirksame Entfernung zum nächstgelegenen fördernden Brunnen während Pumpversuch I in Trois Ponts; Δt gibt die Dauer der Leistungsstufen an

Angewendete Korrekturen

Sind die DUPUIT'schen und THEIS'schen Annahmen eines unbegrenzten, homogenen, isotropen Aquifers von gleichbleibender Mächtigkeit und ausgedehntem Druckwasserspiegel gegeben und wird bei konstanter Grundwasserentnahme der vollkommene Brunnen horizontal angeströmt, so läßt sich das Fließen des Grundwassers im Absenkungstrichter nach der Lösung von THEIS (1935) wie folgt beschreiben (DÜRBAUM 1973, S.700 dortige (19)):

$$s_{(r,t)} = \frac{Q}{4 \pi T} \frac{\int_0^\infty \frac{e^{-\sigma}}{\sigma} d\sigma}{r^2 S} \quad (4)$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{S \tau}{4 T} \quad \text{und} \quad d\sigma = \frac{S}{4 T} d\tau$$

Der Exponentialintegralfunktions-Teil dieses Ansatzes wird als $W_{(u)}$ bezeichnet, wobei u mit

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (5)$$

die wesentliche Größe ist. Dies spiegelt sich in der Reihenentwicklung von $W_{(u)}$ wider.

$$W_{(u)} = -0,5772 - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{u^n}{n \cdot n!} \quad (6)$$

Erreichen und verbleiben die Werte von u im Laufe des Pumpversuches bei Beträgen kleiner 0,01 ($u \leq 0,01$), so läßt sich der Absenkungsverlauf durch die Asymptote genügend genau beschreiben. Der vereinfachte Ansatz (7) nach COOPER & JACOB (1946) ist in diesen Fällen zulässig (r ist dabei relativ klein gegenüber t bzw. bei größerem r muß t entsprechend lange Pumpzeiten wiedergeben).

$$s_{(r,t)} = \frac{Q}{4 \pi t} \left(-0,5772 + \ln \frac{4 T t}{r^2 S} \right) \quad (7)$$

Hieraus wird deutlich, daß das Auftreten einer Absenkung, s , zum Zeitpunkt, t_n , in einer Grundwassermeßstelle im Abstand, r , zum Entnahmebrunnen von den grundwasserleitenden und -speichernden Eigenschaften des Aquifers (beschrieben durch die Kennwerte T und S) abhängt.

Bei den angewendeten Korrekturen werden S und T als Konstanten betrachtet und s als unveränderliche Meßwerte angesehen. Veränderungen (Korrekturen) können somit nur zwischen r , Q und t auftreten.

- Bei unterschiedlichem Q muß sich bei festem r (eine Grundwassermeßstelle) ein bestimmter Absenkungsbetrag (Meßwert von s) nach unterschiedlicher Pumpversuchsdauer einstellen.
- Bei unterschiedlichem r stellt sich bei konstantem Q dieser Absenkungsbetrag nach unterschiedlicher Dauer des Pumpversuches ein.

Wie bereits angeführt, ist eine genügend genaue Auswertung des Absenkungsgeschehens durch die Geradenverfahren von COOPER & JACOB (1946) gegeben. Eine Voraussetzung für

die Anwendung dieser Verfahrensgänge ist die Entnahme aus einem Brunnen mit konstanter Förderrate. Für Stufenpumpversuche geben COOPER & JACOB (1946) eine Anpassung ihrer Auswerteverfahren an die sich ändernden Förderraten. KRUSEMAN & de RIDDER (1973, S.126ff) beschreiben dieses Verfahren und halten eine Anwendung auf Pumpversuche mit Entnahmen aus mehreren Brunnen für möglich.

Das Ziel der angewendeten Korrekturen ist die Aufhebung der Veränderungen im Absenkungsverhalten, die durch die unterschiedlichen Förderraten und durch die Entnahme aus mehreren Brunnen entstanden sind. Die durchgeführten Korrekturen basieren auf folgendem Ansatz:

- Alle fünf Brunnen (Q_{rBR}) verhalten sich wie ein Brunnen (Superpositionsprinzip) mit $Q_r = 5 \cdot Q_{rBR}$.
- Das einzelne Einschalten der Pumpen und die zeitweiligen Ausfälle erzeugen einen Stufenpumpversuch mit unterschiedlichen Leistungsstufen.
- Jede Ganglinie einer Grundwassermeßstelle im Luxemburger Sandstein ist das Resultat aller am Standort geförderten Grundwasservolumina. Der Meßwert zum Zeitpunkt t_i ist somit das Ergebnis aller vorangegangener und zur Zeit t_i laufender Grundwasserentnahmen des Pumpversuches. Schwankungen in den Absenkungskurven sind ursächlich Auswirkungen der Leistungsstufen.
- Alle Meßwerte werden als Absenkung gegenüber dem Ausgangsspiegel angegeben. Der Absenkungswert $s_{(tn)}$ ist zum Zeitpunkt t_n (Zeit seit Beginn der Pumpphase) bei einer Förderrate Q_r gemessen worden und stellt das Resultat aus allen vorangegangenen Leistungsstufen dar. Mit Q_r ist die Förderrate der Leistungsstufe angegeben, der t_n angehört.
- Der Einfluß einer Leistungsstufe auf den gesamten Pumpversuch hängt von ihrer Dauer und ihrem zeitlichen Auftreten im Pumpversuchsablauf ab. So ist der Einfluß einer kurzen Leistungsstufe zu Beginn eines Pumpversuches, dessen Pumpphase mit einer langen Leistungsstufe endet, recht gering.
- Bei der Korrektur wird der (Meß-) Zeitpunkt t_n von $s_{(tn)}$ so verändert, $t^*_{(tn)}$, als wäre vom Anfang der Pumpphase an mit konstantem Q_r gefördert worden. Diese Betrachtungen (Korrekturen) werden immer auf die gesamte, bis zum Meßzeitpunkt (t_n) abgelaufene Pumpphase bezogen, wobei eine Stufe mit Leistungssteigerung oder eine lange letzte Leistungsstufe am Ende der betrachteten Pumpversuchsdauer stehen sollte.
Da Q_r bei einer Leistungssteigerung zunimmt, was über die gesamte Pumpphase zutreffen sollte, ist $t^* \leq t_n$. Bei $Q_r = 0$ ist $t^* > t_n$. Die Berechnungen zeigen, daß bei $t^* > t_n$ unrealistische Werte auftreten. Mit zunehmender Dauer einer Leistungsstufe nähern sich die Werte für t^* und t_n stetig einander an (Abb.22).
- Bei sich verändernden Entfernungen zum nächstgelegenen Entnahmebrunnen (durch Zuschalten einer Pumpe) wird der zum Zeitpunkt der Messung, $s_{(tn)}$, wirksame Abstand zum nächstgelegenen Entnahmebrunnen angenommen.
- Die Korrekturen sind so ausgerichtet, daß eine Berücksichtigung von Leakage mit der sog. HANTUSH'schen Wendepunktmethode (HANTUSH 1964) möglich ist.

KRUSEMAN & de RIDDER (1973 S.126ff) bezeichnen t^* als "gewogenes logarithmisches Mittel" und führen diese Mittelwertbildung auch für die Variablen r und t/r^2 der COOPER & JACOB'schen Verfahren an. Um Entnahmen aus mehreren Brunnen berücksichtigen zu können, wird bei ihnen im Verfahren III eine spezifische Absenkung s/Q anstelle der Absenkung s eingeführt.

Durch die Verwendung von Q_r bei der Ermittlung von t^* wird, bei Berücksichtigung der Entnahmen aus mehreren Brunnen, eine Anwendung des Verfahrens I von COOPER & JACOB möglich. Die Berechnung von t^* erfolgt analog zu COOPER & JACOB (1946).

$$t^*_{(t_n)} = \exp \{ [\log(t_n - t_1) \cdot \Delta Q_{r1} + \log(t_n - t_2) \cdot \Delta Q_{r2} + \log(t_n - t_3) \cdot \Delta Q_{r3} + \dots] / \Sigma \Delta Q_{ri} \} \quad (8)$$

t_n	Zeitpunkt der Absenkungsmessung, $s_{(t_n)}$
$t^*_{(t_n)}$	"gewogenes log. Mittel" bzw. korrigierter Wert von t_n
t_i	Zeitpunkt, ab dem eine neue Leistungsstufe einsetzt
Q_r	Förderrate über alle Brunnen
ΔQ_{ri}	zusätzliche Förderrate, zu der vorangehenden hinzugekommen bzw. abgenommen
$\Sigma \Delta Q_{ri}$	Summe der "zusätzlichen Förderraten"

Die Anwendung des Verfahrens III setzt eine zusätzliche Berücksichtigung der Änderungen in den Entfernungen zwischen den fördernden Brunnen und den Grundwassermeßstellen voraus. Dies wird mit folgender Einbeziehung von t/r^2 erfüllt, wobei die jeweiligen, während der einzelnen Leistungsstufe und zum Meßzeitpunkt wirksamen Abstände eingesetzt werden.

$$(t/r^2)^*_{(t/r^2)_n} = \exp \{ [\log(t/r^2_n - t/r^2_1) \cdot \Delta Q_{r1} + \log(t/r^2 - t/r^2_2) \cdot \Delta Q_{r2} + \dots] / \Sigma \Delta Q_{ri} \} \quad (9)$$

Veränderungen in den Entfernungen treten in TPPz3 nach 78 Minuten auf, in TPPz4 nach 35 Minuten und in TPPz5 nach 78 und 423 Minuten (vergl. Tab.3).

Bei der Berechnung von $t^*_{(t_n)}$ wird der Einfluß der Änderungen in den Entfernungen nicht berücksichtigt. Doch da diese Änderungen nur in den ersten Minuten der Absenkungsphase auftreten und für die Ermittlung der Aquiferkennwerte nur die zweiten Phasen der Absenkungskurvenverläufe herangezogen werden, schmälert dieses Manko die Anwendung dieser Korrekturen nicht.

An den Daten von TPPz1 werden beide Korrekturen bei der Anwendung der Verfahren I und III nach COOPER & JACOB erläutert.

Geradlinienverfahren nach COOPER & JACOB

Die von COOPER & JACOB (1946) unter Verwendung des vereinfachten Ansatzes von Gleichung (7) eingeführten Geradlinienverfahren führen zu Aquiferkennwerten anhand von drei unterschiedlichen graphischen Darstellungen der Absenkungsdaten eines Pumpversuches. Die Relation: "s gegen t" wird als Verfahren I, die von "s gegen r" als Verfahren II und die Relation von "s gegen t/r^2 " als Verfahren III bezeichnet (Methoden I, II und III bei LANGGUTH & VOIGT 1980; Verfahrensgang I, II und III bei KRUSEMAN & de RIDDER 1973).

In das Absenkungs-/Zeit-Diagramm des Verfahrens I nach COOPER & JACOB (1946) sind die Meßwerte und die entsprechenden korrigierten Werte der Absenkungsphase von TPPz1 eingetragen (Abb.22). Die Meßwerte zeigen während der ersten 700 Minuten einen deutlich gekrümmten Verlauf. Ab 800 Minuten setzt der gerade Kurvenabschnitt ein. Bei den korrigierten Werten setzt dieser Kurventeil bereits bei 200 Minuten ein. Der Zeitraum des Ausfalles von TPBR4 wird gut korrigiert. Schlechte Korrekturen ergeben die Meßwerte, die in den Zeitraum mit $Q_r=0$ (von ca. 3500 bis 6000 Min.) fallen. Vergleichbar ungenau sind die Korrekturwerte, die zu Meßwerten am Anfang einer neuen Leistungsstufe gehören. Mit zunehmender Dauer der Leistungsstufe wird eine gute Übereinstimmung erreicht.

Trois Ponts

PV I - Absenkung nach COOPER & JACOB (1946)

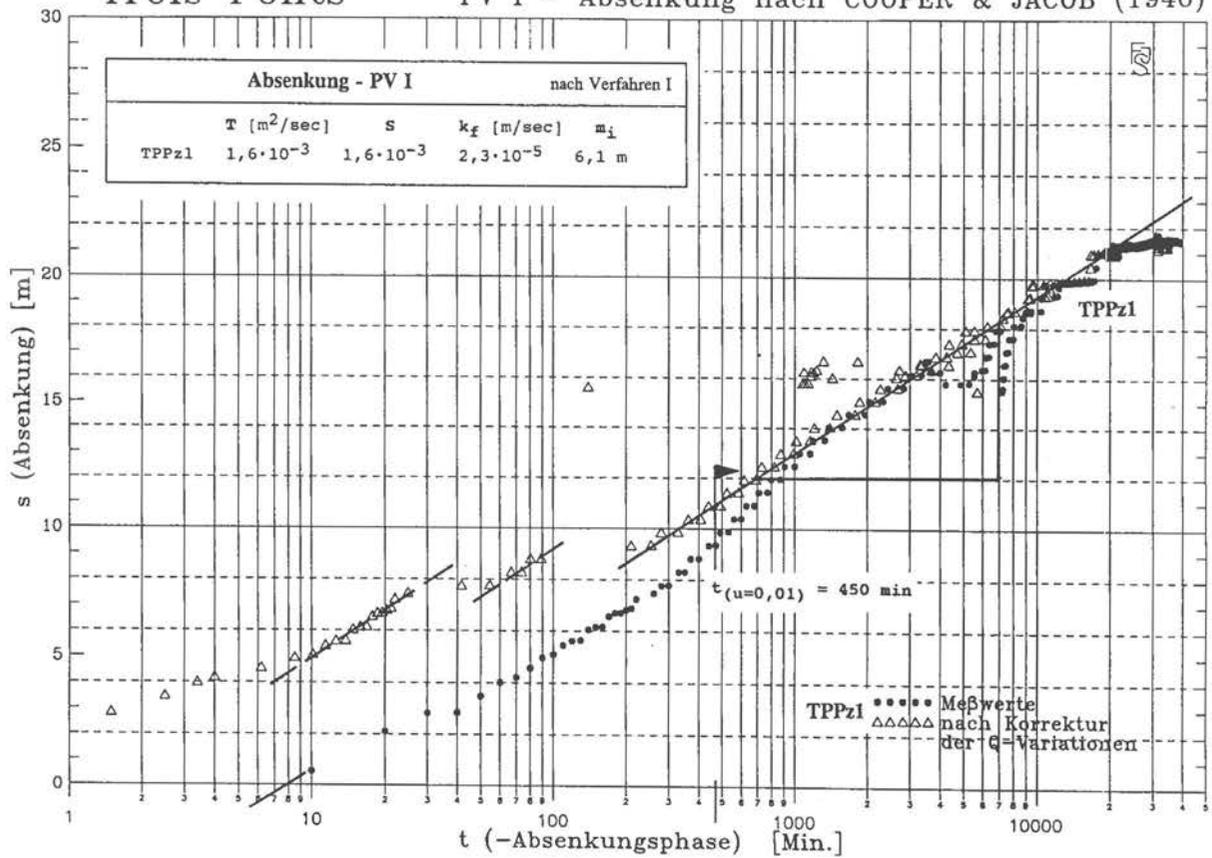


Abb. 22: Absenkungskurve TPPz1 in Pumpversuch I, nach Verfahren I von COOPER & JACOB (1946); Meßwerte und Daten nach Korrektur der Q-Variationen

Trois Ponts

PV I - Absenkung nach COOPER & JACOB (1946)

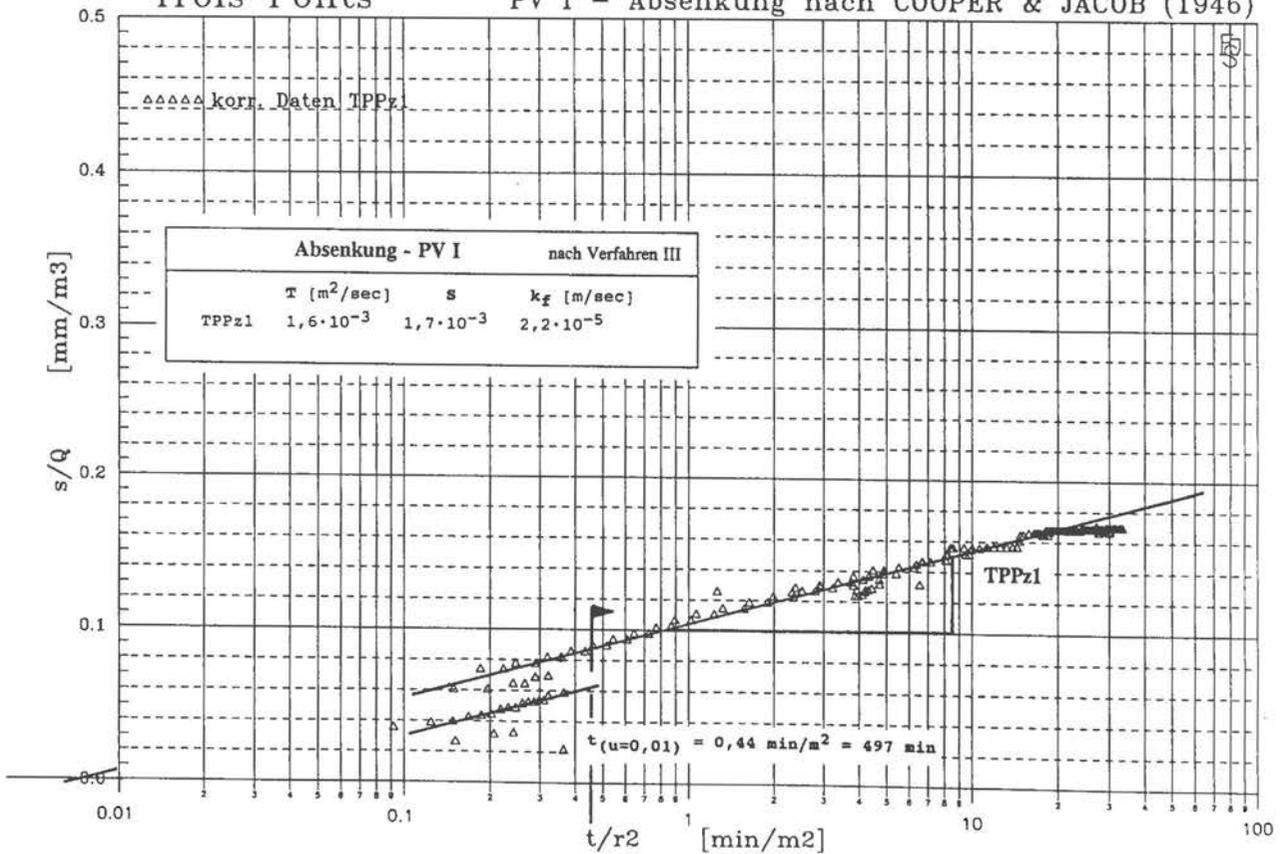


Abb. 23: Absenkungskurve TPPz1 in Pumpversuch I, nach Verfahren III von COOPER & JACOB (1946); Meßwerte und Daten nach Korrektur der Q-Variationen

Die Wirkung der Korrekturen läßt sich am Meßwert ($s=4$ m; $t=60$ Min.) verdeutlichen. Wäre seit Beginn der Pumpphase mit 80 m³/h gefördert worden, so wäre die Absenkung von 4 m bereits nach $3,3$ Min. erreicht worden. Durch das stufenweise Anfahren des Pumpversuches ist diese Absenkung erst nach 60 Min. Pumpzeit eingetreten. Die Förderrate für die Leistungsstufe von 43 Min. - 75 Min. beträgt 80 m³/h.

Um die Gültigkeit der bei den Verfahren von COOPER & JACOB (1946) vorausgesetzten Annahmen (KRUSEMAN & de RIDDER 1973 S.39, 47) zu erreichen, und um somit die Anwendbarkeit der Verfahren sicherzustellen, soll $u \leq 0,01$ für die zur Auswertung verwendeten Daten erfüllt sein. Aus der Berechnung und Markierung des Zeitpunktes, ab dem $u \leq 0,01$ erfüllt ist, wird ersichtlich, wie verlässlich bzw. aussagekräftig die mit diesen Verfahren gewonnenen geohydraulischen Kennwerte sind.

Die Anwendung der Korrekturen führt zu einer deutlich verbesserten Anpassung der Ausgleichsgeraden an die Absenkungskurve. Dieser geradlinige Verlauf der korrigierten Werte tritt auch im Diagramm zum Verfahren III (Abb.23) auf und ist durch die Verwendung der spezifischen Absenkung, s/Q , verbessert worden.

Die Ergebnisse der Auswertung beider Verfahren zeigen eine außerordentlich gute Übereinstimmung. Mit m_1 ist im Verfahren I bereits die Steigung der Ausgleichsgeraden angegeben, um mit diesen Werten im HANTUSH'schen Wendepunktverfahren den Einfluß von Leakage aus den Deckschichten zu berechnen.

In die Diagramme der Verfahren I (Abb.24) und III (Abb.25) sind die korrigierten Daten der Piezometermeßwerte aus der Pumpphase von PV I eingetragen.

Am Absenkungskurvenverlauf von TPPz3 wird der Korrektoreinfluß auf die Anfangswerte einer Leistungsstufe deutlich. Aufgrund der hohen Meßwertdichte läßt sich bei TPPz3 und TPPz5 die Auswirkung der Leistungsstufe mit $Q_r=0$ (Ausfall TPBR4) gut erkennen. Deutlich wird hierbei aber auch, wie schnell der Einfluß der Anfangsphase einer Leistungsstufe abnimmt und wie nach Beginn einer neuen (steigernden) Leistungsstufe eine Annäherung erfolgt.

Die Zeit-/Absenkungsverläufe von TPPz2 und TPPz4 sind fast ident, obwohl ein größerer Unterschied in den Abständen zum nächsten Entnahmebrunnen besteht ($r_{(TPPz2)}=110,3$ m; $r_{(TPPz4)}=13,5$ m).

Die fast linear ausgebildeten, steilen, geraden Segmente aller Absenkungskurven ermöglichen eine sichere Anpassung der Ausgleichsgeraden. Diese zeigen, wie bereits beim Wiederanstieg angesprochen, durch geringer werdende Steigungen (bei zunehmendem r) einen Leakage-Einfluß an.

Die Überprüfung der Anwendbarkeit der Geradlinienverfahren mit Hilfe des Zeitpunktes $t_{(u=0,01)}$ macht den generellen Nachteil dieser Verfahren bei großen Abständen zum Entnahmebrunnen deutlich. So liegt $t_{(u=0,01)}$ bei TPPz3 und TPPz5 außerhalb des bei gespannten Grundwasserleitern charakteristischen geraden Segmentes. Die Einführung von $t_{(u=0,1)}$ in die Absenkungskurven von TPPz3 und TPPz5 in Abb. 24 zeigt exemplarisch die bei DÜRBAUM (1973, S.700) dargelegte Gültigkeit des asymptotischen Teiles der Brunnenfunktion bis $u=0,1$. Die Absenkungskurve von TPPz5 ist zwischen 600 und 6000 Min. als fast lineares Segment ausgebildet. Für diesen Fall errechnet sich für $t=600$ Min. $u=0,23$. Die Ausnutzung des maximalen Gültigkeitsbereiches des asymptotischen Segmentes der Brunnenfunktion bis zu einem Wert von $u=0,2$ erweitert unter den gegebenen Umständen die Anwendbarkeit der Geradlinienverfahren erheblich.

Abb. 24: Absenkungspurven zu Pumpversuch I aus korrigierten Piezometerdaten von Trois Ponts und Ergebnisse nach Verfahren I von COOPER & JACOB (1946)

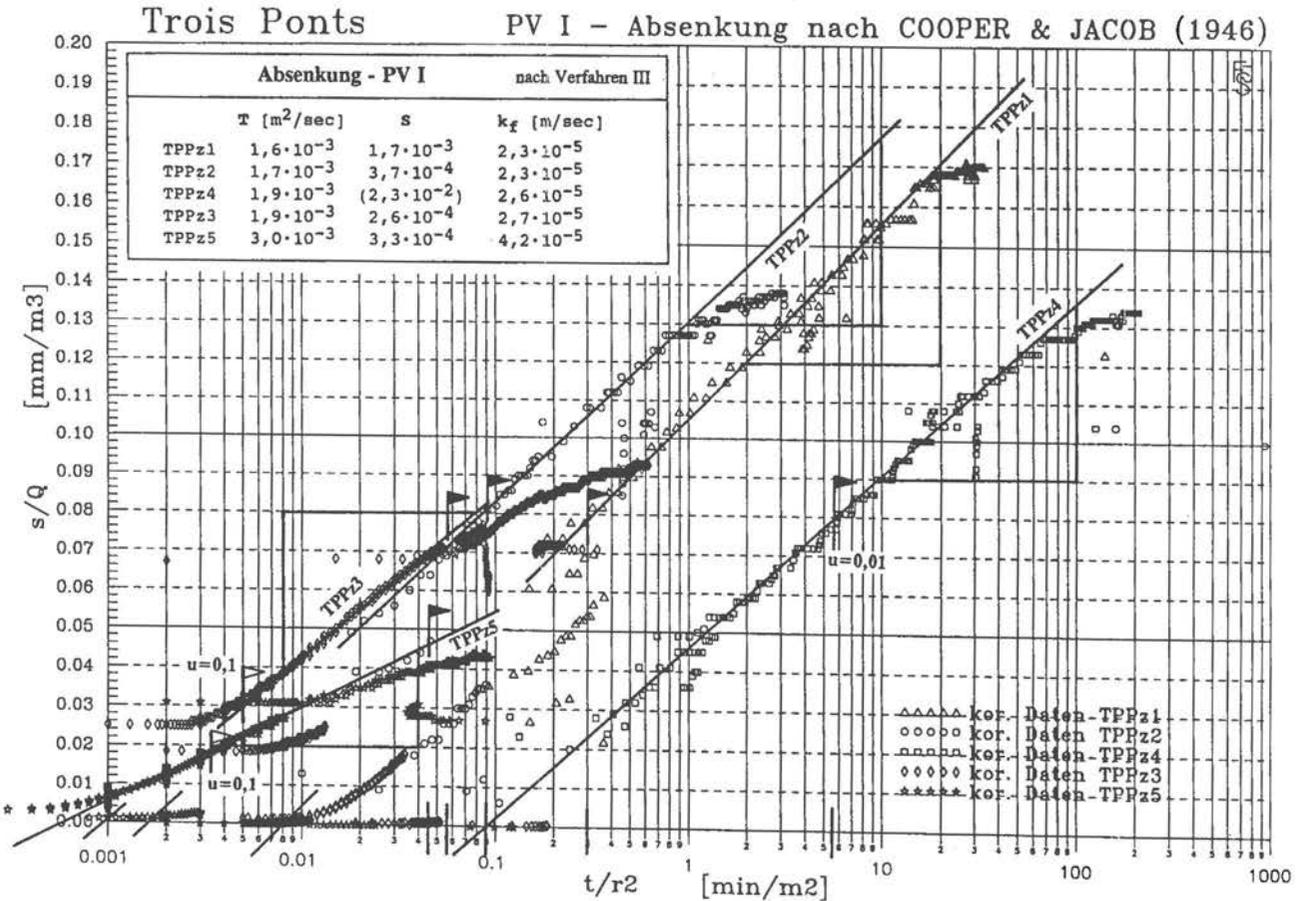
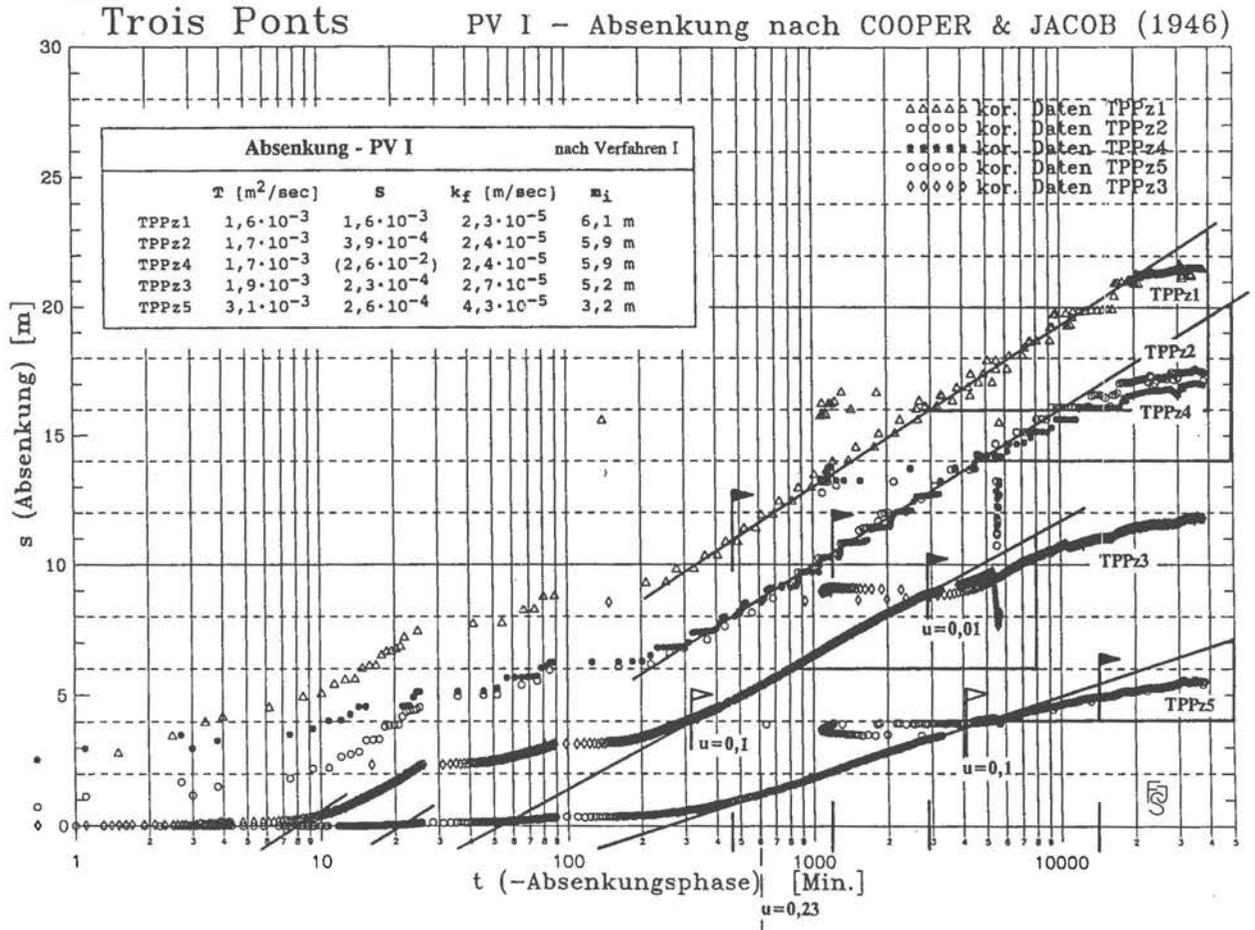


Abb. 25: Absenkungskurven zu Pumpversuch I aus korrigierten Piezometerdaten von Trois Ponts und Ergebnisse nach Verfahren III von COOPER & JACOB (1946)

Die COOPER & JACOB'schen Verfahren führen zu folgenden Ergebnissen:

Absenkung - PV I nach Verfahren I				
	T [m ² /sec]	S	k _f [m/sec]	m _i
TPPz1	1,6 · 10 ⁻³	1,6 · 10 ⁻³	2,3 · 10 ⁻⁵	6,1
TPPz2	1,7 · 10 ⁻³	3,9 · 10 ⁻⁴	2,4 · 10 ⁻⁵	5,9
TPPz4	1,7 · 10 ⁻³	(2,6 · 10 ⁻²)	2,4 · 10 ⁻⁵	5,9
TPPz3	1,9 · 10 ⁻³	2,3 · 10 ⁻⁴	2,7 · 10 ⁻⁵	5,2
TPPz5	3,1 · 10 ⁻³	2,6 · 10 ⁻⁴	4,3 · 10 ⁻⁵	3,2

m_i: Steigung der Ausgleichsgeraden

Absenkung - PV I nach Verfahren III				
	T [m ² /sec]	S	k _f [m/sec]	.
TPPz1	1,6 · 10 ⁻³	1,7 · 10 ⁻³	2,3 · 10 ⁻⁵	.
TPPz2	1,7 · 10 ⁻³	3,7 · 10 ⁻⁴	2,3 · 10 ⁻⁵	.
TPPz4	1,9 · 10 ⁻³	(2,3 · 10 ⁻²)	2,6 · 10 ⁻⁵	.
TPPz3	1,9 · 10 ⁻³	2,6 · 10 ⁻⁴	2,7 · 10 ⁻⁵	.
TPPz5	3,0 · 10 ⁻³	3,3 · 10 ⁻⁴	4,2 · 10 ⁻⁵	.

Tab. 4: Aquiferkennwerte für den Luxemburger Sandstein in Trois Ponts aus Absenkungsdaten von Pumpversuch I, ausgewertet nach COOPER & JACOB (1946); keine Berücksichtigung von Leakage-Effekten

Die Näherungsverfahren nach COOPER & JACOB (1946) berücksichtigen keine Leakage-Effekte, so daß bei dieser Anwendung der THEIS-JACOB-Formel (4) zu große Transmissivitäten ermittelt werden (DÜRBAUM 1973, S.710). Aus diesem Grund tritt in den Ergebnissen, analog zu den unterschiedlichen Steigungen, mit zunehmender Entfernung zu den Entnahmebrunnen, eine Zunahme in den Kennwertgrößen auf. TPPz1 hat mit größter Absenkung und kleinem Abstand die geringste Transmissivität. Die Transmissivität von TPPz5 ist etwa doppelt so groß wie die von TPPz1. In dieser Zunahme wird bei großem Abstand und kleinen maximalen Absenkungen der Einfluß von Leakage deutlich. Im Vorgriff auf die Ergebnisse aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode läßt sich der Fehler, der sich aus der Nichtbeachtung von Leakage ergibt, erkennen. Die Transmissivität bei TPPz1 nach den Verfahren I und III entspricht der Transmissivität mit Berücksichtigung von Leakage ($T_{(li2)} \text{ HANTUSH} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$). Mit zunehmendem Einfluß von Leakage entsteht zu den Werten aus TPPz3 ein Unterschied von 23%. Die Nichtbeachtung von Leakage führt zu zu großen Kennwerten. So sind die mittels Geradenverfahren berechneten Transmissivitäten für TPPz5 etwa doppelt so groß wie die der HANTUSH'schen Wendepunktmethode.

Speicherkoeffizient

Die Ermittlung von Speicherkoeffizienten aus Pumpversuchsdaten ist zwingend an die Gültigkeit der DUPUIT-THEIS'schen Annahmen gebunden. Eine Berücksichtigung von Leakage oder eine Verwendung von Wiederanstiegsdaten ist hierbei nicht zulässig.

Die aus den verwendeten Geradenverfahren berechneten Speicherkoeffizienten der Piezometer TPPz2, TPPz3 und TPPz5 (Tab.4) werden als repräsentativ für den Grundwasserlei-

ter Luxemburger Sandstein in Trois Ponts angesehen und führen zu einem mittleren Speicherkoeffizienten von $S_{(ii2-TP)} = 3,1 \cdot 10^{-4}$.

Der um zwei Größenordnungen größere Speicherkoeffizient von TPPz4 ist auf die Diskrepanz zwischen dem geringen Abstand zum Entnahmebrunnen ($r=13,5$ m) und dem Zeit-/Absenkungsverhalten zurückzuführen, welches nahezu ident mit dem von TPPz2 ($r=110,3$ m) ist.

HANTUSH'sche Wendepunktmethode

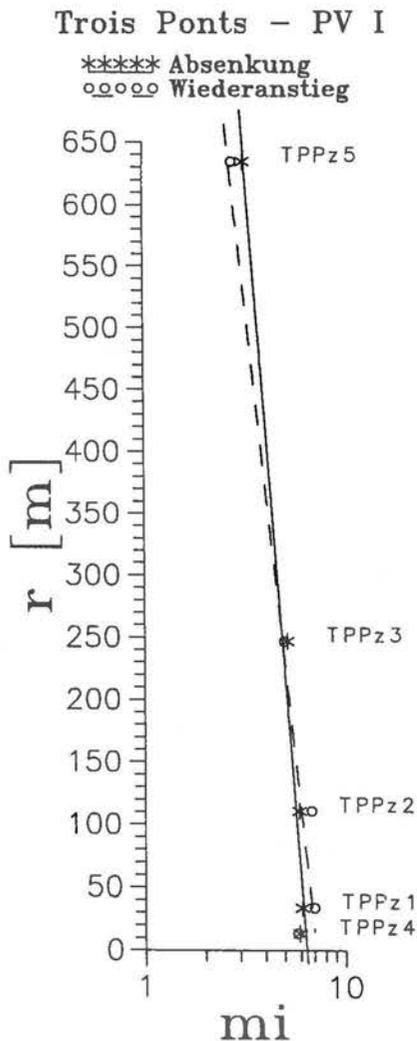


Abb. 26: Pumpversuch I in Trois Ponts, Diagramm zur HANTUSH'schen Wendepunktmethode

Die hydraulische Situation ähnelt den Strömungsbedingungen semigespannter Grundwasserleiter (vergl. KRUSEMAN & de RIDDER 1973, S.14ff), so daß die Voraussetzungen für die Anwendung der HANTUSH'schen Wendepunktmethode gegeben sind.

Die Auswertungen zu diesem Verfahren wurden nach den Ausführungen von DÜRBAUM (1973, S.708ff) durchgeführt. Aus den Diagrammen zum Verfahren I von COOPER & JACOB

Wie bereits angesprochen, zeigen die Absenkungs- und Wiederanstiegskurvenverläufe (Abb.20, 21, 24, 25) deutliche Einflüsse von Leakage-Effekten. Der hydrogeologische Aufbau des Untergrundes am Standort Trois Ponts macht das Auftreten von Leakage plausibel. Mit Hilfe der HANTUSH'schen Wendepunktmethode wird der Einfluß der hangenden leaky-Deckschichten auf das hydraulische Verhalten des Luxemburger Sandsteines berücksichtigt und quantifiziert. Die unterschiedlichen Niveaus in den Ruhespiegeln der verschiedenen lithostratigraphischen Einheiten (Kap.4.1) belegen einen unbeeinflussten hydraulischen Gradienten, der eine natürliche vertikale Zusickerung aus den geringer durchlässigen Deckschichten in den Grundwasserleiter ermöglicht. Durch die Absenkung des Druckspiegels des Luxemburger Sandsteins während der Grundwasserentnahmen wird dieser Gradient erheblich vergrößert. Die Wasserführung in den Fossilarmen Tonen ist, wie sich sowohl bei den Bohr- und Spülarbeiten, als auch bei den Grundwasserprobenahmen gezeigt hat, deutlich größer als in den Mergeln und Kalken von Strassen. Das durch Leakage in den Mergeln und Kalken von Strassen umgesetzte Volumen an Grundwasser macht sich in den hangenden Grundwasserspiegeln nicht bemerkbar (vergl. Abb.13).

(Abb.24) wurden die Werte für die Steigung der Ausgleichsgeraden (m_i) ermittelt. Unter Verwendung des Diagramms der Abb. 26 ergeben sich aus diesem Verfahren mit $m_{w(li3)} = 8$ m folgende Werte:

HANTUSH'sche Wendepunktmethode PV I Trois Ponts	
<u>Absenkung</u>	<u>Wiederanstieg</u>
$T_{(li2)} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$	$T_{(li2)} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$
$B_{(li3)} = 911,4 \text{ m}$ (direkt berechnet)	$B_{(li3)} = 651,0 \text{ m}$
$k_{f(li2)} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$	$k_{f(li2)} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$
$T_{(li3) \rightarrow v} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$	$T_{(li3) \rightarrow v} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$
$k_{f(li3) \rightarrow v} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m/sec}$ (abgeleitet)	$k_{f(li3) \rightarrow v} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m/sec}$

Tab. 5: Aquiferkennwerte für den Standort Trois Ponts aus Absenkungs- und Wiederanstiegsdaten von PV I unter Berücksichtigung von Leakage-Effekten mit HANTUSH'scher Wendepunktmethode (HANTUSH 1964)

Da diese Werte ein Mittel aus allen Piezometermeßwerten der Absenkungsphase von PV I darstellen, besitzen sie die Bedeutung von Gebietswerten und beschreiben eine Gebirgsdurchlässigkeit am Standort Trois Ponts.

Die Pumpversuchsauswertung am Standort Trois Ponts führt zur folgenden Bewertung der hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleitersystems.

In Anlehnung an die Durchlässigkeitsbewertung von Lockergesteinen ist die Gebirgsdurchlässigkeit des Luxemburger Sandsteines in Trois Ponts mit k_f -Werten von $1,9$ - $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$ als durchlässig zu bezeichnen. Die den Durchlässigkeitsbeiwerten zugrunde liegenden Transmissivitäten von $1,4$ - $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ wurden aus der Anwendung der HANTUSH'schen Wendepunktmethode auf die Daten des Absenkungs- und des Wiederanstiegsvorganges gewonnen. Die Transmissivitäten aus den Geradlinienverfahren passen in diesen Wertebereich, wobei die auftretenden systematischen Unterschiede auf die Nichtberücksichtigung der Leakage-Effekte zurückzuführen sind.

Die im Mittel 8 m mächtige, die Leakage-Effekte hervorrufende Abfolge der Deckschichten aus Mergeln und Kalken von Strassen wird durch die Leakage-Faktoren und die daraus abgeleiteten Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsbeiwerte (Tab.5) als gering durchlässig im Bezug auf eine vertikal gerichtete Strömung beschrieben.

Obwohl bei der Berechnung der Speicherkoeffizienten keine Leakage-Effekte berücksichtigt werden können, ist der mittlere Speicherkoeffizient von $S_{(li2-TP)} = 3,1 \cdot 10^{-4}$, wie die Ermittlung der effektiven Porosität weiter unten zeigt, als repräsentativ für den Standort Trois Ponts anzusehen.

Mit diesen Aquiferkennwerten und weiteren, im folgenden Kapitel aufgeführten geohydraulischen Größen lassen sich die Erkenntnisse über das Grundwasserleitersystem in Trois

Ponts vervollständigen, um letztlich mit den Ergebnissen aus Koerich zu einem geohydraulischen Gesamtkonzept verbunden zu werden.

4.1.2.3 Abgeleitete geohydraulische Größen

Spezifischer Speicherkoeffizient, li_2 in Trois Ponts

Nach HANTUSH (1966) beschreibt der Speicherkoeffizient die Integration der spezifischen Speicherkoeffizienten über die wassererfüllte Mächtigkeit des Aquifers. Bei Druckwasserspiegeln ist hier die Höhe des Druckspiegels über Aquiferbasis einzusetzen.

$$S = m_w \cdot S_s \quad (10)$$

Mit den Speicherkoeffizienten der Tab. 4 und den jeweiligen Druckspiegelhöhen werden für die Piezometer in Trois Ponts die spezifischen Speicherkoeffizienten der Tab. 6 berechnet. Die Mittelwerte aus den Werten der Piezometer TPPz2, TPPz3, TPPz5 von $S_{(li_2-TP)} = 3,1 \cdot 10^{-4}$ und $S_{s(li_2-TP)} = 2,7 \cdot 10^{-6}$ werden als charakteristisch für den Luxemburger Sandstein am Standort Trois Ponts angenommen.

Die Speicherkoeffizienten sind variable, druckabhängige, material- und grundwasserleiterspezifische Kenngrößen, mit deren Hilfe die wasserspeichernden Eigenschaften des Grundwasserleiters aufgeschlüsselt werden können. Eine Verknüpfung zwischen diesen Kennwerten und den druckabhängigen, elastischen Eigenschaften des Grundwasserleiters wird im folgenden beschrieben.

Barometrischer Koeffizient, li_2 in Trois Ponts

Nach JACOB (1940), erläutert in DÜRBAUM (1973, S.696), läßt sich der spezifische Speicherkoeffizient mit einem sog. barometrischen Koeffizienten (B_p) verknüpfen.

$$S_s = \Gamma \cdot \bar{n}_{eff} \cdot K/B_p \quad \text{mit} \quad B_p = \Delta W/\Delta P_0 \quad (11)$$

Der barometrische Koeffizient beschreibt die elastische Eigenschaft eines Grundwasserleiters mit ausgedehntem Druckspiegel auf Luftdruckschwankungen zu reagieren und drückt das Verhältnis von Druckschwankung im Grundwasser zu Luftdruckschwankungen aus.

Aus den mit statistischen Methoden aufbereiteten Daten von Druckaufnehmersonden konnten die Druckspiegelganglinien von TPPz3 und TPPz5 aus Trois Ponts erstellt werden (Abb.27). Für den Zeitraum des Ruhezustandes vor Beginn der Pumpversuche existieren leider keine langfristigen Aufzeichnungen mit genügender Auflösung, so daß die Ermittlung des barometrischen Koeffizienten an den kurzzeitigen Schwankungen erfolgen muß. Die zum Vergleich herangezogenen Luftdruckmessungen sind an der Station Belair, Luxemburg, des Service de la Météorologie et de l'Hydrologie de Luxembourg gemessen worden.

Für den Bereich des Grundwasserleiters bei TPPz5 wird ein barometrischer Koeffizient von $B_{p(TPPz5)} = 0,7$ bestimmt. Für die Bedingungen des Grundwasserleiters im Bereich von TPPz3 wird $B_{p(TPPz3)} = 0,38$ ermittelt.

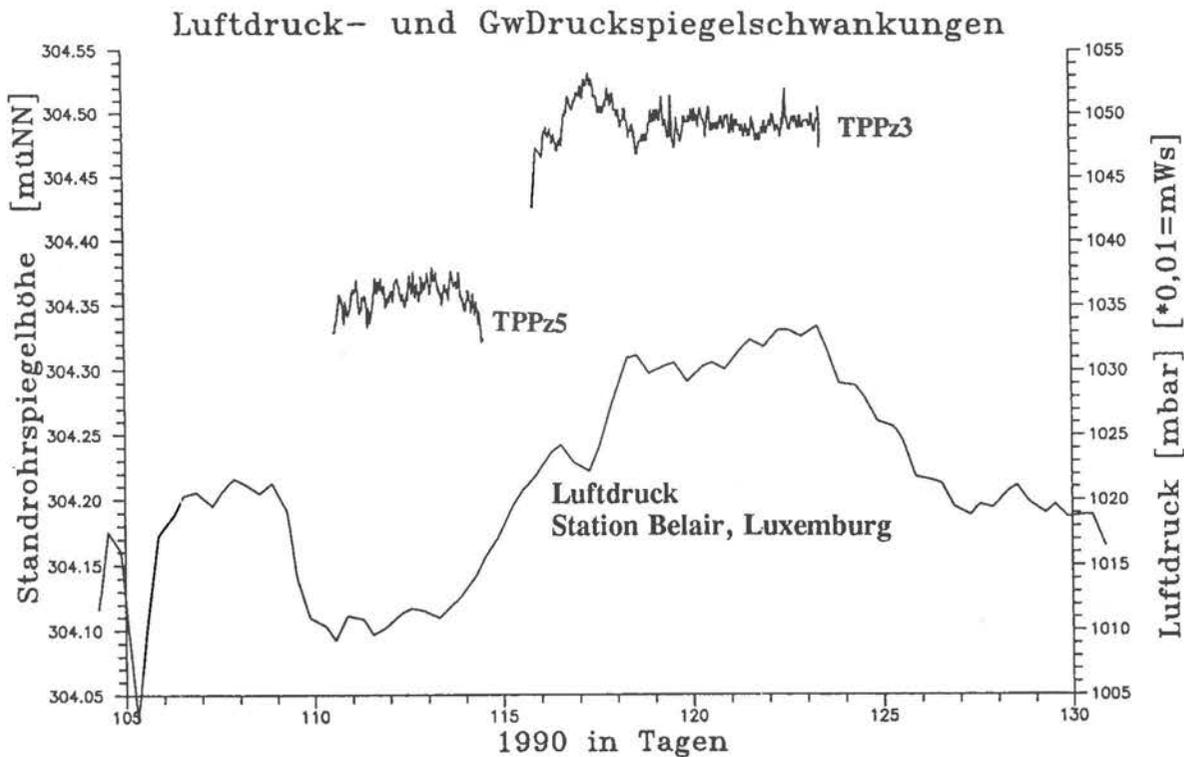


Abb. 27: Luftdruckschwankungen der Meßstation Belair, Luxemburg und Grundwasserdruckspiegelschwankungen der Piezometer TPPz3 und TPPz5 in Trois Ponts (Ruhezustand vor den Pumpversuchen)

Wirksamer Hohlraumanteil, li_2 in Trois Ponts

Die elastischen Druckspiegelvariationen in künstlichen Grundwasseraufschlüssen stehen in direktem Zusammenhang mit dem nutzbaren Hohlraumanteil des Grundwasserleiters. Der nutzbare Hohlraumanteil, oder auch die effektive Porosität, ist der Teil des wassererfüllten Hohlraumes im Untergrund, in dem die Grundwasserströmung stattfindet oder ggf. stattfinden kann. Im Festgesteinsgrundwasserleiter Luxemburger Sandstein in Trois Ponts besteht der Hauptanteil des nutzbaren Hohlraumes aus Kluftvolumen. Eine Bestimmung des Kluftvolumens kann mittels Parameter wie Klüftigkeit, Kluftweiten, Kluftabstände usw. vorgenommen werden (Literaturzusammenfassung hierzu bei HUBER, 1992). Einen Eindruck vom tektonischen Beanspruchungsplan des Luxemburger Sandsteins läßt sich aus den Diagrammen bei BERG (1965) gewinnen (vergl. Abb.9 und Kap.3). Vorstellungen über die Fortsetzung dieser im Anstehenden aufgenommenen Klüftung in Richtung zunehmender Versenkung sind nicht durch weiterführende Untersuchungen gefestigt. Die bei MATTHESS (1970) und DÜRBAUM et al. (1969) dargestellten Erkenntnisse zur Grundwasserbewegung in Festgesteinen können, was die Ermittlung einer Gebirgsdurchlässigkeit betrifft, generell übertragen werden. Hinweise und Rückschlüsse auf vom Trennfugengefüge beeinflusste Grundwasserströmungen, wie sie bei STÖBER (1984 dortige Abb.7 mit Skizzen zu Nr.5) beschrieben werden, lassen sich aus den Absenkungs- und Wiederanstiegs-kurven nicht ablesen. Für Trois Ponts wird in Kap. 4.1.1.1 und im folgenden dargelegt, daß bei dem unbeeinflussten natürlichen Grundwasserabfluß nur ein geringer Teil des zur Verfügung stehenden Hohlraumes von einer Grundwasserströmung genutzt wird.

Unter den gegebenen, gespannten Strömungsbedingungen und dem Festgesteinscharakter des Grundwasserleiters, sind die elastischen Eigenschaften des Grundwasserleitersystems in er-

ster Linie an den nutzbaren Hohlraumanteil (\bar{n}_{eff}) und an die Kompressibilität von Wasser (K) gebunden. Setzungsbedingte, im wesentlichen vertikal gerichtete Hohlraumänderungen sind am Standort Trois Ponts zu vernachlässigen. Dieser Zusammenhang läßt sich nach JACOB (1940) und de WIEST (1966) wie folgt beschreiben.

$$S_s = \Gamma \cdot [\bar{n}_{\text{eff}} \cdot K + (1 - \bar{n}_{\text{eff}}) / E_{\text{GWL}}] \quad (12)$$

Da, wie oben ausgeführt, unter den gegebenen Festgesteinsbedingungen das Elastizitätsmodul des Grundwasserleiters nicht quantifizierbar ist, müssen die elastischen Eigenschaften des Grundwasserleitersystems durch den barometrischen Koeffizienten ausgedrückt werden. Unter Anwendung von Gleichung (11) wurden folgende effektive Porositäten bestimmt.

Speicherkoeffizienten und wirksamer Hohlraumanteil in Trois Ponts				
	S	h	Ss	$\bar{n}_{\text{eff}}(B_p=0,38)$
TPPz1	$1,6-1,7 \cdot 10^{-3}$	150,4 m	$1,06-1,13 \cdot 10^{-5}$	
TPPz2	$3,7-3,9 \cdot 10^{-4}$	138,5 m	$2,67-2,82 \cdot 10^{-6}$	0,22 - 0,23
TPPz3	$2,3-2,6 \cdot 10^{-4}$	110,9 m	$2,07-2,34 \cdot 10^{-6}$	0,17 - 0,19
TPPz5	$2,6-3,3 \cdot 10^{-4}$	93,25 m	$2,79-3,54 \cdot 10^{-6}$	0,23 - 0,29
				($B_p=0,7 \rightarrow 0,47$)
TPPz2,3,5	$3,1 \cdot 10^{-4}$		$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,22

Tab. 6: Speicherkoeffizienten und effektive Porositäten bzw. wirksame Hohlraumanteile in Trois Ponts

Für das Grundwasserleitersystem in Trois Ponts wird die effektive Porosität aus dem als charakteristisch eingestuften mittleren spezifischen Speicherkoeffizienten der Piezometer TPPz2, TPPz3, TPPz5 und dem barometrischen Koeffizienten von TPPz3 berechnet. Ein im wesentlichen aus Kluftvolumen bestehender nutzbarer bzw. wirksamer Hohlraumanteil von 22% wird als realistisch angesehen, wobei eine lokale Erhöhung einer größeren Durchlässigkeit bzw. Klüftigkeit der hangenden Mergel und Kalke von Strassen zugeschrieben wird. Ein Hohlraumanteil von 22% erscheint im Vergleich mit Literaturdaten (z.B. aus dem Mittleren Buntsandstein in Hessen DÜRBAUM, MATTHES & RAMBOW 1969) als relativ hoch. In den Werten aus Trois Ponts ist ein Leakage-Einfluß enthalten, der die unbeeinflusste, rein aquiferspezifische Speicherkapazität des Luxemburger Sandsteins um einen nicht zu vernachlässigenden Betrag erhöht. Da die Größe des Leakage-Einflusses nicht zu ermitteln ist, wird in diesem Fall integrativ von einem (**speicher-)** **wirksamen Hohlraumanteil** gesprochen.

Mit der Heraushebung des Luxemburger Sandsteines nach NW, der abnehmenden Überdeckung und dem Fehlen der Fossilarmen Tone, scheinen die Mergel und Kalke von Strassen im Bereich von TPPz5 und in geringerem Ausmaß bei TPBR3 stärker verwittert und intensiver geklüftet zu sein. Dies führt zu größeren Leakage-Effekten, zu einem größeren wirksamen Hohlraumanteil und letztlich zum beobachteten relativ großen barometrischen Koeffizienten. Einige Ergebnisse aus Kap. 5 bestätigen diese Annahme einer besseren (Kluft-) Durchlässigkeit der Deckschichten im Bereich von TPBR3.

Wie bereits mehrfach deutlich wurde, ist das hydraulische Verhalten des Grundwasserleitersystems in Trois Ponts eng an das der Deckschichten gebunden. Der wesentliche Einfluß geht hierbei von den Mergeln und Kalken von Strassen aus, so daß deren geohydraulische Eigenschaften im folgenden ermittelt werden.

Hydraulische Leitfähigkeit, li_3

Mit dem Leakage-Faktor der Mergel und Kalke von Strassen, $B_{(li3)}$ (Leckfaktor bei DÜRBAUM 1973; Sickerfaktor bei KRUSEMAN & de RIDDER 1973), läßt sich aus der Beziehung

$$k_{f(li3) \rightarrow v} / m_{w(li3)} = T_{(li2)} / B_{(li3)}^2 \quad (13)$$

die mittlere hydraulische Leitfähigkeit des Aquitarden für eine vertikal gerichtete Strömung aus der Absenkung bzw. aus dem Wiederanstieg zu

$$1,9 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{sec)m}^{-2} \text{ bzw. zu } 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{sec)m}^{-2}$$

bestimmen. Da die Werte aus diesem Verfahren eine integrierende Aussage besitzen, verstehen sich diese Leitfähigkeiten als vertikal gerichtete Gebirgsdurchlässigkeit im Sinne einer Durchströmung der Deckschichten in Richtung auf den Luxemburger Sandstein.

Gesteinsdurchlässigkeit, li_3

Die formationsspezifische Durchlässigkeit der Mergelstein- und Kalkstein- Wechselfolge von Strassen wird aus dem Wiederanstiegsverhalten des TPPg50 abgeleitet. Die Probenahmen aus der Grundwassermeßstelle TPPg50 im Mai und September 1990 führen zu gut erkennbaren Absenkungen im Wiederanstiegskurvenverlauf (Abb.13). Aus den Wiederanstiegsbeobachtungen wurden nach HÖLTING (1984, S.133) mittels Kurzpumpversuchsauswertung für instationäre Strömungszustände k_f -Werte berechnet.

$$k_f = 5,3 \cdot \log(L / \phi_{BrG}) \cdot \log(W_1 / W_2) \cdot [\phi_{BrG} / 2 L (t_2 - t_1)] \quad (14)$$

Mit einem Durchmesser der Bohrung von $\phi_{BrG} = 0,12$ m und einer über 8 m hydraulisch an die Grundwassermeßstelle angeschlossenen Schichtfolge (li_4/li_3 , Abb.9) errechnet sich ein Durchlässigkeitsbeiwert von

$$k_{f(li3)} = 2,0 \cdot 10^{-9} \pm 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ m sec}^{-1}.$$

An den Wiederanstiegsbeobachtungen wurden Berechnungen mit unterschiedlichen (W_2 , t_2)-Werten durchgeführt. Entsprechend den verschiedenen Gradienten im Wiederanstiegskurvenverlauf, weisen die Berechnungen bei niedrigen Standrohrspiegelhöhen größere Unterschiede auf als die Berechnungen im September, nach längerer Erholungsphase des Grundwasserspiegels. Die relativ große Varianz des $k_{f(li3)}$ -Wertes ist eine Folge dieser Unterschiede.

Der Durchlässigkeitsbeiwert, $k_{f(li3)}$, stimmt gut mit der vertikal gerichteten, hydraulischen Durchlässigkeit der Mergel und Kalke von Strassen überein. Der Vergleich mit $k_{f(li3) \rightarrow v}$ aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode (Kap.4.2.2) zeigt, daß die Gebirgsdurchlässigkeit, ermittelt aus PV I, um eine Zehnerpotenz größer ist als die materialspezifischen Größen.

Hydraulischer Widerstand, li_3

Aus dem Kehrwert der obigen Beziehung, aus

$$m_{w(li3)} / k_{f(li3) \rightarrow v} = B_{(li3)}^2 / T_{(li2)} \quad (15)$$

wird der hydraulische Widerstand der Mergel und Kalke von Strassen gegen eine vertikale Durchströmung aus der Absenkung bzw. aus dem Wiederanstieg zu

$$5,4 \cdot 10^8 \text{ sec bzw. zu } 3,1 \cdot 10^8 \text{ sec}$$

errechnet. Unter dem Gesichtspunkt des Schutzes des liegenden Grundwasserleiters ist die geologische Barrierewirkung der Mergel und Kalke von Strassen mit **137 bzw. 78 Jahren** für die vertikale Durchsickerung der im Mittel 8 m mächtigen Schichtfolge zu beziffern. Eine Aussage über schichtparallele Durchlässigkeiten bzw. über eine Schichtwasserführung, wie sie im Aufschluß der anstehenden Mergel und Kalke von Strassen bei Saeul beschrieben ist (STRUFFERT 1989), kann nicht gemacht werden.

4.1.3 Verhalten des Grundwasserleitersystems in Trois Ponts

Mit Hilfe der im vorhergehenden Teil ermittelten Aquiferkennwerte und geohydraulischen Größen wird im folgenden das Verhalten des Grundwasserleiters Luxemburger Sandstein und seiner hangenden leaky-Deckschichten beschrieben.

Natürliche Grundwasserströmung

Aus dem Grundwassergleichenplan vom 16.03.1990 (Abb.15) läßt sich für den Ruhedruckspiegel ein Gefälle von ca. 0.08% bestimmen. Durch die Anwendung des DARCY'schen Gesetzes (DARCY 1856)

$$Q = k_f \cdot i \cdot F \quad \text{mit} \quad v_f = k_f \cdot i \quad \text{und mit} \quad v_a = v_f \cdot \tilde{n}_{\text{eff}}^{-1} \quad (16)$$

wird aus den Durchlässigkeitsbeiwerten aus Absenkung und Wiederanstieg von $k_{f(\text{li}2)} = 1,9-2,1 \cdot 10^{-5}$ m/sec (Tab.5) eine **Filtergeschwindigkeit** für den Luxemburger Sandstein in Trois Ponts von $v_{f(\text{li}2\text{-Ruhe})} = 1,5-1,7 \cdot 10^{-8}$ m/sec errechnet. Bei einer effektiven Porosität von $\tilde{n}_{\text{eff}} = 22\%$ beträgt die Abstandsgeschwindigkeit der Grundwasserströmung bei Ruhestromungsbedingungen $v_{a\text{-Ruhebdg.}} = 2,3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$.

Bei Betrachtung einer normierten (GwLeiter-) Querschnittsfläche von $F^* = 1 \text{ m}^2$ (Mächtigkeit X Breite) läßt sich der **natürliche Grundwasserabstrom** zu $Q_{(\text{li}2\text{-TP nat.})F^*} = 1,5-1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{sec}^{-1} \text{m}^{-2}$ quantifizieren.

Natürliches Leakage

Unter diesen natürlichen Strömungsbedingungen besteht zwischen den Druckwasserspiegeln des Luxemburger Sandsteins und der Mergel und Kalke von Strassen eine, auf den Luxemburger Sandstein gerichtete Potentialdifferenz von $\Delta W_{(\text{Ruhe})} = 1,4 \text{ m}$. Mit den für eine vertikale Strömung ausgerichteten Durchlässigkeitsbeiwerten der Mergel und Kalke von Strassen von $k_{f(\text{li}3 \rightarrow v)} = 1,5-2,6 \cdot 10^{-8}$ m/sec wird aus Gleichung (16) nach Einsetzen von $i = \Delta W / h_{\text{li}3}$ ein **natürliches Leakage** von $Q_{L(\text{nat.})} = 2,6-4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ errechnet. Bezogen auf die (Einheits-) Fläche $F^* = 1 \text{ m}^2$ und den Zeitraum eines Jahres, entspricht die natürliche Zusickerung aus den Mergeln und Kalken von Strassen etwa **10-18% des langfristigen mittleren Niederschlages** von $792 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

Unter diesen natürlichen, ungestörten Strömungsbedingungen beträgt der **Leakageanteil** aus den Mergeln und Kalken von Strassen **ca. 0,15-0,31 bzw. 15-31% des natürlichen Grundwasserabstromes** im Luxemburger Sandstein am Standort Trois Ponts.

Gültigkeit des DARCY'schen Gesetzes

Bei allen Rechnungen dieses Kapitels, in die hydraulische Komponenten eingehen, wird die Gültigkeit des DARCY'schen Gesetzes (16) vorausgesetzt. Es existiert demnach in den betrachteten Gebieten eine lineare Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit vom hydraulischen Gradienten. In unmittelbaren Nähe eines fördernden Brunnens wird von einer Überschreitung der oberen Gültigkeitsgrenze des DARCY'schen Gesetzes ausgegangen. In diesem Nahbereich des Brunnens tritt eine turbulente Strömung auf (z.B. HOFEDANK 1974). Kontrollberechnungen mit Hilfe der DUPUIT-THIEM'schen Gleichung (17) belegen für TPBR5 und TPPz4, daß in Bereichen mit $r > 10-15 \text{ m}$ laminare Strömung herrscht. Die viel diskutierte Gültigkeit des DARCY'schen Gesetzes im Bezug auf das lineare Verhalten bei kleinen hydraulischen Gradienten in bindigen Sedimenten wird, den Ausführungen von SCHILDKNECHT & SCHNEIDER (1987) folgend, als gegeben betrachtet. Untermuert wird diese Feststellung durch das Auftreten eines natürlichen hydraulischen Gradienten von $i = \Delta W / m_{w(\text{li}3)} = 1,4/8 = 0,18 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$. So sind gegebenenfalls zu berücksichtigende, in der Literatur diskutierte Anfangsgradienten überschritten

oder werden bei einsetzender Absenkung schnell überschritten. Ein lineares Verhalten ist somit sichergestellt.

Grundwasserneubildung

Wird die Gültigkeit der oben beschriebenen natürlichen Strömungsbedingungen für den bedeckten Grundwasserleiter aus Luxemburger Sandstein im Großraum Trois Ponts vorausgesetzt, so entspricht der natürliche Grundwasserabstrom etwa 59-67% des langfristigen mittleren Jahresniederschlages von $792 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$.

Aus der Differenz von natürlichem Grundwasserabstrom ($Q_{(li2-TP \text{ nat.})F*}$) und natürlichem Leakageanteil ($Q_{L(nat.)F*}$) errechnet sich unter diesen Strömungsbedingungen ein Abstromvolumen (bezogen auf die Einheitsfläche), das bei Übertragung auf das potentielle Neubildungsgebiet einer mittleren Grundwasserneubildung von ca. 49% des langfristigen mittleren Jahresniederschlages entspricht. Dieser Rechenwert gilt nur unter den oben festgelegten Annahmen. In Richtung auf das potentielle Neubildungsgebiet nimmt im Zuge geringer werdender Überdeckung der Infiltrationsanteil stetig zu, bis die Infiltrationsrate des anstehenden Luxemburger Sandsteins erreicht ist. Dies bedeutet, daß die berechneten Relationen weder Rückschlüsse auf die tatsächliche Infiltrationsrate im Gebiet des anstehenden Luxemburger Sandsteins, noch eine Kalkulation der Anteile dieser Wässer am natürlichen Abstrom in Trois Ponts zulassen, sondern ausschließlich als relative Größen betrachtet werden dürfen.

Stationäre GwStrömung während der Absenkungsphase

Aus den Grundwassergleichenplänen vom 16.3., 29.5 und 23.8. 1990 (Abb.15, 16, 17) lassen sich für den Ruhezustand und für die stationären Strömungszustände am Ende der Pumpphase in Trois Ponts für den Bereich um TPPz5 unterschiedliche Druckwasserspiegelgefälle von 0,08 bzw. 0,1% und 1% ablesen.

Am Ende der Pumpversuche haben sich jeweils weitgespannte Absenkungstrichter ausgebildet und in TPPz5 zu Absenkungen des Druckwasserspiegels von 5,64 und 8,59 m geführt. In den äußersten Bereichen dieser Absenkungstrichter ist hat sich ein Grundwasserspiegelgefälle von ca. 1% eingestellt. Diese Unterschiede treten auch in der Quantifizierung der Strömungszustände auf. Aus den Durchlässigkeitsbeiwerten der Tab. 5 wird unter Anwendung der Gleichung (16) für das Grundwasserspiegelgefälle des Ruhezustandes mit $i = 0,1\%$ eine Filtergeschwindigkeit von $v_f = 1,9-2,1 \cdot 10^{-8} \text{ m/sec}$ berechnet. Diese liegt um eine Potenz unter der der stationären Grundwasserströmung im weitgespannten Außenbereich der Absenkungstrichter von $v_f = 1,9-2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m/sec}$.

In Richtung auf die Entnahmebrunnen vergrößert sich der Unterschied zwischen den herrschenden Filtergeschwindigkeiten mit zunehmendem Gefälle des Grundwasserspiegels. Im Bereich der inneren Absenkungstrichter erreichen die Filtergeschwindigkeiten die Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwertes.

Die hier quantifizierte, nur gering unterschiedliche Grundwasserströmung im Bereich von TPPz5 läßt sich deskriptiv aus den in Kap. 4.1.1 mit Abb. 14 dargestellten, nahezu identischen Verlauf der Grundwassertemperaturkurven aus TPPz5 ablesen.

Einzugsbereich und Leakage PV I in Trois Ponts

Da der im Einzugs- bzw. im Absenkungsbereich eines Pumpversuches dem Grundwasserleiter tatsächlich durch Leakage zufließende Volumenstrom vom punktuellen Potentialgefälle abhängt, wird im folgenden für PV I die Reichweite bestimmt, der Absenkungstrichter berechnet und über diesen die Leakagerate schrittweise integriert.

Die Förderung aus mehreren Brunnen wurde wiederum nach dem Superpositionsprinzip in Ansatz gebracht. Für die Anwendung der bei DÜRBAUM (1969, S.1504, dort.Gl.(27)), als Reihenentwicklung der instationären THEIS'schen Lösung (4), dargestellten Gleichung oder der

bei BRAUNS & GOTTHEIL (1989, S.446, dort.Gl.(7)), als mathematische Reihe veränderten, stationären DUPUIT-THIEM'sche Lösung (17) fehlt die notwendige Symmetrie in der Brunnenanordnung. Eine Bestimmung des sich mit der Entfernung zu den Entnahmebrunnen ändernden Leakage mittels einer modifizierten Zylinderfunktion (DÜRBAUM 1967, S.67) konnte nicht durchgeführt werden, da die Anwendungsgrenze dieser Lösung ($r/B = 1/3$ mit $r=R$) erheblich überschritten wird.

Für den stationären Strömungszustand am Ende von PV I in Trois Ponts läßt sich anhand der Aquiferkennwerte und der Absenkungsdaten ein Absenkungstrichter berechnen. Mit Hilfe der DUPUIT-THIEM'schen Gleichung für stationäre, gespannte Strömungsbedingungen (THIEM 1906)

$$Q = \frac{2 \pi T}{\ln(r_2/r_1)} \cdot (W_2 - W_1) \quad (17)$$

wurde der Absenkungstrichter der Abb. 28 für den quasistationären Strömungszustand am Ende von PV I berechnet. Als striktes Kriterium für diese Rechnungen wurde die Erlangung der gemessenen Absenkungen festgesetzt, so daß eine iterative Anpassung der Transmissivitäten durchgeführt werden mußte. Die durch diese Anpassung erhaltenen piezometerspezifischen Transmissivitäten stellen eine gewisse Überprüfung der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung dar. Der berechnete Absenkungstrichter erfaßt eine maximale mittlere Reichweite von 1500 m und umgibt bis zu einem Radius von 200 m die Entnahmebrunnen einheitlich. Der innere Teil dieses Trichters wird von fünf verschieden tiefen und verschieden steilen Absenkungstrichtern eingenommen. Der Übergang vom äußeren Absenkungstrichter zu den inneren Trichtern macht sich in Abb. 28 als Fehlstelle bemerkbar.

Reichweite PV I Trois Ponts

Das mittlere Grundwasserspiegelgefälle des Grundwassergleichenplanes vom 29.05.1990 (Abb.16) führt zur Abschätzung des Einzugsbereiches von ca. 1500-2000 m.

Aus dem natürlichen Grundwasserabstrom und der mittleren Förderrate von PV I läßt sich eine Reichweite von ca. 1000 m herleiten.

Nach Umformung der Gleichung (17) wurde bei den Berechnungen zum Absenkungstrichter durch Verwendung von

$$R = r_1 \cdot \exp \left\{ \frac{2 \pi T}{Q} (s_{r1} - 0,01) \right\} \quad (18)$$

Reichweiten zwischen 1000 und 2000 m ermittelt. Als Grenzwert für eine Beeinflussung durch die Grundwasserentnahmen wurde eine Absenkung von 0,01 m angenommen. Diese bedingt, daß in den äußeren Bereichen des Absenkungstrichters nur noch geringe Absenkungsbeträge auftreten und die natürliche Potentialdifferenz von maßgeblicher Bedeutung für das hydraulische Verhalten ist.

Bei all diesen Betrachtungen wurde die wohlbegründete Annahme einer Anisotropie, als auch das Auftreten von bevorzugten Kluftrichtungen außeracht gelassen, so daß in durchlässigeren Kluftzonen und Hauptkluftrichtungen durchaus erheblich weitläufigere Absenkungen auftreten können.

Die Schrittweite der einzelnen Integrationsschritte wurde den herrschenden hydraulischen Gradienten angepaßt (Abb.28). Der Bereich der maximalen Absenkung wurde auf einen Radius von 15 m um den Entnahmebrunnen festgelegt. Für den jeweiligen Integrationsschritt wurde die Kreisfläche berechnet und mit dem jeweils wirksamen hydraulischen Gradienten als (Ring-) Segment betrachtet. Mit $i = \Delta W / m_{w(li3)}$ ergibt sich mit $\Delta W = s + \Delta W_{(Ruhe)}$ der entsprechende wirksame hydraulische Gradient. Aus den Durchlässigkeitsbeiwerten für die Mergel und

Kalke von Strassen von $k_{f(li3) \rightarrow v} = 1,5-2,6 \cdot 10^{-8}$ m/sec (Tab. 5) errechnen sich für den Einzugsbereich des PV I, durch Anwendung der Gleichung (16) auf die einzelnen Ringsegmente und anschließender Integration, Leakageraten von $0,061$ und $0,106$ m³/sec bzw. 220 und 380 m³/h.

Bei einer mittleren gewichteten Förderrate des PV I von $Q_r = 193,35$ m³/h wird bei einer Reichweite von ca. 1500 m die gesamte Grundwasserentnahme des PV I durch Leakagezutritte ersetzt. Die vollständige Ersetzung der Grundwasserentnahmen durch Leakage trifft nur für den Fall der langfristigen Einstellung des vorausgesetzten stationären Strömungszustandes zu. Bei kurzfristigen Förderungen wird der Leakageanteil an der Grundwasserförderung etwa dem des natürlichen Grundwasserabstromes entsprechen.

Der Einfluß von hydraulisch durchlässigeren und stärker durchströmten Kluftrichtungen auf die Anströmung der Entnahmebrunnen wird zusammenfassend diskutiert.

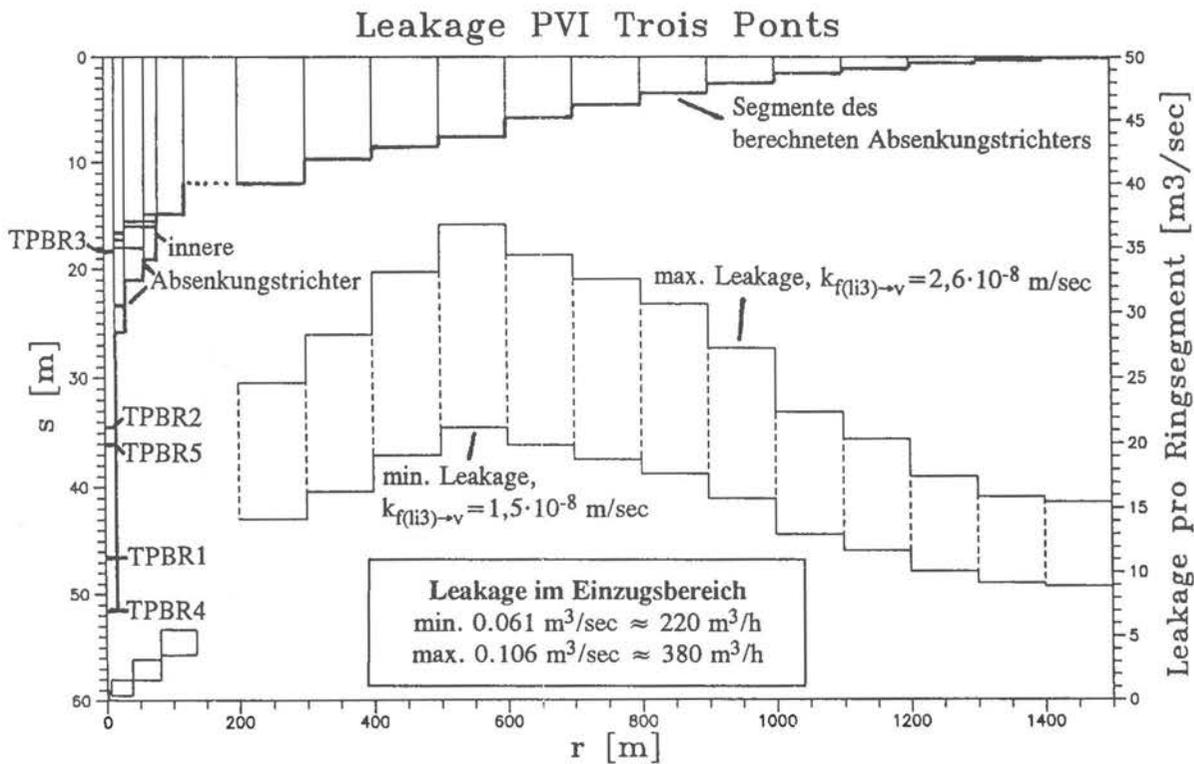


Abb. 28: Berechneter Absenkungstrichter und Leakage zum Pumpversuch I in Trois Ponts

4.2 Koerich

4.2.1 Geohydraulische Abflußsysteme in Koerich

Im Arbeitsgebiet am Standort Koerich treten, wie die Untersuchungen zeigen und im folgenden dargelegt wird, zwei eigenständige Abflußsysteme auf. Das Abflußsystem der Eisch ist mit seinen Abflußspitzen stark vom Oberflächenabfluß im Oberlauf beeinflusst. Während der überwiegenden Zeit des Abflußjahres ist die Eisch von den Grundwasserübertritten entlang der Fließstrecke im anstehenden Luxemburger Sandstein geprägt. Das im unterirdischen Abflußsystem transportierte Grundwasser findet nur zum Teil in den Quellen und in der Effluenz im Eischtal einen Übertritt in den oberirdischen Abfluß. Der verbleibende Teil des Grundwassers folgt der generellen Einfallsrichtung der Schichten nach Süden und sinkt in größere Tiefen ab (z.B. in Richtung Trois Ponts).

4.2.1.1 Abflußsystem der Eisch, A₀

Das Fließgeschehen in der Eisch wird auf der Strecke Trois Ponts - Koerich durch mehrere kleine Staumauerwerke verändert. Die Staumauer an der alten Koericher Mühle, wenig oberhalb der Pumpstation der SES, erzeugt einen Aufstau der Eisch in ihrem Flußbett um ca. 1,2 m (OK-Staumauer 261,88 m üNN). Anhand von Luftbildern läßt sich der Aufstau bis oberhalb von KBR1 erkennen. Die Brunnen und Piezometer KBR1, KBR2, KPz1, KPz2 und KPz3 liegen im weiteren Bereich des Aufstaus (Abb.30, 31).

Bei den kurzzeitigen Abflußspitzen der Wintermonate ist der Wasserspiegelanstieg in der Eisch so groß, daß die Staumauer in Koerich überflutet ist. Bei diesen Hochwässern kommt es im Bereich der Brunnen zu geringfügigen Überschwemmungen (Geländeniveau 264 m üNN). In Abb. 29 ist diese Situation für Januar und Februar 1990 dokumentiert. Die vorherrschenden Abflußbedingungen der mittleren Wasserführung (MNQ) und der Niedrigwasserführung (NNQ) unterscheiden sich nur wenig. Die verschiedenen Staubereiche üben während dieser Zeit einen ausgleichenden, rückhaltenden Einfluß aus (vergl. hierzu Ganglinie Pegel-SES in Abb.29). Mit Abb. 30 und 31 sind die Abflußbedingungen der Hochwasserführung (24.01.90) und der mittleren Niedrigwasserführung (28.08.90, vor Beginn der Pumpversuche) dargestellt. Aus den Profilschnitten zwischen KBR1 und KBR4 wird deutlich, daß der Wasserspiegel der Eisch bzw. die Wasserführung in der Eisch dem natürlichen Grundwasserspiegel aufgesetzt ist. Der Kontaktbereich zum Grundwasser des Luxemburger Sandsteins ist an die Basis des Flußbettes zu legen.

Die Grundwasserübertritte aus dem Luxemburger Sandstein in die Eisch hat v.HOYER (1971b) mittels Abflußmessungen bestimmt. Er ermittelte auf der Fließstrecke zwischen Pegel *Bafelt* und Pegel SES_(alt) einen Grundwasserzutritt von 45 l/sec. Zum Zeitpunkt dieser Messungen betrug der Niedrigstwasserabfluß der Eisch $NNQ_{(Bafelt)} = 400$ l/sec. Der Eisch-Pegel *Bafelt* stand ungefähr im Bereich des heutigen KPz2 (alter Brunnen *Bafelt*), d.h. unweit von dem Bereich, in dem die Eisch den Sattel *Steinfort-Ehner* quert und in die Hauptmulde *Koerich-Simmern-Ditzebiereg* eintritt (siehe Abb.30, 31 und Kap.3). Der Pegel SES_(alt) ermittelte die Eischwasserstände am Eintritt der Eisch in den muldenparallelen, breiten Talverlauf, deutlich unterhalb der Quellfassung Lauterbur.

Der heutige Schreibpegel "Pumpstation-SES Koerich" ist mitten in der Flußschlinge positioniert, deutlich oberhalb der Grundwasserübertritte (s.u.).

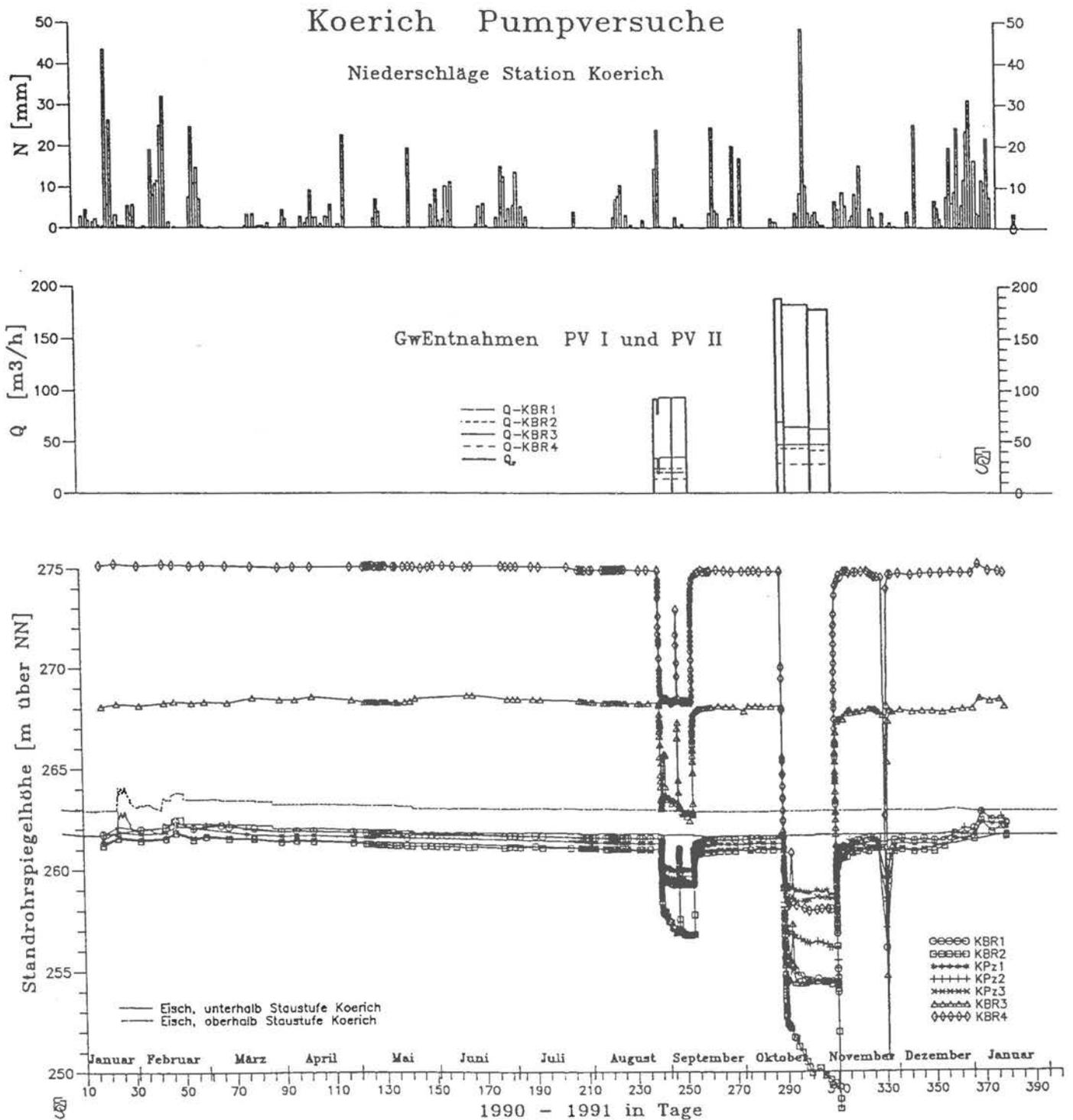
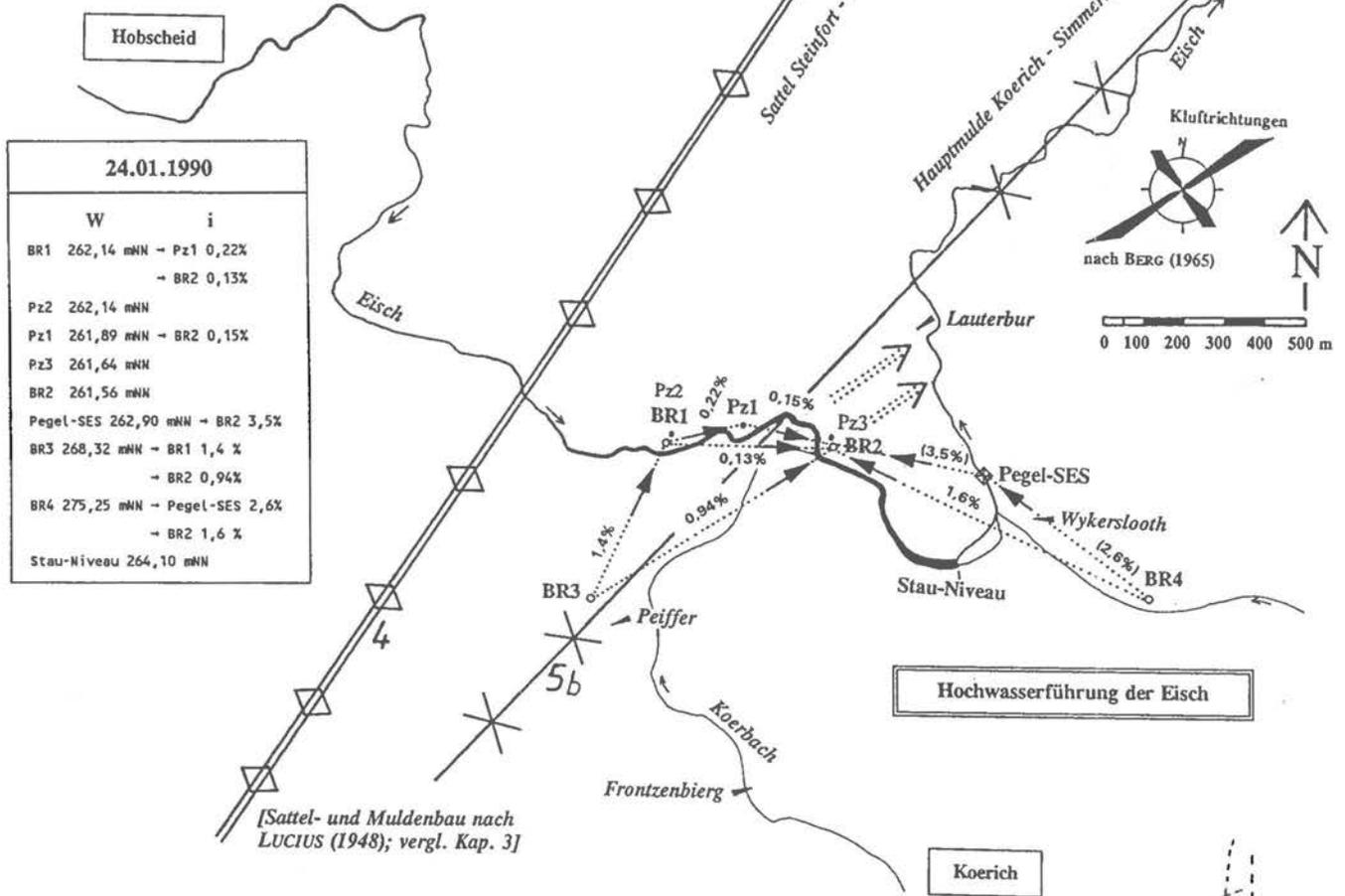


Abb. 29: Ganglinien der GwMeßstellen, GwEntnahmen der Pumpversuche I, II und Niederschläge am Standort Koerich

Grundwasserströmung in Koerich schematisiert



Hochwasserführung der Eisch am 24.01.1990

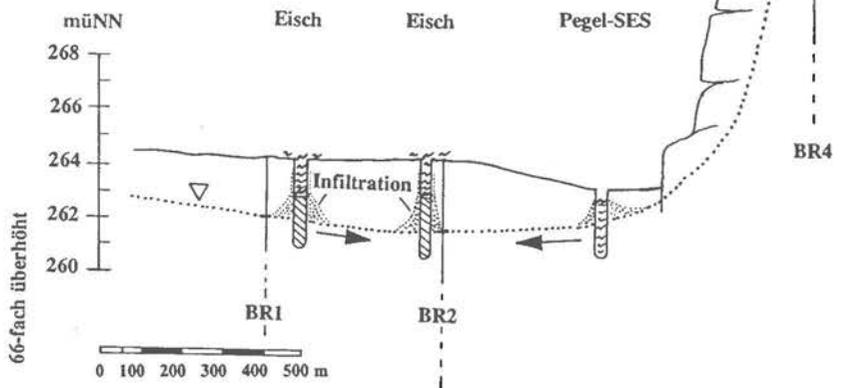


Abb. 30: Schematisierte Grundwasserströmung 24.01.1990 in Koerich; Hochwasserführung der Eisch

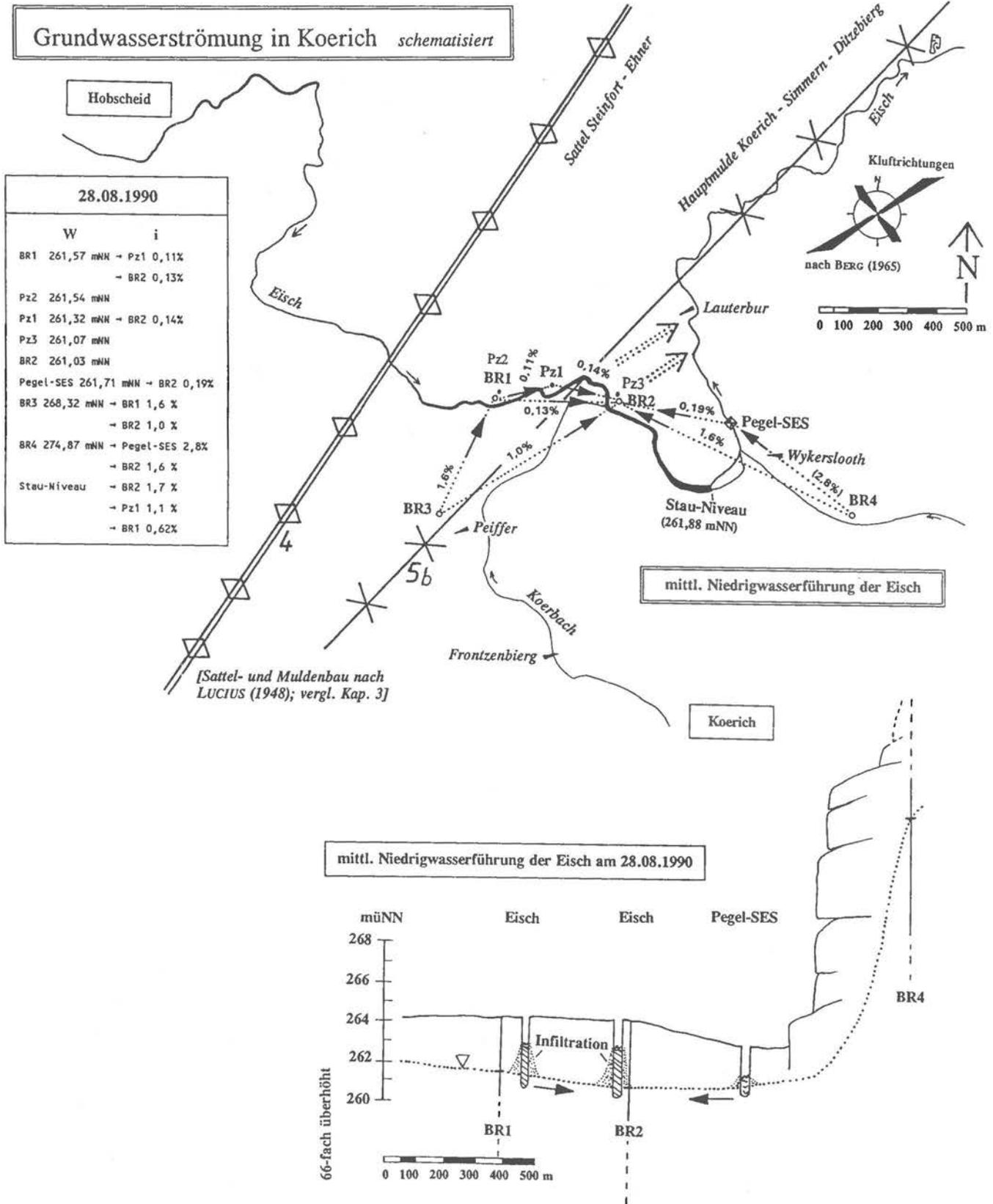


Abb. 31: Schematisierte Grundwasserströmung 28.08.1990 in Koerich; mittlere Niedrigwasserführung der Eisch

4.2.1.2 Grundwasserströmung in Koerich, A_u

Spezielle hydrogeologische Bedingungen

Die Brunnen und Piezometer in Koerich sind in der Hauptmulde *Koerich-Simmern-Ditzeberg* positioniert (vergl. Abb.30, 31 und Kap.3). Der Brunnen KBR3 erschließt den Luxemburger Sandstein in seiner tiefsten Position und ist direkt der Quelle *Peiffer* benachbart. Die Brunnen und Piezometer KBR1, KPz2, KPz1, KPz3 und KBR2 sind im Eischtal in einem Abstand von ca. 50 m zum Flußlauf entlang der Eisch aufgereiht. Der Brunnen KBR4 steht auf der östlichen Flanke der Hauptmulde (vergl. Abb.30 und 31). Für die Grundwasserspiegelbeobachtungen stehen für die Brunnen KBR3 und KBR4 keine Piezometer zur Verfügung. Alle Brunnen und Piezometer sind vollkommen ausgebaut, wobei die oberen 5-10 m der Schichtfolge abgesperrt sind. Aus der Abb. 29 ist für den Zeitraum der Überschwemmung im Januar und Februar 1990 anhand der Ganglinien der Eischwasserstände und der nur geringfügig variierenden Standrohrspiegelhöhen ablesbar, daß kein hydraulischer Kurzschluß über die Ausbauten der Brunnen und Piezometer besteht. Die unterschiedlichen geographischen und strukturellen Positionen der Brunnen und Piezometer spiegeln sich in den Endteufen und in den sich ergebenden wassererfüllten Mächtigkeiten (h) wider. Die Brunnenbohrungen wurden jeweils bei Erreichen einer stark mergeligen Lithofazies eingestellt. Die Piezometer sind nicht bis in die mergeligen basalen Partien abgeteuft worden.

	Geländeneiveau	Teufen	m _w
KBR1	264 müNN	34 m	32 m
KPz2	264 müNN	≈30 m	32 m
KPz1	264 müNN	30 m	32 m
KPz3	264 müNN	≈30 m	32 m
KBR2	264 müNN	34 m	32 m
KBR3	275,7 müNN	55 m	47,5 m
KBR4	279,5 müNN	43 m	38,6 m

Tab. 7: Daten zu Ausbau und Position der Brunnen und Piezometer in Koerich

Nach den Aufzeichnungen zur Ansprache der Bohrproben durch den Service Géologique de Luxembourg tritt keine lithologische Differenzierung zwischen dem Talbereich der Eisch und den anderen Brunnenpositionen auf. Typische Talauensedimente sind erst unterhalb der Flußschlinge, im breit ausgeräumten Tal zwischen Koerich und Septfontaines, verbreitet (s.o.). Die oberflächennahen sandigen Verwitterungsreste des Luxemburger Sandsteines gehen schnell in die typische Festgesteinsform des zutage anstehenden Luxemburger Sandsteines über.

Am Standort Koerich tritt ein orthogonales Kluftnetz aus zwei unterschiedlichen Kluftsystemen auf. Die Klüftungsdiagramme in Abb. 10, 30 und 31 beschreiben das Haupt- und Querkluftsystem. Im zusammenhängenden Gesteinsverband sind diese Klüfte, im Vergleich zu Trois Ponts, weiter geöffnet und zum Teil mit sandigem bis schluffigem Verwitterungsmaterial bis hin zu tonig-mergeligen Residualsedimenten verfüllt. Je nach Lösungs- und Ausfällungserscheinungen entlang ehemaliger Wasserwegsamkeiten können die Kluftbahnen völlig verfüllt bis abgedichtet sein. Hierzu sind Beispiele aus Aufschlüssen unweit nördlich der Pumpstation der SES

bei STRUFFERT (1989) beschrieben. Dort sind auch Beispiele für sekundär erweiterte und verfüllte Großklüfte gegeben. Die Erweiterung der bestehenden Klüftbahnen entsteht im Zuge von Verstellung und Verkipfung infolge des Abgleitens ganzer Schichtstapel auf den quellfähigen basalen Pylonoten-Schichten im Randbereich zu größeren, tiefer einschneidenden Erosionsformen.

Die Klüfte bilden im anstehenden Luxemburger Sandstein ein bis zur Basis wirkendes System von besonderen Wasserwegsamkeiten. Den Klüftbahnen der Hauptklüftichtung werden die besten Wasserdurchlässigkeiten zugeschrieben. Diese Anisotropie im Hauptklüftsystem wird in den folgenden Ausführungen quantifiziert.

Unterirdischer Abfluß, A_u

Die Standrohrspiegelhöhen vom 28.8.90 und 14.01.90 geben die Ausgangswerte für eine hydraulische Interpretation der Grundwasserströmung unter den Bedingungen einer mittleren Niedrigwasserführung und der Ausnahmesituation der Hochwasserführung der Eisch. Mit Hilfe der Abb. 30 und 31 lassen sich diese typischen Abflußsituationen im folgenden beschreiben. Die Abbildungen sind aus der Kombination von Luftbildauswertung, strukturgeologischer Interpretation (siehe Kap.3) und hydraulischen Untersuchungen entstanden.

- Es müssen zwei unterschiedlich ausgerichtete und unterschiedlich reagierende Abflußregime unterschieden werden: das Oberflächenabflußsystem der Eisch und das unterirdische Abflußsystem, die Grundwasserströmung.
- Der Grundwasserspiegel findet seinen tiefsten Punkt in KBR2 und ist von drei Seiten, mit unterschiedlichem Gefälle, auf diese Depression ausgerichtet.
- Von den Seiten her, von KBR3 und KBR4, strömt das Grundwasser mit einem Gefälle zwischen 1% und 1,6% den tiefer gelegenen Talbereichen bei KBR1 und KBR2 zu. Bei der Berechnung der Grundwasserspiegelgefälle setzen sich die Grundwasserspiegel unterhalb der Eisch, ohne Berücksichtigung des Eischeinflusses, fort. Daß der Grundwasserspiegel nicht auf den jeweiligen Wasserstand des Fließgewässers ausgerichtet ist, zeigen die unrealistischen Gradienten zwischen KBR4 und Pegel-SES und bei Hochwasserführung der Gradient zwischen Pegel-SES und KBR2.
- Im Eischtal ist der Grundwasserspiegel mit einem Gefälle zwischen 0,1% und 0,15% auf KBR2 ausgerichtet. Bei den Abflußbedingungen von MNQ und NNQ der Eisch paßt der Gradient (Pegel-SES, KBR2) von 0,19% in diese Größenordnung.
- Die Eisch ist mit ihrer Wasserführung mittelbar an die Grundwasserströmung angeschlossen. Ihr Einfluß auf den Grundwasserspiegel am Standort Koerich ist gering und von eng begrenzter lokaler Reichweite. Die relativ großen Gradienten zwischen Stau-Niveau der Eisch (bei MNQ) und den Standrohrspiegelhöhen der benachbarten Grundwassermeßstellen sind Beleg für eine geringe laterale Auswirkung einer Infiltration entlang des Flußbettes.

Die kurzzeitigen Hochwässer und Überschwemmungen wirken sich nicht direkt auf die Ganglinien des Grundwasserspiegels aus (Abb.29). Aus den erhobenen Daten ist für den Zeitraum der Überschwemmungen keine großflächige Infiltration mit größeren Quantitäten an Flußwasser ersichtlich. Es verbleibt im Untergrund des überschwemmten Gebietes eine ca. 1,5 m mächtige, nicht saturierte Zone.

Entlang des Eischlaufes ist, auch unter gewässerkundlichen Normalverhältnissen, eine stetige Infiltration anzusetzen, die insbesondere im tektonisch besonders aufgelockerten Bereich der Hauptmulde wirksam werden kann.

Inwieweit biologische Aktivitäten und sedimentologische Prozesse zu einer Kolmation des Flußbettes und somit zu einem behinderten Austausch von Fluß- und Grundwasser führen, ist nicht untersucht. Im Bereich der Wasserwirtschaft sind solche Vorgänge bei der künstlichen

Grundwasseranreicherung und bei der Uferfiltration vielfach untersucht und quantifiziert worden (siehe Beiträge und Literaturhinweise in: KÖNIG & SCHUBERT 1992).

A_u in Muldenzone und Eischtal

Aus dem Dargelegten ergibt sich ein unterirdischer Abfluß von Grundwasser nach Nordosten. Als Strömungsbahnen bieten sich die Klüfte des, der Hauptkluftrichtung folgenden und zur Muldenachse der Hauptmulde *Koerich-Simmern-Ditzberg* parallel verlaufenden Kluftsystems an. Diese Klüfte werden zwar von der Eisch im Bereich der Brunnen KBR1 und KBR2 gequert, doch erst nach Durchfließen der Flußschlinge in einer orographisch tiefer gelegenen Position so angeschnitten, daß die Voraussetzungen für größere Grundwasserübertritte in die Eisch gegeben sind. Als deutliches Zeichen für die effluente Kluftwasserführung dieses Gebietes dient die Quelfassung Lauterbur. Die Quelfassung nutzt den Übertritt der Kluftgrundwässer in das Eischtal genau am Übergang vom Anstehenden zur Talaue. Aus hydrogeologischer Sicht sollte nicht von einer "Quelfassung" Lauterbur gesprochen werden, da das Bauwerk den Grundwasserspiegel freilegt. Das Grundwasser wird mittels Pumpe aus der Fassung gefördert, so daß mehr der Charakter eines Flachbrunnens vorliegt. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird die angestammte Bezeichnung übernommen. Die Position der Quelfassung liegt genau in Hauptkluftrichtung, nordöstlich von KBR2. Die gute hydraulische Verbindung zu KBR2 wird an der unmittelbaren Reaktion des Wasserstandes in der Quelfassung auf die Grundwasserentnahmen aus KBR2 deutlich.

Aus den Abflußdaten von v.HOYER (1971b) errechnet sich für die betrachtete Fließstrecke der Eisch eine Effluenz an Grundwasser von 45 l/sec (s.o.). Wie die Ausführungen gezeigt haben, tritt der größte Teil dieses Grundwassers ab dem unteren Teil der Flußschlinge auf einer Länge von ca. 250 m natürlich in die Eisch über. Der Quellwasseranteil ist bei diesen Betrachtungen vernachlässigbar, da im Zeitraum des NNQ in der Eisch die Quellschüttungen dieses Gebietes fast vollständig zur Deckung des Trinkwasserbedarfs genutzt werden.

In solch einer stärker klüftigen (Mulden-) Zone in einer geringer durchlässigeren Umgebung wird die Anströmung eines Brunnens durch den Ausdruck

$$Q \approx T \cdot b \cdot i \quad (19)$$

beschrieben (DÜRBAUM 1973, S.706). Dieser Ansatz ist dort sowohl durch eine Näherungslösung (dortige (48)), als auch durch die exakte Lösung der Spiegelbild-Methode (HANTUSH 1964) dargestellt.

Mit Gleichung (19) läßt sich auch eine natürliche Grundwasserströmung ermitteln. So werden aus $b = 250$ m, $m_w = 32$ m, $Q_{\text{Effluenz}} = 0,045$ m³/sec und $i = 0,1-0,15\%$ für die oben beschriebene Muldenzone die Werte der Tab. 8 ermittelt.

Der eingesetzte hydraulische Gradient entspricht dem des Grundwasserspiegels im Eischtal (Abb.30, 31). Mit "HKR" und "QKR" wird die Richtungsabhängigkeit der berechneten Größen angefügt. Die Kennwerte für die Querkluftrichtung sind im Vorgriff auf die Pumpversuchsauswertung aus Kap. 4.6.5 entnommen.

Anisotropie im Hauptkluftsystem im Luxemburger Sandstein im Raum Koerich

T_{HKR} 0,12-0,18 m ² /sec	T_{QKR} 4,5·10 ⁻³ - 4,5·10 ⁻² m ² /sec
k_f HKR 3,7-5,6·10 ⁻³ m/sec	k_f QKR 1,4·10 ⁻⁴ - 1,4·10 ⁻³ m/sec
v_f HKR 3,7-8,4·10 ⁻⁶ m/sec	v_f QKR 1,4·10 ⁻⁷ - 2,1·10 ⁻⁶ m/sec

Tab. 8: Anisotropie im Hauptkluftsystem; geohydraulische Kenngrößen der Klüfte der Haupt- und Querkluftrichtung im Luxemburger Sandstein im Raum Koerich

Der sich aus diesen Daten ergebende Anisotropiefaktor ist wesentlich von der punktuell stark variierenden Durchlässigkeit der Querklüftung abhängig.

Die unbeeinflusste Grundwasserströmung im betrachteten Teil des Eischtals ist von drei Seiten mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 0,1-0,15\%$ auf KBR2 ausgerichtet (s.o. und Abb.30, 31). Mit diesem Grundwasserspiegelgefälle, der Einheitsfläche $F^* = 1 \text{ m}^2$ und den Durchlässigkeitsbeiwerten aus Tab. 8 lassen sich die folgenden natürlichen Grundwasservolumenströme ermitteln.

Die von den Seiten auf KBR2 zuströmende unterirdische Abflußrate beträgt $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Wird der integrative Gebietswert aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode von $T_{ij2-K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ verwendet, so liegt die unterirdische Ablußerate bei $1,3-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$. In der Muldenzone findet ein Grundwasserabfluß von $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ statt. Der Vergleich dieser Werte zeigt, daß in Richtung der Längserstreckung der Muldenzone (Teil der Hauptmulde *Koerich-Simmern-Ditzebiert*) mindestens das 4-fache Grundwasservolumen umgesetzt wird, als in dem betrachteten Gebiet von den Seiten her zuströmt. Hieran wird die Bedeutung der Muldenzonen für die regionale Grundwasserströmung deutlich.

Ein plausibler Vergleich dieser Größen mit den aus diesem Bereich stammenden Tracer-versuchsergebnissen von v.HOYER (1971a, S.22) ist unter folgenden Annahmen möglich.

Der Beobachtungs- und der Eingabebrunnen stehen über ein gut durchlässiges Kluftsystem in direkter Verbindung. Die Förderung von ca. $40 \text{ m}^3/\text{h}$ aus dem Beobachtungsbrunnen hat im Kluftsystem zu einer so starken Strömung geführt, daß die gemessene Fließgeschwindigkeit von $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{sec}$ dem Durchlässigkeitsbeiwert dieses Kluftsystems sehr nahe kommt. Die sich unter diesem Ansatz ergebenden Größen $v_{f-\text{Tracer}} \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\text{sec}$; $k_{f-\text{Tracer}} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{sec}$; $T_{\text{Tracer}} \approx 0,13 \text{ m}^2/\text{sec}$ lassen sich ohne weiteres mit denen der Kluftzone vergleichen.

4.2.2 Zeiten der Grundwasserneubildung

Aus der Kombination von Niederschlagsdaten der Station Koerich mit Grundwasserspiegelganglinien und mit Aufzeichnungen der Eischwasserstände (siehe Abb.29) lassen sich Aussagen über Zeiten und Bedingungen, zu denen im Großraum Koerich eine Grundwasserneubildung stattfindet, ableiten.

- Während der Abflußspitzen der Eisch im Januar und Februar 1990 zeigen die Ganglinien der Grundwassermessstellen im Eischtal nur geringe Anstiege. In KBR3 und KBR4 sind keine Grundwasserspiegelvariationen zu erkennen. Diese Eischhochwässer haben, wie bereits ausgeführt, keinen wesentlichen Einfluß auf den Grundwasserspiegel dieses Gebietes und somit auch keinen direkt erkennbaren Anteil am Grundwasserhaushalt.
- Die Regenperiode im Dezember und Januar 1990/91 läßt sich mit einem deutlichen Anstieg der Standrohrspiegelhöhen aller Grundwassermessstellen korrelieren. Die Wasserstände der Eisch bleiben von diesen Niederschlägen unverändert.
- Die Niederschläge der Vegetationsperiode erzeugen keine Veränderungen im Abflußgeschehen.

Für die Grundwasserneubildung im Bereich des anstehenden Luxemburger Sandsteins im Gebiet von Koerich lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen.

- Die starken, von kurzzeitigen Niederschlagsereignissen stammenden Oberflächenabflüsse der vegetationslosen Jahreszeit führen nur zu geringen, lokal eng begrenzten Grundwasserzutritten in Form von Flußwasserinfiltration entlang des Eischlaufes.
- Treten Winterniederschläge mit mittlerer Niederschlagshöhe über einen längeren Zeitraum auf, wie im Dezember und Januar 1990/91, so sind die Bedingungen für eine ergiebige Grundwasserneubildung gegeben. Dies läßt sich aus dem langsamen und verzögerten Einsetzen der Grundwasserspiegelanstiegs in den Grundwassermessstellen in Koerich als Reaktion auf die Regenperiode ablesen (Abb.29). Das zeitlich verzögerte Einsetzen des Grundwasserspiegelanstiegs kann mit dem Auffüllen der Feldkapazität am Ende der Vegetationsperiode zusammenhängen.
- Aus den zur Verfügung stehenden Daten lassen sich für den Vegetationszeitraum keine Hinweise auf eine stattfindende Grundwasserneubildung erkennen.

Die dargelegten Phasen der Grundwasserneubildung haben einen wesentlichen Anteil an der Wiederauffüllung der Grundwasservorräte und sind bestimmender Faktor im nutzbaren Grundwasserdargebot.

Anmerkung: Im Gebiet zwischen Sauer und Schwarzer Ernz ermittelte v.HOYER (1971a) aus korrelierenden Niederschlägen und Quellschüttungen im Luxemburger Sandstein eine Verzögerung von ca. einem Jahr.

Für die Quellen im Gebiet von Koerich liegen solche Werte nicht vor. Die hydraulisch induzierte Erhöhung der Quellschüttung als Reaktion auf einen gestiegenen Grundwasserspiegel hängt in Koerich im wesentlichen von der Anbindung der Quelle an das drainierende Kluftsystem ab. Der Verzögerungszeitraum von ca. einem Jahr erscheint plausibel, da in diesem Wert bereits die Gebirgsdurchlässigkeit (Gesteins- und Kluftdurchlässigkeit) Eingang gefunden hat. Als Hinweis auf einen durch die Quellen erzeugten Transport von Grundwasser, einen Grundwasserumsatz und einen Grundwasseraustausch, wird auf die Ergebnisse der Isotopen - Untersuchungen (Kap.5) verwiesen. In Kap. 5 werden für den Aufenthalt der Quellwässer im Untergrund, d.h. für den Zeitraum zwischen Infiltration der Niederschlagswässer und ihrem Austritt an der Quelle, "Mittlere Verweilzeiten" von einigen Jahren bis zu einigen Jahrzehnten angegeben.

4.2.3 Pumpversuche in Koerich

In Koerich wurden zwei Pumpversuche durchgeführt, die - wie bereits in Kap. 1.3 und Kap. 4 zu Trois Ponts erläutert - die gesamte Neuanlage der SEBES inklusive der Meßsysteme nutzten und testeten. Bei beiden Pumpversuchen wurden Absenkung und Wiederanstieg des Grundwasserspiegels aufgezeichnet. Mit dem ersten Pumpversuch ist bei mäßiger Absenkung ein stationärer Strömungszustand erreicht und dokumentiert worden. Der folgende Pumpversuch überprüfte bei technisch maximaler Förderung die durch die Grundwasserentnahmen erreichte Beanspruchung des Grundwasserleiters. Bei diesen Versuchen wurden die Schüttungen der im engeren Untersuchungsgebiet liegenden Quellen durch Mitarbeiter der SES im Rahmen des Möglichen beobachtet.

Eine direkte Reaktion der Quellen auf die Grundwasserentnahmen aus den neuen Brunnen wurde nur in der Quellfassung Lauterbur bei einer Förderung aus den Brunnen im Eischtal beobachtet (s. Kap.4.2.1.2)

Eine genaue Erfassung der Quellschüttungen bzw. die Registrierung von sich ergebenden geringen Veränderungen in den Quellschüttungen ist mit großen Problemen verbunden. Die ge-

faßten größeren Quellaustritte liegen zumeist im Bereich von Quellhorizonten mit vielen diffusen kleinen Einzelaustritten im Übergangsbereich vom Luxemburger Sandstein in die liegenden tonig-mergeligen Psilonoten-Schichten (siehe Kap.3). Die Quellfassungen bestehen aus Quellbecken, deren Inhalt über Sammelleitungen im freien Gefälle, regional zusammengefaßt, der Pumpstation zufließt. Diese Systeme kommunizierender Röhren lassen keine eindeutige, ursächliche Zuordnung von Wasserspiegelschwankungen in den Quellbecken zu.

Beide Pumpversuche sind von Schwankungen in der Förderleistung, von Pumpen- und von Spannungsausfällen beeinflusst worden. Der PV II weist zudem einen Abfall in der Förderleistung auf (Abb.29). Der Einfluß der Niederschläge und des starken Niederschlagsereignisses (48,2 mm) am 29.10.90 auf die Absenkungskurven des PV II ist nicht von den Auswirkungen der Schwankungen in den Förderleistungen zu trennen.

Grundwasserspiegelvariationen durch Pumpversuch I und II in Koerich

Die Abb. 32 gibt eine schematisierte Vorstellung von dem Verlauf des Grundwasserspiegels zum Zeitpunkt des Ausgangsspiegels (28.8.90) und zu den maximalen Absenkungen am Ende der Pumpversuche (10.9. und 6.11.90). Der Profilschnitt entspricht denen in Abb. 30 und 31.

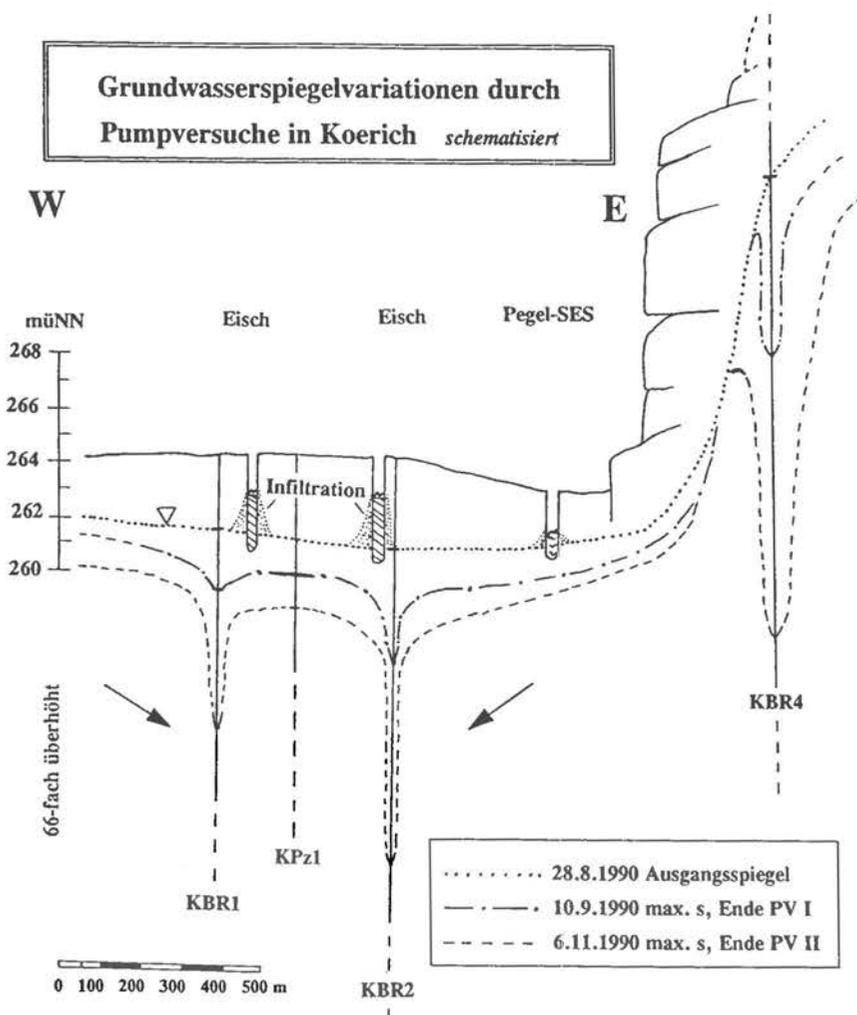


Abb. 32: Grundwasserspiegelvariationen durch Pumpversuche in Koerich

Im Eischtal entstehen zwei, teilweise sehr steile Absenkungstrichter (siehe Abb.32 und Tab.9). In KBR2 wird die größte Absenkung erreicht. Zwischen KBR1 und KBR2 stellt sich jeweils, dokumentiert durch KPz1, ein Absenkungsniveau ein. Die Absenkung in KPz1 ist das Ergebnis der gleichzeitigen Grundwasserentnahmen aus KBR1 und KBR2 (Superpositionsprinzip). Die Absenkungstrichter sind in ihrer Ausdehnung vom Eischverlauf losgelöst und lassen sich, wie in Trois Ponts, durch einen inneren steilen und einen äußeren flacheren Absenkungstrichter beschreiben. Die von den Seiten anströmenden Grundwässer, z.B. von KBR4, sind auf den äußeren Teil der Absenkungstrichter im Eischtal ausgerichtet. Auch bei der Situation maximaler Absenkung bleibt die Tendenz der Grundwasserströmung in Richtung auf KBR2 erhalten. Mit zunehmender Ausweitung der Absenkungstrichter werden die Infiltrationskegel entlang des Flußlaufes so weitläufig, daß für den Einflußbereich der Grundwasserentnahmen im Eischtal flächenhafte Grundwasserergänzungen angenommen werden können.

Daten zu Pumpversuchen in Koerich			
KBR1; KBR2	Q_r PVI	21,81 m ³ /h	Q_r PVII 44,22 m ³ /h
KBR3	Q_r PVI	33,61 m ³ /h	Q_r PVII 63,36 m ³ /h
KBR4	Q_r PVI	14,0 m ³ /h	Q_r PVII 27,9 m ³ /h
PV I	Pumpphase	312,92 h	Q_g PVII 28512 m ³
PV II	Pumpphase	506 h	Q_g PVII 90920 m ³
KBR1 → KPz2	ΔW_{PVI}	0,2 m	ΔW_{PVII} 1,79 m r 8,6 m
KBR2 → KPz3	ΔW_{PVI}	2,86 m	ΔW_{PVII} 9,4 m r 7,6 m
KBR1	max. s_{PVI}	2,3 m	max. s_{PVII} 7,24 m
KPz1	max. s_{PVI}	1,29 m	max. s_{PVII} 2,53 m
KBR2	max. s_{PVI}	4,21 m	max. s_{PVII} 11,76 m
KBR3	max. s_{PVI}	5,53 m	max. s_{PVII} 13,64 m
KBR4	max. s_{PVI}	6,52 m	max. s_{PVII} 16,99 m

Tab. 9: Daten zu den Pumpversuchen in Koerich

Eine gegenseitige Beeinflussung im Absenkungsverhalten der Brunnen ist vernachlässigbar.

Am Verlauf der Grundwasserspiegel im Einflußbereich von KBR4 wird die räumliche Begrenztheit des besser durchlässigen Teils des Aquifers deutlich. Die Form der Absenkungstrichter ist relativ steil. Die Grundwasserabsenkung um KBR4 bildet eine lokale Einsenkung im weiterhin mit relativ großem Gefälle auf den Grundwasserspiegel im Eischtal einfallenden Grundwasserspiegel. Daß diese Situation bei längerer maximaler Absenkung in KBR4 - bis einige Meter unterhalb des Eischtal-Niveaus - erhalten bleibt, ist nicht zu erwarten. Der in Abb. 32 eingezeichnete Verlauf der westlichen Absenkungstrichterbegrenzung (maximales s , Ende PV II) wird sich unter diesen Bedingungen wenige Meter oberhalb der maximalen Absenkung auf das Absenkungsniveau im Eischtal einstellen.

Für KBR3 können ähnliche Bedingungen im Bezug auf die räumliche Begrenztheit des Aquifers am Talrand von Koerbach und Eisch angesetzt werden. Durch die Position von KBR3

in der Muldenachse der Hauptmulde *Koerich-Simmern-Ditzeberg* ist ein "räumlich begrenztes" Absenkungs- und Wiederanstiegsverhalten vorgezeichnet.

Annahmen zur Pumpversuchsauswertung

Die der Auswertung von Pumpversuchen zugrunde liegenden mathematischen Ansätze fordern die Erfüllung bestimmter hydraulischer und hydrogeologischer Rahmenbedingungen (siehe "Annahmen" bei KRUSEMAN & de RIDDER, 1973). Die in Kap. 4.4 dargestellten besonderen hydrologischen, hydrogeologischen und hydraulischen Bedingungen am Standort Koerich widersprechen der Anwendung der gängigen Auswerteverfahren. Die sog. Anreicherungsverfahren nach DIETZ (1943), STALLMANN (FERRIS et al. 1962) und das Bildverfahren von HANTUSH (1959) sind nicht anwendbar, da die Grundwasseranreicherung durch die Eisch einen flächenhaften Einfluß ausübt (sie durchdringt nicht den gesamten Grundwasserleiter) und weil sich die Absenkungstrichter unterhalb der Anreicherungszone hindurch fortsetzen, d.h. es entsteht keine sog. "Nullabsenkungslinie". Die oben dargestellte Einschätzung der Infiltration von Eischwässern und ihrer Beeinflussung des Absenkungs- und Wiederanstiegsvorganges führt zu einem "Leakage-Ansatz". Hierbei ist die Infiltrationsrate so gering und die Auswirkung auf den Absenkungsbereich so flächig, daß diese Beeinflussung auch das Produkt einer geringer durchlässigen Deckschicht sein könnte (Leakage-Effekte). Dieser Ansatz entspricht einem System mit halb-ungespannten bis halb-gespannten Strömungsbedingungen und bietet die Möglichkeit der Berücksichtigung von Grundwasserzutritten bei der Auswertung der Pumpversuche.

Die vier Diagramme der Absenkungs- und Wiederanstiegsphasen von PV I und PV II (Abb.33 und 34) zeigen unterschiedlichste Typen von Absenkungs- und Wiederanstiegskurvenverläufen. In diesen Kurventypen spiegeln sich die unterschiedlichen Brunnenpositionen mit den unterschiedlichen Rahmenbedingungen (s.o.) und den verschiedenen erzeugten Belastungszuständen des Aquifers wider. In den Brunnen treten z.T., je nach Ausschöpfung der jeweiligen Brunnenkapazität, verschiedene Kurventypen auf (siehe z.B. Wiederanstiegskurven von KBR4).

Den größten Einfluß auf den Verlauf der Absenkungs- und Wiederanstiegskurven haben im Festgestein die Strömungsbahnen, das sind die Klüfte, auf bzw. in denen der Großteil der Grundwasserströmung erfolgt. Überträgt man in diesem Zusammenhang die von STOBER (1984, 1986) dargelegten Beziehungen, die Phasengliederung der Absenkungskurven von GRINGARTEN et al. (1979) und die den Verfahren von BOULTON (1963, 1964) zugrunde liegenden Vorstellungen über den Vorgang der Anströmung mit dem dargestellten unterirdischen Abflußsystem, so lassen sich folgende Einflüsse auf den (Absenkungs- und Wiederanstiegs-) Kurvenverlauf feststellen:

- Die beiden auftretenden Kluftsysteme besitzen unterschiedliche Durchlässigkeiten, wobei der Hauptklufttrichtung größere Durchlässigkeiten zugeschrieben werden.
- Je nach Öffnungsweite und Verfüllung der Klüfte im Bereich der Aufflockerungszonen durch mehr sandige oder stärker tonig-mergelige (Residual-) Sedimente treten z.T. große zonale Unterschiede in den Kluftdurchlässigkeiten auf (s.o. Querklüftung). In diesem Zusammenhang muß auch der Einfluß des sukzessiven, nicht einheitlichen Überganges des Sandsteines in die mergelige basale Schichtfolge gestellt werden. Diese Einflüsse erzeugen eine Dreigliederung oder Dreiphasigkeit im Verlauf der Absenkungs- und Wiederanstiegskurven.
 - 1) In den ersten Minuten wird das Großkluftsystem mit den besonders gut leitenden Klüften genutzt, d.h. in ihnen findet die direkte (spontane) Entspannung bzw. Wiederauffüllung statt.
 - 2) Die mittlere Phase des Absenkungs- bzw. Wiederanstiegsgeschehens ist im wesentlichen von der Grundwasserströmung in den Hauptklüftungssystemen geprägt. Hierbei haben die verfüllten, die nur wenig (normal) geöffneten Klüfte und die Kleinklüftungssysteme maßgeblichen Anteil. Anteile einer Entleerung des Porenraumes bzw. einer Porendurchlässigkeit sind aus

den Kurven vom Standort Koerich nicht erkennbar, aber einzukalkulieren. Diese Absenkungs- und Wiederanstiegs- Kurvenabschnitte verlaufen zumeist relativ geradlinig und monoton steigend, so daß sie mit Hilfe von (Regressions-) Geraden, Tangenten und Asymptoten genügend genau erfaßt und berechnet werden können. Sie werden als charakteristische Wiedergabe der hydraulischen Eigenschaften der erschlossenen Schichtfolge angesehen.

3) In der letzten Phase dieser Absenkungs- und Restabsenkungsbeobachtungen hat sich ein Gleichgewicht zwischen allen am Fließgeschehen beteiligten Komponenten eingestellt, das in den Zustand der quasi stationären Strömung oder in den Strömungszustand des Ruhezustandes überleitet.

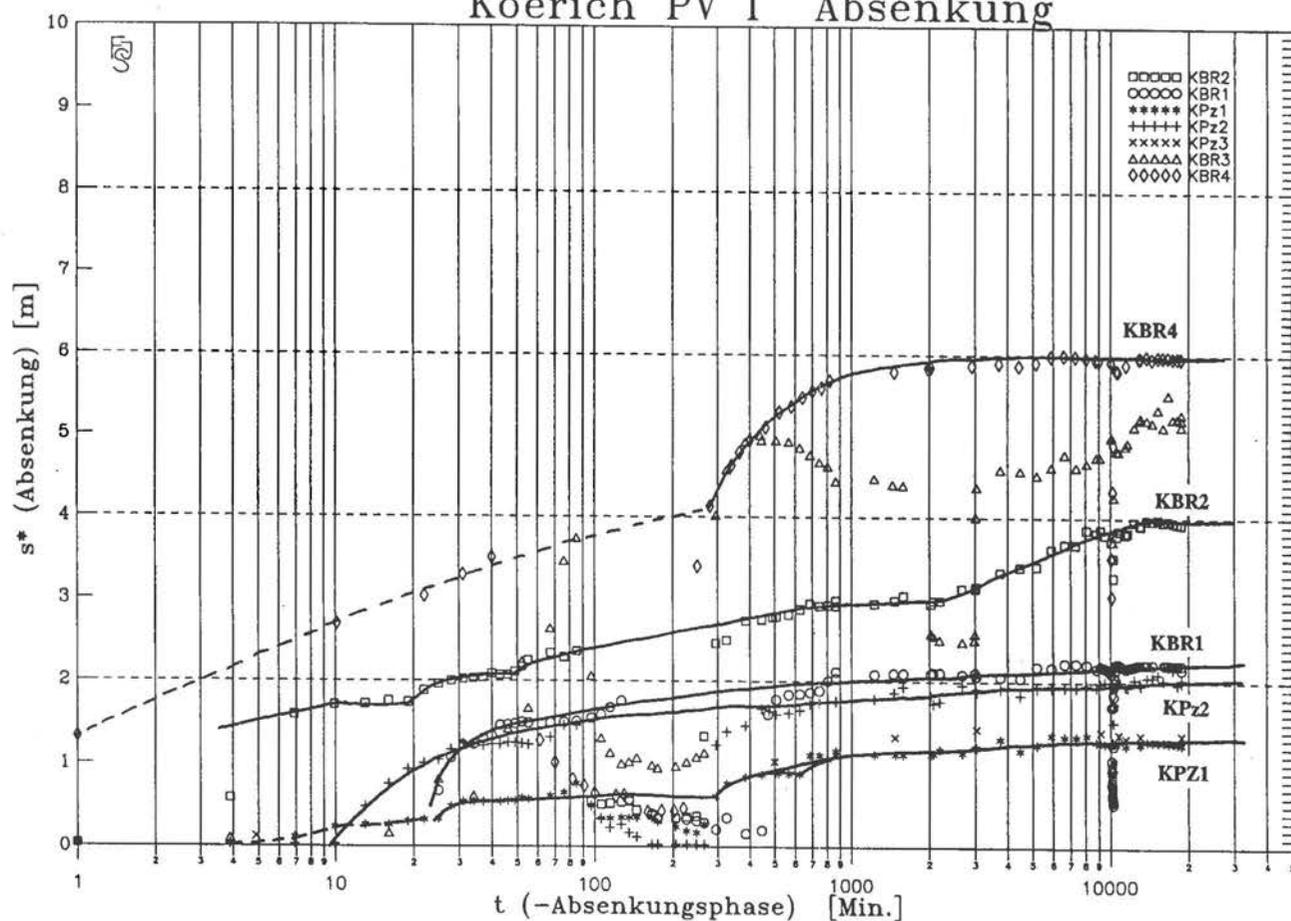
- Aus der Position der Brunnen und Piezometer wird mit zunehmender Absenkung der Einfluß einer räumlichen Begrenztheit der besser durchlässigen Bereiche des Grundwasserleiters durch sog. Knicke in den Absenkungs- und vor allem in den Restabsenkungskurven deutlich. Auf den Einfluß der stärker geneigten Grundwasserspiegel (geneigte Grundwasserleiter) wird bei der Pumpversuchsauswertung nicht eingegangen, da in den entsprechenden Bereichen keine Piezometer existieren und Messungen nur für die Brunnen selbst vorliegen. Bei diesen Brunnen (KBR3, KBR4) konnten Einflüsse von sog. brunnenspezifischen Effekten nicht ausgeschlossen werden.
- Bei den insgesamt saisonal ausgeglichenen Niederschlägen bestimmt die Evapotranspiration den Infiltrationsanteil. In vegetationslosen Zeiten können bei stärkeren Niederschlagsereignissen im Bereich der sandigen Substrate auf dem Luxemburger Sandstein größere Anteile des Niederschlagsdargebotes direkt dem Grundwasser zusickern und zu relativ kurzfristigen Grundwasserspiegelanstiegen führen. Während der Pumpversuche sind solche Einflüsse auf den beobachteten Grundwasserspiegel nicht von denen, die auf Entnahmeschwankungen zurückzuführen sind, zu unterscheiden.
- Die Strömungsbedingungen im Eischtal sind generell als effluent zu bezeichnen, da MNQ und NNQ durch den Zutritt von Grundwasser bestimmt werden (siehe Kap.4.2.1.2). Die Quellen im Eischtal sind ein Teil dieser Grundwasserübertritte. Die gleichzeitig stattfindenden latenten Infiltrationen entlang des Eischlaufes führen zu "leakage-ähnlichen", die Absenkungs- und Wiederanstiegs- Kurvenverläufe der Brunnen und Piezometer im Eischtal verflachenden Einflüsse.

Das unterschiedliche Zeit-/Absenkungs-/Abstands-Verhalten der Brunnen und Piezometer ist nicht mit den oben beschriebenen, maßgebenden oder/und beeinflussenden Bedingungen zu korrelieren. Durch das sinnvolle Anpassen einfacher Auswerteverfahren an charakteristische Absenkungs- und Wiederanstiegskurvenabschnitte dieser Brunnen und Piezometer (Abb.33, 34) wird versucht, möglichst plausible Aquiferkennwerte zu errechnen. Die gewichtete Mittelwertbildung führt schließlich zu realistischen Angaben.

Angewendete Auswerteverfahren

Die Mehrzahl der Meßwerte stammt aus den Meßeinrichtungen im Ringraum der Förderbrunnen oder von sehr nahe an den Brunnen gelegenen Grundwassermeßstellen. Dieser Umstand unterbindet die Anwendung der Verfahren nach THEIS, so daß für die Nutzung der THEIS'schen Formel (4) das **Verfahren von CHOW (1952)** verwendet wurde. Die Lösung des "Tangentenproblems" wurde hierbei graphisch angegangen. Im Bereich der charakteristischen mittleren Absenkungsphase wurden für jede Kurve mehrere Punkte berechnet. Da dieses und die anderen angewendeten Verfahren für gespannte Strömungsbedingungen abgeleitet wurden, muß der Einfluß der Schwerkraftentleerung im ungespannten System in die Berechnungen einfließen.

Koerich PV I Absenkung



Koerich PV II Absenkung

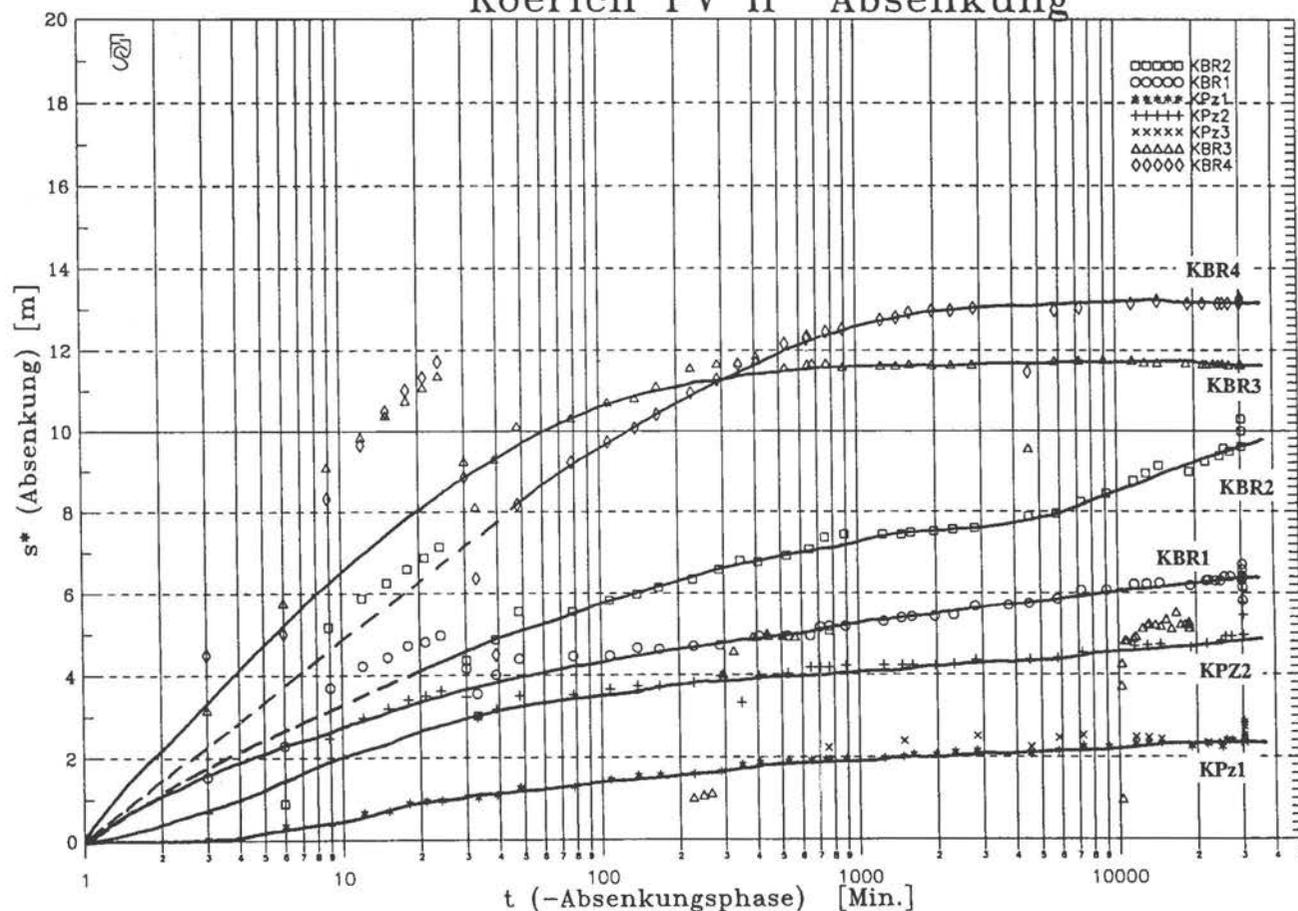


Abb. 33: Absenkungskurven zu den Pumpversuchen I und II in Koerich

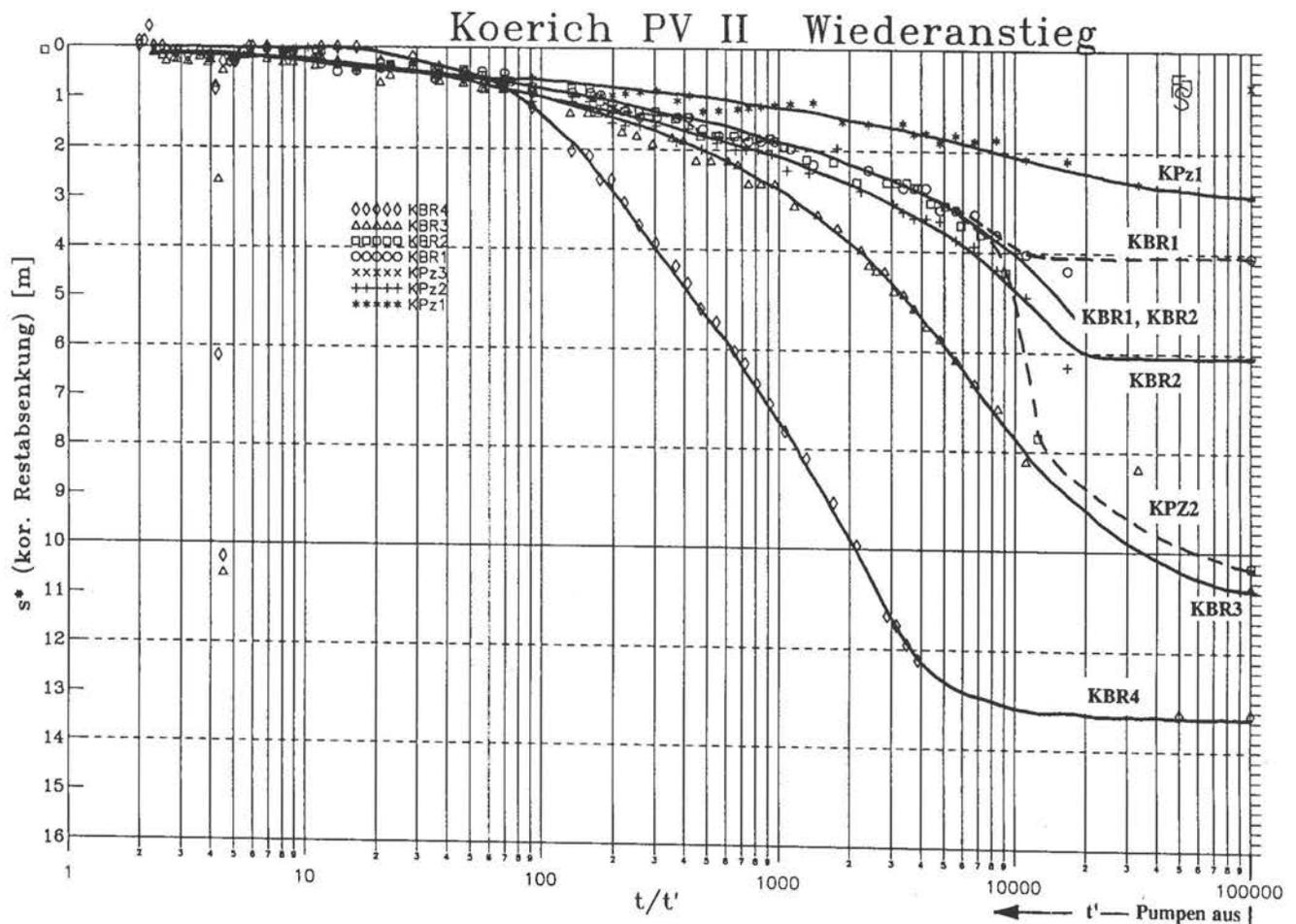
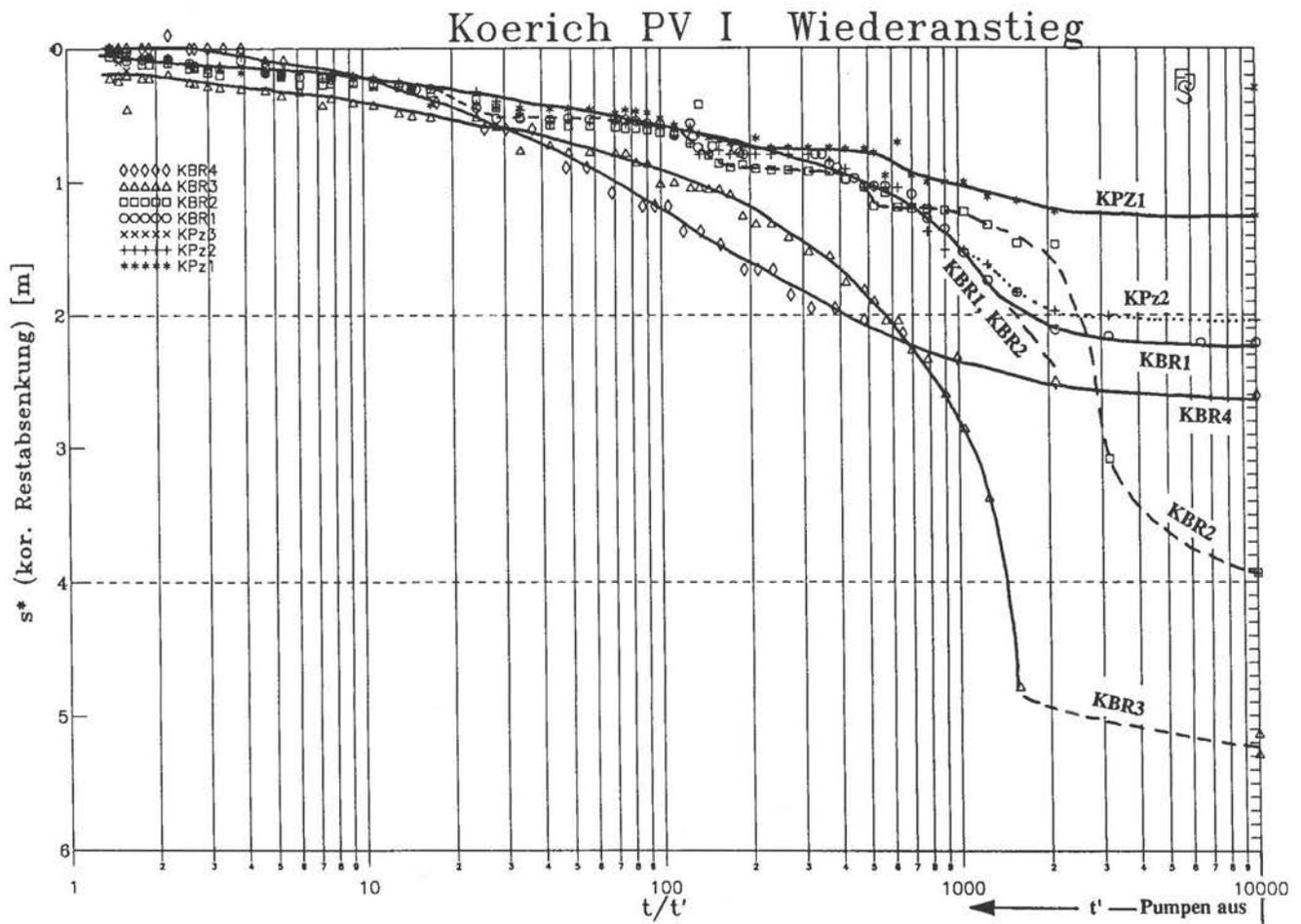


Abb. 34: Wiederanstiegskurven zu den Pumpversuchen I und II in Koerich

Dies geschieht mit folgender Korrektur der Absenkungs- bzw. Restabsenkungswerte nach THIEM-DUPOIT (THIEM 1906):

$$s^* = s - (s^2 / 2m_w) \quad \text{bzw.} \quad s^* = s' - (s'^2 / 2m_w) \quad (20)$$

Verlaufen diese Kurvenabschnitte geradlinig genug, wurde das **Verfahren I nach COOPER & JACOB (1946)** angewendet.

An vergleichbare Abschnitte der Wiederanstiegskurven wurden die Geraden des **Wiederanstiegsverfahrens nach THEIS (1935)** angepaßt.

Mit den Steigungen dieser Geraden wurde die **HANTUSH'sche Wendepunktmethode (HANTUSH 1964)** für die Brunnen und Piezometer im Eischtal durchgeführt.

An den Brunnen KBR3 und KBR4 führte der Versuch der Abschätzung der Transmissivitäten nach **LOGAN (1964)** zu nicht tolerierbaren Abweichungen.

4.2.3.1 Brunnen und Piezometer im Eischtal

KBR1 und KPz2 lassen sich nach ihrem Absenkungs- und Wiederanstiegsverhalten bei PV I und PV II zusammenfassen (Abb.33, 34). Die Transmissivitäten betragen $1,2 \cdot 10^{-3}$ und $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

In den Wiederanstiegskurven läßt sich diese Gruppe um KBR2 erweitern. Aus den Absenkungs- und Wiederanstiegskurven von KBR2 wird durch die größeren Absenkungsbeträge eine geringere Durchlässigkeit deutlich. In den letzten Phasen dieser Kurven tritt ein erneuter stärkerer Absenkungsvorgang auf. Ob dieser Knick auf eine räumliche Begrenztheit inmitten der Muldenposition oder auf den Anschluß eines geringer durchlässigen Teiles im Kluftsystem zurückzuführen ist, muß offen bleiben. Mit KBR2 fällt die geringste Transmissivität ($9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$) und die größte Absenkung im Eischtal (11,76 m) in eine Position, der im Ruhezustand eine besondere Durchlässigkeit im Sinne eines unterirdischen Grundwasserabstromes zugeschrieben wird. Daß dies kein Widerspruch ist, zeigt die Abb. 32.

Mit einem Abstand von 225 m und 214 m liegt KPz1 mitten zwischen KBR1 und KBR2. Trotz der geringen Entfernung zum Eischlauf (weniger als 50 m) und trotz der mehrmaligen Kreuzung der direkten Verbindung der Brunnen mit dem Eischlauf, treten in KPz1 deutliche Absenkungen des Grundwasserspiegels auf. Diese werden als Produkt der insgesamt geringen Grundwasserentnahmen aus beiden Brunnen angesehen (Superpositionsprinzip). Mit diesem Ansatz wird aus den sehr flachen Absenkungs- und Wiederanstiegskurven eine relativ große Transmissivität von $T = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ ermittelt. Dieser Wert fällt um den Betrag des Einflusses der Eischinfiltration zu groß aus.

Speicherkoeffizient

Die Absenkungs- und Wiederanstiegsbeobachtungen von KPz2 sind augenscheinlich von den entnahmebedingten Schwankungen des nächstgelegenen Brunnens so gering und von der Eisch so gleichmäßig beeinflusst, daß mittels der Tangenten des Verfahrens nach CHOW die Berechnung von Speicherkoeffizienten sinnvoll ist. Für KPz2 errechnet sich der Speicherkoeffizient zu $S_{li2(KPz2)} = 3,0 \cdot 10^{-3}$. Mangels besserer Daten wird dieser Wert für den Luxemburger Sandstein in Koerich festgesetzt.

Mit $m_w = 32 \text{ m}$ ergibt sich somit für den Luxemburger Sandstein in Koerich ein spezifischer Speicherkoeffizient von $S_{s(li2-K)} = 9,4 \cdot 10^{-5}$.

HANTUSH'sche Wendepunktmethode

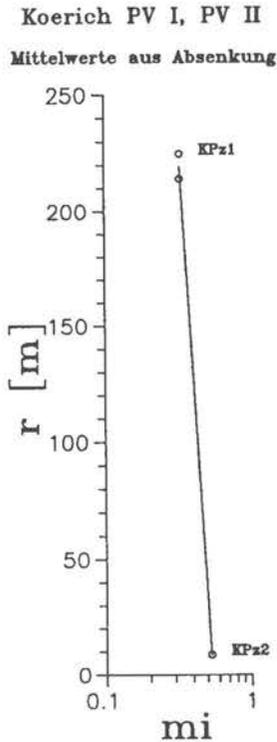


Abb. 35: Koerich, Pumpversuch I und II; Diagramm zu HANTUSH'scher Wendepunktmethode

Um den Einfluß der Infiltration der Eisch auf die Ermittlung der Aquiferkennwerte einzubeziehen, wurde mit Hilfe des "Leakage-Ansatzes" für die Absenkungsdaten von KPz1 und KPz2 die HANTUSH'sche Wendepunktmethode (HANTUSH 1964) eingesetzt (Abb.35). Für den Luxemburger Sandstein in Koerich wurde eine mittlere Transmissivität von $T_{li2-K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ ermittelt. Die Zuisickerung aus der Eisch entspricht bei diesem Ansatz einem Leckagefaktor von $B = 575 \text{ m}$.

4.2.3.2 KBR3

Die Pumpversuchsdaten aus KBR3 sind alle in der Meßeinrichtung im Ringraum des Brunnens aufgenommen worden. Die Absenkungsdaten von PV I lassen sich nicht auswerten. Die Absenkungskurven von PV II und die Wiederanstiegskurven von PV I entsprechen dem Kurventyp eines ungespannten Porenaquifers. Hier scheint eine homogen ausgebildete und ebenso durchlässige Klüftung wirksam zu sein. Erst in der Wiederanstiegskurve des PV II wird deutlich, daß in den relativ starken Kurvensteigungen der Einfluß einer räumlichen Begrenzung des Grundwasserleiters verborgen ist. Hier scheint sich die Position des KBR3 in der Muldenachse bemerkbar zu machen. Der Kurvenverlauf nimmt eine "S-Form" an, wobei der mittlere Kurvenabschnitt bereits ziemlich geradlinig verläuft. Die ermittelten Transmissivitäten liegen mit $T = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ deutlich unter denen im Eischtal.

4.2.3.3 KBR4

Der Einfluß von Aquifergrenzen auf das Absenkungs- und Wiederanstiegsverhalten wird an den Kurven des KBR4 besonders deutlich.

Der PV I erzeugt eine deutlich gekrümmte Absenkungskurve, die einem ungespannten porösen Grundwasserleiter entstammen könnte. Die entsprechende Wiederanstiegskurve zu PV I verläuft bereits "S-förmig", mit einem nahezu geraden, mäßig steilen, mittleren Abschnitt. Mit steigender Beanspruchung des Aquifers und zunehmender Absenkung wird der Einfluß der Aquifergrenzen deutlicher. So hat bei der Absenkungskurve des PV II die Kurvenkrümmung zu Gunsten eines geradlinigen Anfangsteils abgenommen. Die noch "S-förmige" Wiederanstiegskurve wird von einer ausgeprägten Geraden im Mittelteil beherrscht, für die mit $T = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$

eine maximale Transmissivität ermittelt wird. Der Mittelwert über alle Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren führt zu $T = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$.

In den Profilen der Abb. 30, 31 und 32 ist eine schematisierte Vorstellung von der räumlichen Begrenzung des Grundwasserleiters mit den entsprechenden Grundwasserspiegeln dargestellt.

4.2.3.4 Aquiferkennwerte für Koerich

Die Ergebnisse der für jede Grundwassermeßstelle einzeln durchgeführten Berechnungen mit den verschiedenen Verfahren streuen zum Teil beträchtlich.

Die unterschiedlichen Transmissivitäten der Grundwassermeßstellen können als Abbild des Zusammenspiels der durchlässigkeitserhöhenden Auswirkungen von Erosion, tektonischer Beanspruchung und strukturellem Bauplan angesehen werden. Im Kreuzungsbereich von Muldenzone und Erosionsform treten die größten Transmissivitäten auf, während mit zunehmender Entfernung die Durchlässigkeiten schnell abnehmen.

Aus Tab. 8 in Kap. 4.2.1.2 läßt sich die Größenordnung der Anisotropie aus den unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Haupt- und Querklüftungssysteme ablesen.

4.2.3.5 Abgeleitete geohydraulische Größen

Die Position der Brunnen und Piezometer im Eischtal erfordert eine weitere Aufschlüsselung des Eischeinflusses auf die Grundwasserströmung im Eischtal. Die Aufreihung dieser Brunnen und Piezometer in einer in Querkluft Richtung verlaufenden Kluftzone ermöglicht die Erfassung von klufttrichtungsspezifischen hydraulischen Größen.

Nutzbarer Hohlraumanteil, i_2 -Koerich

Wie bereits in Kap. 4.2.3.1 ausgeführt wurde, läßt sich aus den zur Verfügung stehenden Daten nur aus den Meßwerten von KPz2 ein Speicherkoeffizient von $3 \cdot 10^{-3}$ ermitteln. Die Bestimmung des nutzbaren Hohlraumanteiles führt unter den gegebenen Bedingungen zu folgenden Problemen.

- Die bei ungespannten Strömungsbedingungen in porösen, durchlässigen Lockergesteinen gültige Äquivalenz von Speicherkoeffizient und effektiver Porosität führt zu einem kleinen nutzbaren Hohlraumanteil von $\bar{n}_{\text{eff}} = 3 \cdot 10^{-3}$ bzw. 0,3%.

In Anbetracht der Festgesteinsbedingungen mit vernachlässigbarem Porenanteil und einer primär im Kluftsystem stattfindenden Absenkung erscheint dieser kleine Wert von 0,3% effektiver Porosität wiederum plausibel. Der Umstand, daß die Klüfte z.T. mit Verwitterungsmaterial verfüllt sind und auch versiegelt sein können, untermauert diese Einschätzung.

- Für den Übergangsbereich zwischen eindeutig freien und vollkommen gespannten Strömungszuständen wird der nutzbare Hohlraumanteil durch die Anwendung der Gleichung (11) mit $B_p = 0,01$ berechnet. Der geringe barometrische Koeffizient drückt das (noch) unelastische Verhalten des Grundwasserleiters aus, der durchaus unter teilgespannten bis gespannten Strömungsbedingungen stehen kann, ohne daß der direkte hydraulische Kontakt zum ungespannten Bereich abgebrochen ist. Mit $S_s = 9 \cdot 10^{-5}$ berechnet sich der nutzbare Hohlraumanteil zu $\bar{n}_{\text{eff}} = 0,19$ bzw. zu 19%.

Für den Standort Koerich zeigt die Ermittlung des nutzbaren Hohlraumanteils die Komplexiertheit der hydraulischen Auswirkungen, die sich aus dem Übergang des Kluftgrundwasserleiters in seine verschiedenen Verwitterungszustände ergeben. Die aufgetretene Spannweite an nutzbarem Hohlraumanteil, von wenigen Prozentteilen bis hin zu 19%, überdeckt den gesamten Rahmen natürlich auftretender effektiver Porositäten.

T [m ² /sec]	nach	CHOW (1952)	COOPER & JACOB Verf. I (1946)	Wiederanstieg THEIS (1935)	Mittelwert	
KBR3	PVII	A	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
		B	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$		
		C	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$		
KBR4	PVI	A	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
		B	$1,8 \cdot 10^{-4}$			
			$1,5 \cdot 10^{-4}$			
	PVII	A	$4,3 \cdot 10^{-4}$			
			$4,3 \cdot 10^{-4}$			
			$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	
	B	$1,5 \cdot 10^{-4}$				
		$2,2 \cdot 10^{-4}$				
		$2,3 \cdot 10^{-4}$				
	C	$4,0 \cdot 10^{-4}$				
		$4,0 \cdot 10^{-4}$				
KBR1	PVI	A	$1,5 \cdot 10^{-3}$		$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
			$1,5 \cdot 10^{-3}$		$1,9 \cdot 10^{-3}$	
			$7,9 \cdot 10^{-4}$			
	PVII	B	$5,0 \cdot 10^{-4}$			
		A	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$	
			$1,1 \cdot 10^{-3}$		$2,0 \cdot 10^{-3}$	
	B	$9,3 \cdot 10^{-4}$				
	C	$1,0 \cdot 10^{-3}$				
KPz2	PVI	A	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
			$1,5 \cdot 10^{-3}$		$1,9 \cdot 10^{-3}$	
			$6,8 \cdot 10^{-4}$			
	PVII	B	$2,4 \cdot 10^{-4}$			
		A	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$	
			$1,2 \cdot 10^{-3}$			
	B	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$		
	C	$8,4 \cdot 10^{-4}$				
KPz1	PVI	A	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
			$1,4 \cdot 10^{-3}$		$1,7 \cdot 10^{-3}$	
			$7,1 \cdot 10^{-4}$			
	PVII	B	$5,8 \cdot 10^{-4}$			
		A	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	
			$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$		
	B	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$			
KBR2	PVI	A		$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$
					$7,2 \cdot 10^{-4}$	
	PVII	A	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	
			$5,4 \cdot 10^{-4}$		$3,5 \cdot 10^{-4}$	
	B	$4 \cdot 10^{-4}$				
KPz3		berechnet mit DUPUIT-THIEM'scher Formel				
	PVI	$5,6 \cdot 10^{-3}$				
	PVII	$1,8 \cdot 10^{-3}$				

A, B, C: berechnete Stellen bzw. Punkte, in vergleichbaren Positionen auf Absenkungskurven

S	nach	CHOW (1952)	Mittelwert
KPz2 PVI	A	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
	B	$5,8 \cdot 10^{-3}$	
PVII		$5,1 \cdot 10^{-3}$	$S_{s(li2-K)}: 9,4 \cdot 10^{-5}$
	A	$1,7 \cdot 10^{-3}$	
	B	$2,9 \cdot 10^{-3}$	
	C	$3,3 \cdot 10^{-4}$	

A, B, C: berechnete Stellen bzw. Punkte, in vergleichbaren Positionen auf Absenkungskurven

Tab. 10: Aquiferkennwerte für den Standort Koerich

Stationäre Strömung während der Absenkungsphasen

Aus den Pumpversuchsdaten der Zeiträume, in denen quasistationäre Strömungsbedingungen geherrscht haben, lassen sich mit Hilfe der DUPUIT-THIEM'schen Gleichung für den freien Grundwasserspiegel (THIEM 1906)

$$Q = \frac{\pi k_f}{\ln(r_2/r_1)} \cdot (h_2 - h_1) \quad (21)$$

maximale Abenkungstrichter berechnen. Nach Umstellung dieser Gleichung können mit Gleichung (22) die maximalen Reichweiten der Pumpversuche ermittelt werden.

$$R = \exp \cdot r_1 \left\{ \frac{\pi k_f}{Q} (s_{r1}^2 - 1 \cdot 10^{-4}) \right\} \quad (22)$$

In Koerich sind diese Berechnungen mit Daten des quasistationären Strömungszustandes nur mit den Aufzeichnungen und hydrogeologischen Kennwerten der Brunnen und Piezometer im Eischtal (Kap.4.6.1) möglich.

Die Aufreihung von KBR1, KPz1 und KBR2 in Querkluftrichtung und ihre Position in einer entsprechenden Kluftzone führt zu folgendem Ansatz.

Da die Entfernungen der Brunnen KBR1 und KBR2 zu KPz1 etwa gleich groß sind und in beiden Brunnen immer die gleiche Grundwasserförderung bestand, wird die Absenkung in KPz1 zu gleichen Teilen den beiden Brunnen zugeschrieben. Bei den Berechnungen wurde die Einhaltung des jeweiligen Absenkungsbetrages in KPz1 als striktes Kriterium eingeführt. Durch iterative Veränderung der Transmissivität wurde bei konstanter Förderrate diese geforderte Übereinstimmung erreicht. Die erhaltenen Durchlässigkeiten sind somit richtungsgebunden und erlauben somit eine hydraulische Beschreibung von Klüften der Querkluftrichtung.

Mit den Daten der Tab. 9 und einem mittleren Grundwasserspiegelfälle im Eischtal von 0,1-0,15% errechnen sich folgende Werte.

	T_{QKR}^{PVI}	R	T_{QKR}^{PVII}	R
KBR1 → KPz1	$4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$	303 m	$1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$	258 m
KBR2 → KPz1	$1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$	239 m	$4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$	228 m
$T_{QKR} \text{ .li2-K}$	$4,5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$			
$k_{fQKR} \text{ .li2-K}$	$1,4 \cdot 10^{-4} - 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}/\text{sec}$			
$v_{fQKR} \text{ .li2-K}$	$1,4 \cdot 10^{-7} - 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}/\text{sec}$			

Tab. 11: Geohydraulische Kenngrößen für Klüfte der Querkluftrichtung im Luxemburger Sandstein in Koerich

Anteile von Eisch-Infiltrat

a) bei ungestörter Strömung im Eischtal

Die Infiltration der Eisch ist mit Hilfe des "Leakage-Ansatzes" durch die Anwendung der HANTUSH'schen Wendepunktmethode in Form des Leakagefaktors erfaßt worden. Die Quantifizierung der Infiltrationsrate ist über die Anwendung des DARCY'schen Gesetzes (16) möglich. Es werden bei diesen Berechnungen die folgenden Größen ersetzt:

$$k_f = (T_{li2-K} / B_{Eisch}^2), F = F^*, i = \Delta W_{Eisch} / m_{Eisch}$$

und die folgenden Werte eingesetzt:

$T_{li2-K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$, $B_{Eisch} = 575 \text{ m}$, $F^* = 1 \text{ m}^2$, $\Delta W_{Eisch} = 1 \text{ m}$, $m_{Eisch} = 1 \text{ m}$.
Die natürliche Infiltrationsrate der Eisch errechnet sich im Bereich von Koerich zu $Q_{Infil. Eisch} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Bei einem Fließweg der Eisch im betrachteten Talabschnitt von 1000 m, einer angenommenen Breite der Infiltrationszone von 100 m, der obigen Infiltrationsrate und einer Niedrigstwasserführung von $NNQ = 400 \text{ l/sec}$ berechnet sich der Infiltratanteil dieser Fläche zu 0,3% der Niedrigstwasserführung.

Für das von den Seiten auf KBR2 zuströmende Grundwasser lassen sich je nach Ansatz Volumenströme zwischen $1,3-1,9 \cdot 10^{-7}$ und maximal $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ermitteln (s. Kap.4.4.2). Aus diesen Werten ergeben sich Anteile an Eischinfiltrat von 0,6% bis zu 6,3-9,2%.

b) bei ausgebildeten Absenkungstrichtern im Eischtal

Eine Berechnung des Anteiles von Eischinfiltrat an den Grundwasserentnahmen ist an die Annahme geknüpft, daß die gesamten infiltrierenden Wässer aus der Eisch den Entnahmebrunnen über die Absenkungstrichter zufließen und durch die Entnahmen vollständig gefördert werden. Aus den Reichweiten der Tab. 11 und dem Abstand der beiden Brunnen von 431 m berechnet sich eine von der Eisch durch den Bereich der Absenkungstrichter durchflossene Strecke von 970 m. Die Breite der Infiltrationszone wird wiederum mit 100 m angesetzt. Die Berechnungen erfolgen wie unter Punkt a) beschrieben.

max. Anteile von Eisch-Infiltrat an Q_r von PV I und PV II in Koerich					
	$\Sigma Q_r(KBR1, KBR2)$	Infiltr. Eisch		$\Sigma Q_r(KBR1, KBR2)$	Infiltr. Eisch
PV I	44 m ³ /h	9,5%	≈ 35 l/h	PV II	88 m ³ /h 4,8% ≈ 36 l/h

Tab. 12: Maximaler Anteil von Eisch-Infiltrat an den Grundwasserentnahmen durch die Pumpversuche PV I und PV II in Koerich

5 Isotopen-Methoden

Die Verwendung von Isotopen in der Hydrologie beruht auf den Gegebenheiten, daß das Wasser von Natur aus durch bestimmte stabile und radioaktive Isotope, den sog. Umweltisotopen, gekennzeichnet ist. Diese Kennzeichnung beruht im wesentlichen auf den natürlichen Schwankungen durch Isotopenfraktionierungen und durch radioaktiven Zerfall. Zusätzlich ist durch Kernwaffentests in den 50-er Jahren eine weltweite künstliche Markierung des Wassers erfolgt.

Die isotopenhydrologischen Methoden bzw. Meßverfahren haben den großen Vorteil, daß sie Bestandteile des Wassermoleküls als Medium nutzen und somit der Vorstellung von einem "idealen Tracer" entsprechen bzw. sehr nahe kommen. So sind z.B. die Isotope des Sauerstoffs und des Wasserstoffs natürliche Bestandteile des Wassermoleküls und unterliegen in der Geosphäre im allgemeinen keinen spezifischen Wechselwirkungen mit der umgebenden Gesteinsmatrix.

Bei den Untersuchungen des Autors wurden die folgenden Isotope verwendet:

<u>stabile Isotope:</u>	Sauerstoff-18, ^{18}O
	Wasserstoff-2, ^2H, Deuterium
	Kohlenstoff-13, ^{13}C
<u>radioaktive Isotope:</u>	Wasserstoff-3, ^3H, Tritium
	Kohlenstoff-14, ^{14}C

Die Proben für die Isotopengehaltsbestimmungen wurden in Trois Ponts und Koerich während der Pumpversuche genommen. Diese Probennahmen wurden zeitlich so gestaffelt, daß sich möglicherweise direkt zu Beginn der Grundwasserentnahmen einstellende Veränderungen in der Wasserbeschaffenheit erfaßt werden konnten. Die Probenanzahl übersteigt die vorab veranschlagte Anzahl an Isotopengehaltsbestimmungen bei weitem. Somit konnte nach der Auswertung der chemischen Befunde eine erste Vorauswahl getroffen werden, damit die Probenqualität sichergestellt war und nur repräsentative Proben auf ihre Isotopengehalte untersucht wurden. Mit den Ergebnissen aus dem "1. Analysenschritt" wurde ein speziellerer "2. Analysenschritt" durchgeführt.

Die Ergebnisse aus dem "1. Analysenschritt" zeigen für Trois Ponts und Koerich nur sehr geringe Variationen, so daß die Überprüfung und Begleitung der Grundwasserentnahmen während des Betriebes der *solution de recharge* durch weitere Beprobungen sinnvoll erschien. Zudem wurde, zum direkten Vergleich und zum Erkennen von überregionalen Trends, die Anwendung von Isotopen-Methoden auf die Standorte Schaedhaff und Everlange ausgedehnt. Die Grundwasserentnahmen der *solution de recharge* wurden in Schaedhaff von Tritiumgehaltsbestimmungen und in Everlange von Bestimmungen der Gehalte an ^2H , ^{18}O und ^3H begleitet.

Mit der Beprobung der neu erstellten Bohrung Br.-Sidor in Leudelage (Abb.3, 4, 10) wird der Luxemburger Sandstein in einer Teufe von 200 m bis 280 m erfaßt. Die Erkundungsbohrung Rehbiert (siehe Anlage), ca. 3km südlich Trois Ponts, hat den Luxemburger Sandstein in einer Teufe von 210-300 m angetroffen. Diese 1972 abgeteufte Bohrung ist heute leider nicht mehr bis zum Druckwasserspiegel zugänglich. So müssen für einen Vergleich, mangels anderer tiefer Aufschlüsse des Luxemburger Sandsteines in der Umgebung von Trois Ponts, die Werte des Br.-Sidor herangezogen werden.

5.1 Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H)

Beide Isotope, ^{18}O und ^2H , sind natürliche Bestandteile des Wassermoleküls. Die Verhältnisse der schweren Isotope zu ihren "normalen" Nukliden liegen zwischen:

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \quad (1880 \text{ bis } 2010) \cdot 10^{-6}$$

$$^2\text{H}/^1\text{H} \quad (90 \text{ bis } 170) \cdot 10^{-6}.$$

Das heißt, daß sich in natürlichen Wässern unter 10^6 Wassermolekülen der Zusammensetzung $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ etwa 2000 Moleküle $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ mit dem schweren Sauerstoff ^{18}O und etwa 320 Moleküle $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$, bei denen eines der beiden ^1H -Wasserstoffatome durch das schwerere Wasserstoffisotop ^2H ersetzt ist (siehe z.B. MOSER & RAUERT 1980, FRITZ & FONTES 1986).

Änderungen dieser Verhältnisse folgen bestimmten Gesetzmäßigkeiten, die sich bei Phasenumwandlungen (Isotopenfraktionierungen) vollziehen, in ihrer Größenordnung im wesentlichen temperaturabhängig sind und somit maßgeblich im atmosphärischen Teil des Wasserkreislaufes stattfinden. Durch diese Isotopeneffekte werden die Niederschläge zeitlich und örtlich charakterisiert, was dann nach Eintritt in den ober- oder unterirdischen Wasserkreislauf als Markierung genutzt werden kann.

Die Angabe der Meßergebnisse erfolgt in der sog. δ -Notation, bei der die Abweichung des Probenmeßwertes von einem Standard, bei ^{18}O und ^2H dem V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water der IAEA, Wien) in ‰ angegeben wird.

Die Isotopenfraktionierung von Deuterium und Sauerstoff-18 in den Niederschlägen weist zumeist folgende Beziehung auf:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (23)$$

Die Darstellung der Meßergebnisse (vergl. Abb.37) erfolgt üblicherweise im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm. Die oben beschriebene Gleichung legt eine Gerade fest, die MWL (Meteoric Water Line), entlang derer sich die Isotopengehalte der entsprechenden Niederschläge aufreihen. Die aus Niederschlägen gebildeten Grundwässer folgen somit ebenfalls der MWL.

Variationen entlang der MWL und Abweichungen davon können auf Isotopeneffekte (Kontinentaleffekt, Breiteneffekt, Mengeneffekt, Höheneffekt, Jahreszeiteffekt) zurückgeführt werden oder können mit anderen (extremere) klimatischen (Niederschlags-) Bedingungen in Verbindung gebracht werden.

Ein in die Diagramme aufgenommenes Kreuz der Meßgenauigkeiten, 2σ (2-fache Standardabweichung der Meßfehler; entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 96%), läßt die Aussagekraft der dargestellten Daten ermessen. Zwei Meßwerte sind als zwei unterschiedliche, signifikante Werte aufzufassen, wenn ihr Unterschied größer 2 Sigma ist.

5.1.1 Meßwerte

Die Meßwerte der ^{18}O - und ^2H -Gehalte sind mit den entsprechenden Beprobungsstellen und Beprobungszeitpunkten in den Tabellen ISOTOPEN-Daten Luxemburg im Anhang aufgelistet.

Es lassen sich folgende Gruppierungen zusammenfassen:

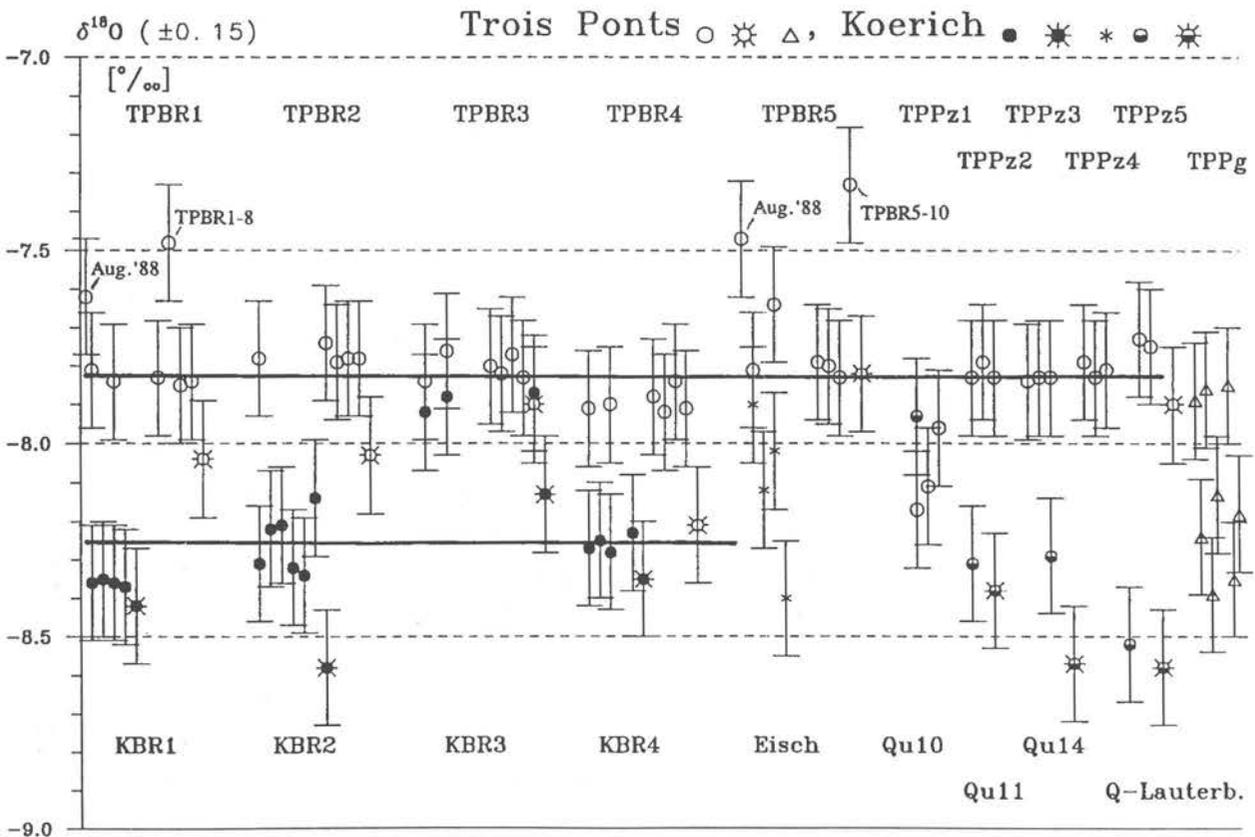
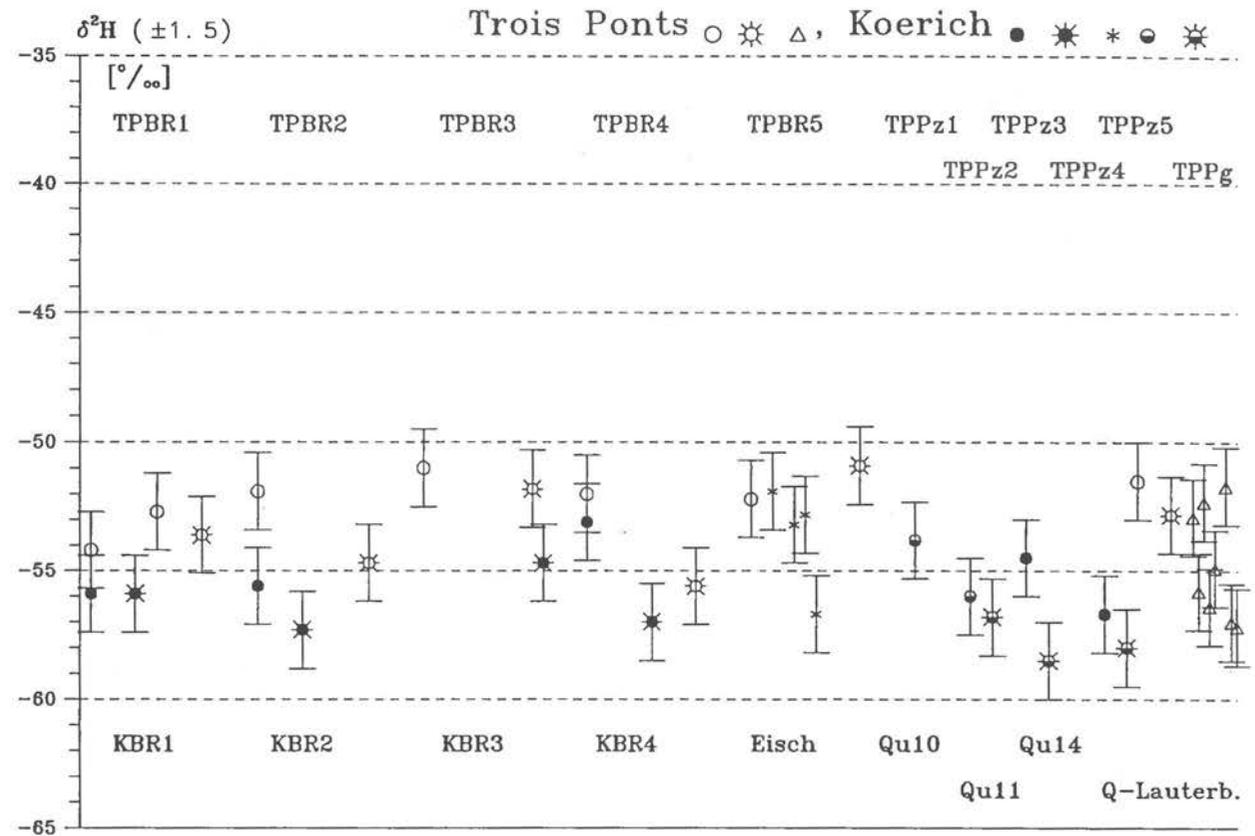


Abb. 36: ^2H - und ^{18}O -Gehalte der Grundwässer aus Koerich und Trois Ponts;
 $\delta^{18}\text{O}$ -Mittelwerte für beide Standorte. Anordnung der Meßwerte in zeitlicher Abfolge (von links nach
 rechts) für jede Probenahmestelle

	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]				$\delta^2\text{H}$ [‰]			
	Anz.	min.	max.	Mittelw.	Anz.	min.	max.	Mittelw.
Trois Ponts								
Brunnen	36	-8,21	-7,74	-7,81	11	-55,6	-50,9	-52,8
Piezometer	16	-8,17	-7,73	-7,86	2	-52,8	-51,5	-52,2
Pegel in den Deckschichten	5	-8,39	-7,86	*	5	-56,4	-52,3	*
Br.-Sidor	1	-9,45			1	-64,7		
Koerich								
Brunnen	21	-8,58	-7,88	-8,25	7	-57,3	-53,1	-55,6
Quellen	7	-8,58	-7,93	-8,37	7	-58,5	-53,8	-56,3
Eisch	4	-8,40	-7,90	-8,13	4	-56,1	-51,9	-53,7
Everlange								
Brunnen	10	-8,76	-8,29	-8,37	10	-61,1	-56,1	-58,3
Atttert	1	-8,19			1	-53,0		
Schamicht	1	-8,26			1	-56,0		

* keine Mittelwertbildung, da Meßstellen in verschiedenen Teufen verfiltert

Tab. 13: Gemittelte Meßwerte der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Isotopengehaltsbestimmungen an Grundwässern in Luxemburg

An den Standorten **Trois Ponts** und **Koerich** liegen die Meßwerte (aus den Beprobungen durch den Autor) zwischen den Extrema der Proben TPPz5-a ($\delta^{18}\text{O}$: $-7,73\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-51,5\text{‰}$) und K-Wykerslooth ($\delta^{18}\text{O}$: $-8,57\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-58,5\text{‰}$). Die Proben von August 1988 weisen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von $-7,62\text{‰}$ für TPBR1 und $-7,47\text{‰}$ für TPBR5 auf.

In **Everlange** wird der Wertebereich durch die Proben Atttert ($\delta^{18}\text{O}$: $-8,19\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-53,0\text{‰}$) und E15-1-3 ($\delta^{18}\text{O}$: $-8,61\text{‰}$; $\delta^2\text{H}$: $-42,6\text{‰}$) abgesteckt. Eine graphische Darstellung dieser Meßwerte ist in Abb. 42 gegeben.

Aus diesen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten werden im Kap. 5.5 Temperaturen der Niederschläge zur Zeit der Neubildung dieser Grundwässer errechnet. Anhand dieser Temperaturangaben und der weiter unten berechneten Mittleren Verweilzeiten wird eine Einordnung in die Gliederung des Quartärs und des Holozäns vorgenommen.

Die ^2H - und ^{18}O -Daten aus **Trois Ponts** und **Koerich** sind mit ihren Mittelwerten in Abb. 34 dargestellt. Dabei sind die Meßwerte für jede Probennahmestelle in der zeitlichen Abfolge der Probenahmen von links nach rechts aufgetragen.

Die dem Luxemburger Sandstein zuzuordnenden $\delta^{18}\text{O}$ -Meßwerte aus **Trois Ponts** streuen, ohne signifikante Unterschiede, um den Mittelwert: $-7,83\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$ (Abb.36 unten). Die im August 1988 bei den ersten Brunnentests, direkt nach der Erstellung der Brunnen, entnommenen Proben liegen in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten um $0,19\text{‰}$ (TPBR1) und um $0,34\text{‰}$ (TPBR5) geringfügig über den nachfolgenden Meßwerten. Für die signifikant weniger stark angereicherte Position der Proben TPBR1-8 und TPBR5-10 liegt keine Erklärung vor. Die ^{18}O -Gehalte der Grundwässer aus den Brunnen in **Koerich** streuen um den Mittelwert $-8,25\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$. Hierbei nehmen die ersten 3 Proben aus KBR3 mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten $< -8,0\text{‰}$ eine Sonderstellung ein.

Die ^2H -Gehalte der Proben aus Trois Ponts und Koerich liegen, ohne ortsbezogene Differenzierung, zwischen -50‰ und -60‰ $\delta^2\text{H}$ (Abb.36 oben).

Allen Probenserien ist die etwas abgereicherte, sich jedoch nicht signifikant unterscheidende Position der letzten, nach den Grundwasserentnahmen der *solution de recharge* entnommenen Proben gemein. Dieser sich hier andeutende Trend ist nicht auf systematische Fehler zurückzuführen, da vor diesem Hintergrund spezielle Kontrollmessungen und Mehrfachbestimmungen durchgeführt wurden. Somit werden diese geringen Veränderungen der Aktivierung des Grundwasserleiters zugeschrieben. Höheneffekte werden bei den geringen topographischen Unterschieden als unwirksam angesehen.

5.1.2 Auswertung / Interpretation

Trois Ponts und Koerich

In die Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramme der Abb.37 sind die $\delta^2\text{H}$ -, $\delta^{18}\text{O}$ -Meßergebnisse aus Trois Ponts, Koerich und Br.-Sidor den Isotopengehalten der Niederschläge der Station Trier für die Jahre 1978-89 gegenübergestellt. Ausgehend von dieser Gegenüberstellung sollen anhand der näheren Betrachtung des rezenten Inputs an stabilen Umweltisotopen (aktuelle Niederschläge) Aussagen zur besonderen Position der Proben aus Trois Ponts und Koerich zueinander und zu ihrer Lage oberhalb der MWL abgeleitet werden.

Für diese Untersuchungen wurden aus dem Meßstellennetz für Isotopengehaltsbestimmungen an Niederschlägen des Institutes für Hydrologie der GSF die Stationen Trier, Karlsruhe und Weil am Rhein ausgesucht, da sie dem Großraum des Arbeitsgebietes am nächsten liegen und mit der Station Trier übertragbare Verhältnisse gegeben sind. Die entsprechenden Meßreihen sind den Jahresberichten des Institutes für Hydrologie, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München entnommen.

Im oberen Diagramm der Abb. 37 liegen die Monatsmittelwerte der Niederschläge mit wenigen Ausnahmen unterhalb der MWL. Dabei sind relativ große Abweichungen einiger Monatsmittelwerte von den 12-jährigen Mittelwerten der Niederschläge der hydrologischen Winter- (Nov.-April) und Sommerhalbjahre (Mai-Okt.) erkennbar. Die enge Scharung der Meßwerte aus Trois Ponts und Koerich wird im unteren Diagramm der Abb. 37 weiter aufgelöst. Hierbei zeigt sich, daß nur 4 der 36 Proben unterhalb, nur einige auf und die Mehrzahl der Meßwerte oberhalb der MWL liegen.

Mit Hilfe der eingetragenen Meßgenauigkeiten lassen sich bereits hier, unter Beachtung der Probennahmepunkte, entlang der MWL signifikante Abweichungen zwischen den Isotopengehalten der Proben aus Koerich und jenen aus Trois Ponts erkennen. Dieser Punkt wird weiter unten im Zusammenhang mit Input-Daten und am Ende dieses Kapitels in Verbindung mit Tritiumgehalten wieder aufgenommen.

Die Werte der Proben aus den Deckschichten in Trois Ponts (Pegelgruppe) und aus der Eisch erstrecken sich nahezu über den gesamten Wertebereich.

Input: aktuelle Niederschläge

Die Gehalte an den stabilen Isotopen Deuterium und Sauerstoff-18 in den Niederschlägen der Meßstation Trier streuen über den großen Bereich von -2‰ bis -15‰ $\delta^{18}\text{O}$ und von -10‰ bis -110‰ $\delta^2\text{H}$. Im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm folgen die Monatsmittelwerte der Relation $\delta^2\text{H} = 7,9 \cdot \delta^{18}\text{O} + 5,7$, wobei nur wenige Meßwerte oberhalb der (Global) Meteoric

Water Line plotten. Als Hinweis auf unterschiedliche Verdunstungs- bzw. Kondensationsbedingungen der verschiedenen Niederschlagsverteilungen kann der **Deuteriumexzeß**

$$d = \delta^2\text{H} - (8 \cdot \delta^{18}\text{O}) \quad (24)$$

herangezogen werden. Für die Grundwasserproben aus Trois Ponts und Koerich wird $d=10$ angesetzt (MWL). Die Niederschläge aus Trier werden durch $d=5,7$ charakterisiert. Kleine Deuteriumexzeß-Werte ($d < 10$) zeigen intensive Feuchtigkeitsaustauschprozesse in den niederschlagsbringenden Luftmassen unter kühl-feuchten Bedingungen an (GAT 1980, LEGUY et al. 1983). Der geringfügig geringere Faktor von 7,9 in der Deuterium/Sauerstoff-18 -Relation der Niederschläge in Trier scheint einen Verdunstungseinfluß in den Niederschlägen der Sommermonate anzuzeigen, was unter Beachtung der Meßgenauigkeit nur als Mutmaßung angesehen werden darf. Der Frage, inwieweit die Isotopengehalte der Niederschläge von zeitlichen Veränderungen (Trends) beeinflusst sind, wird im folgenden nachgegangen.

Die große Streubreite der Niederschläge der Station Trier der Jahre 1978-1989 läßt sich, bei Zuordnung der Monatsmittelwerte zu hydrologischen Winter- (Okt.-April) bzw. Sommerhalbjahren (Mai- Sept.) in zwei Gruppen (W;S) teilen (siehe Abb.38 oben). Die Niederschläge der hydrologischen Sommermonate liegen zumeist oberhalb des 12-jährigen Mittelwertes (1987-89). Die der hydrologischen Wintermonate liegen bei größerer Streubreite z.T. weit unterhalb des Mittelwertes der hydrologischen Wintermonate. Diese deutlich stärkere Abreicherung an schweren Isotopen einiger Winterniederschläge wird durch die Bildung von hydrologischen Halbjahreswerten auf wenige Winterhalbjahre eingegrenzt (1978, '79, '81, '84; Abb.38 unten). Eine deutlich geringere Abreicherung an schweren Isotopen zeigen die Mittelwerte für die hydrologischen Sommerhalbjahre 1983, '88 und '89. Diese Hinweise auf Variationen in den Gehalten an stabilen Isotopen der Niederschläge bestätigen sich durch die Bildung von Jahresmittelwerten und deren Vergleich zu den 12-jährigen Mittelwerten (Abb.42). Es läßt sich in Abb. 42 aus der über den Jahreszeiteffekt hinausgehenden Verschiebung der Jahresmittelwerte (entlang der MWL) hin zu geringeren Isotopenfraktionierungen ein Trend in den Niederschlägen erkennen, der auf eine Erhöhung der Niederschlagstemperatur hindeutet.

Um diese Veränderungen, die den Jahreszeiteffekt überlagern, besser beschreiben zu können, werden im folgenden die ungewichteten Niederschlags-Isotopengehalte der Stationen Trier, Karlsruhe und Weil am Rhein mittels Zeitreihen untersucht. Eine Überprüfung des Mengeneffektes konnte nicht durchgeführt werden. Ein möglicher Einfluß wird bei der ausgeglichenen Niederschlagsverteilung und den dominanten, stark temperaturabhängigen Effekten als unbedeutend erachtet (MOSER & RAUERT 1980, YURTSEVER 1976). Es werden für die Jahre 1978-89 (jeweils getrennt für Deuterium und Sauerstoff-18) die hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahreswerte, die Jahresmittelwerte und zusätzlich deren 12-jährige Mittelwerte dargestellt. Aus dem Vergleich der entsprechenden Regressionsgeraden lassen sich dann die Einflüsse bzw. Veränderungen ausmachen, die den Trend bestimmen.

Niederschlag Trier: (Abb.39) Der Trend in den Jahresniederschlägen hin zu geringerer Isotopenfraktionierung wird in Trier durch den starken Anstieg der Regressionsgeraden der hydrologischen Winterhalbjahreswerte bestimmt. Die Sommerniederschläge zeigen eine geringere Abnahme der Isotopenfraktionierung. Besonders deutlich wird dies im $\delta^{18}\text{O}$ -Diagramm. Einen Eindruck von der großen Streubreite der Monatsmittelwerte vermittelt die Abb. 38 oben und Abb. 39.

Niederschlag Karlsruhe: (Abb.40) Die Regressionsgeraden der Karlsruher Niederschläge zeigen bei einem \pm parallelen Verlauf den gleichen positiven Trend wie in Trier. Hierbei liegen die Meßwerte aus Karlsruhe insgesamt etwa um 10 ‰ bzw. 1 ‰ in den $\delta^2\text{H}$ - bzw. $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalten niedriger als in Trier. In den Jahren 1984-86 sind große Schwankungen in den ^2H - und ^{18}O -Gehalten zu erkennen.

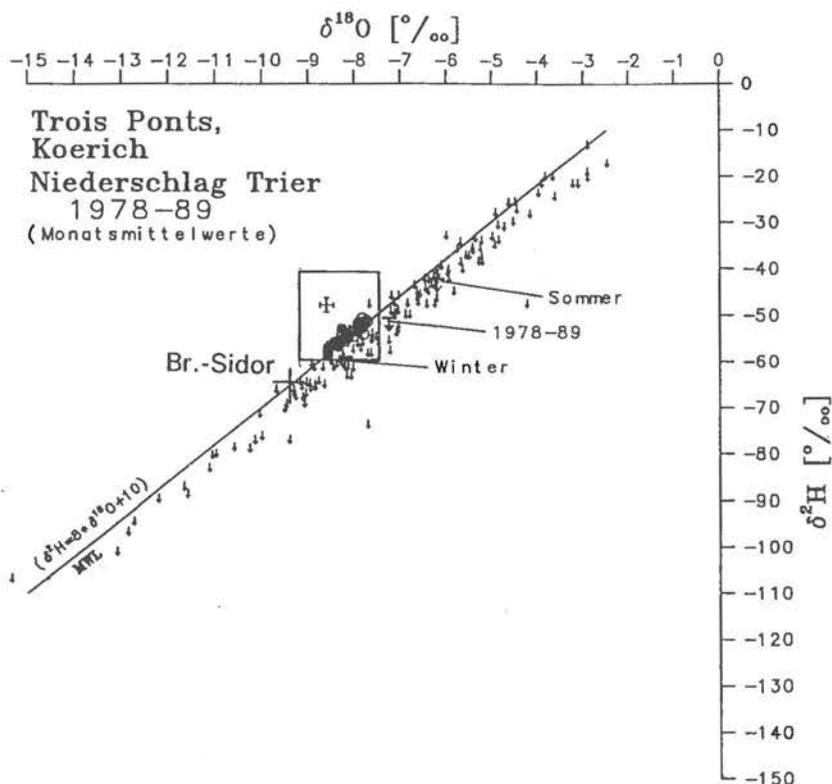
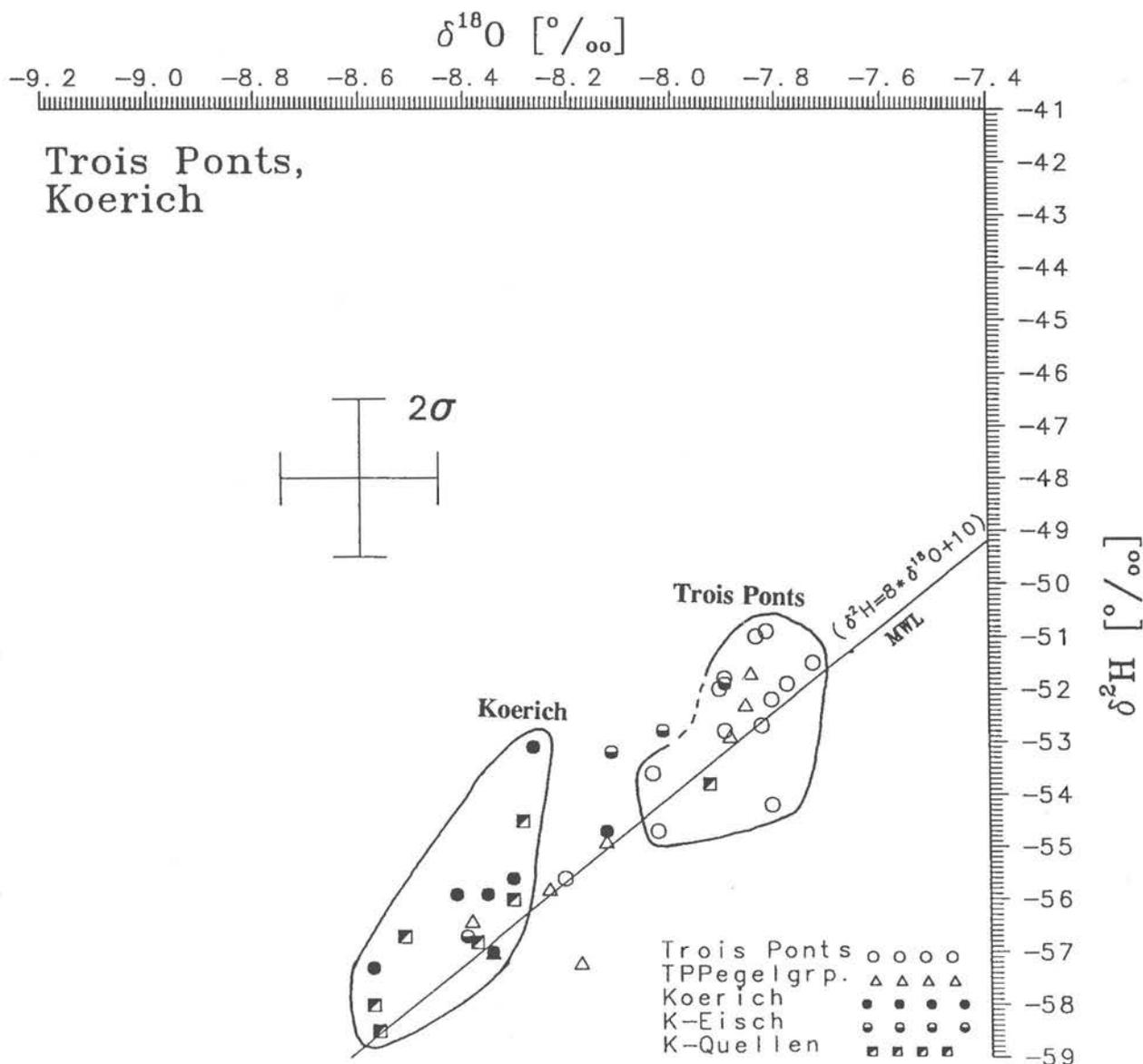


Abb. 37: $\delta^{18}O$ -/ δ^2H -Relation;
unten: für $\delta^{18}O$ -/ δ^2H -Gehalte der
Grundwässer aus Trois Ponts und
Koerich
oben: in Kombination mit $\delta^{18}O$ -/
 δ^2H -Gehalten in Niederschlägen
der Meßstation Trier



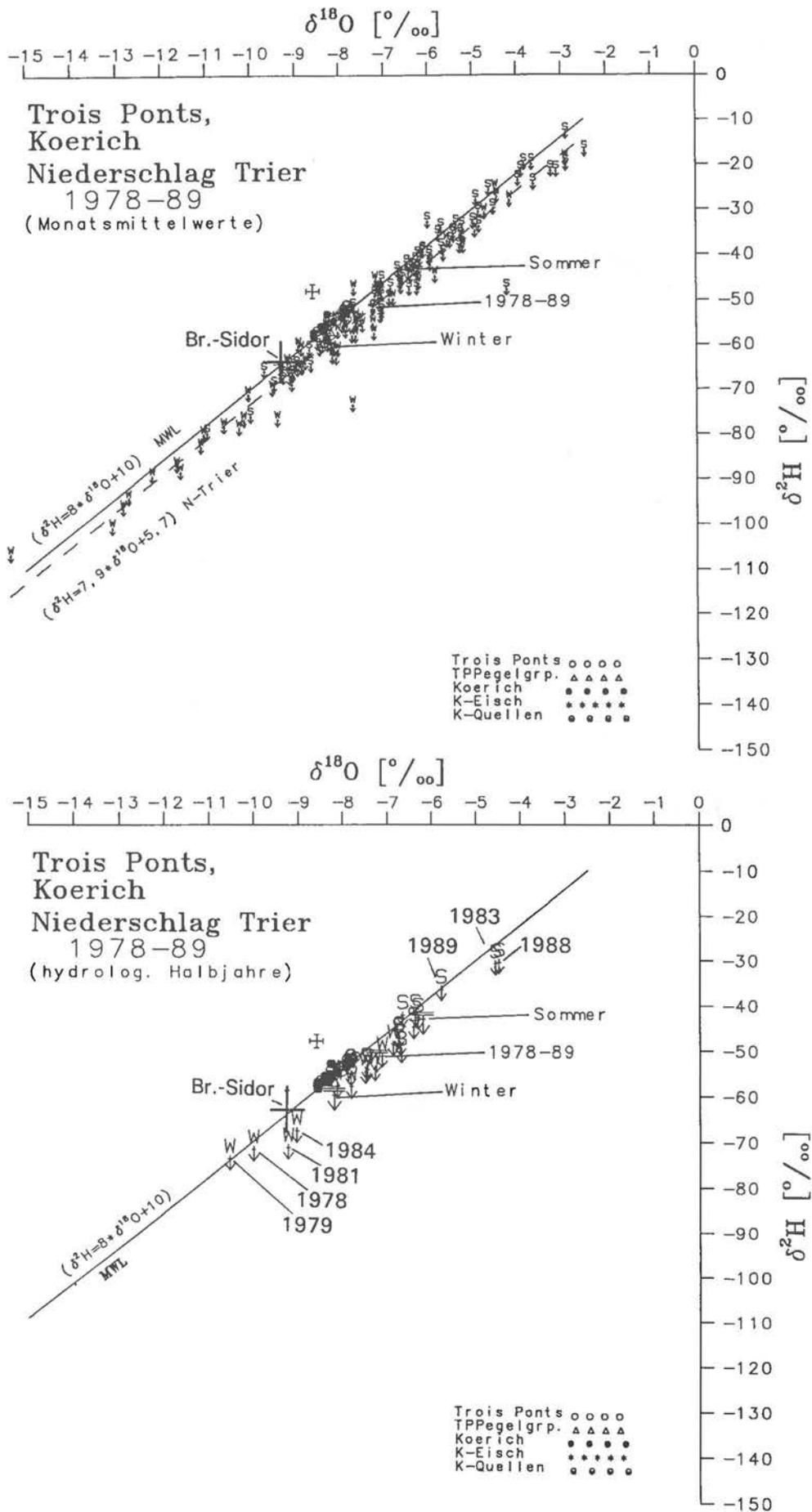


Abb. 38: $\delta^{18}\text{O}$ -/ $\delta^2\text{H}$ -Relation für Grundwässer aus Trois Ponts und Koerich in Kombination mit Niederschlagsgehalten in Trier; **oben**: Monatsmittelwerte, **unten**: Mittelwerte hydrolog. Halbjahre

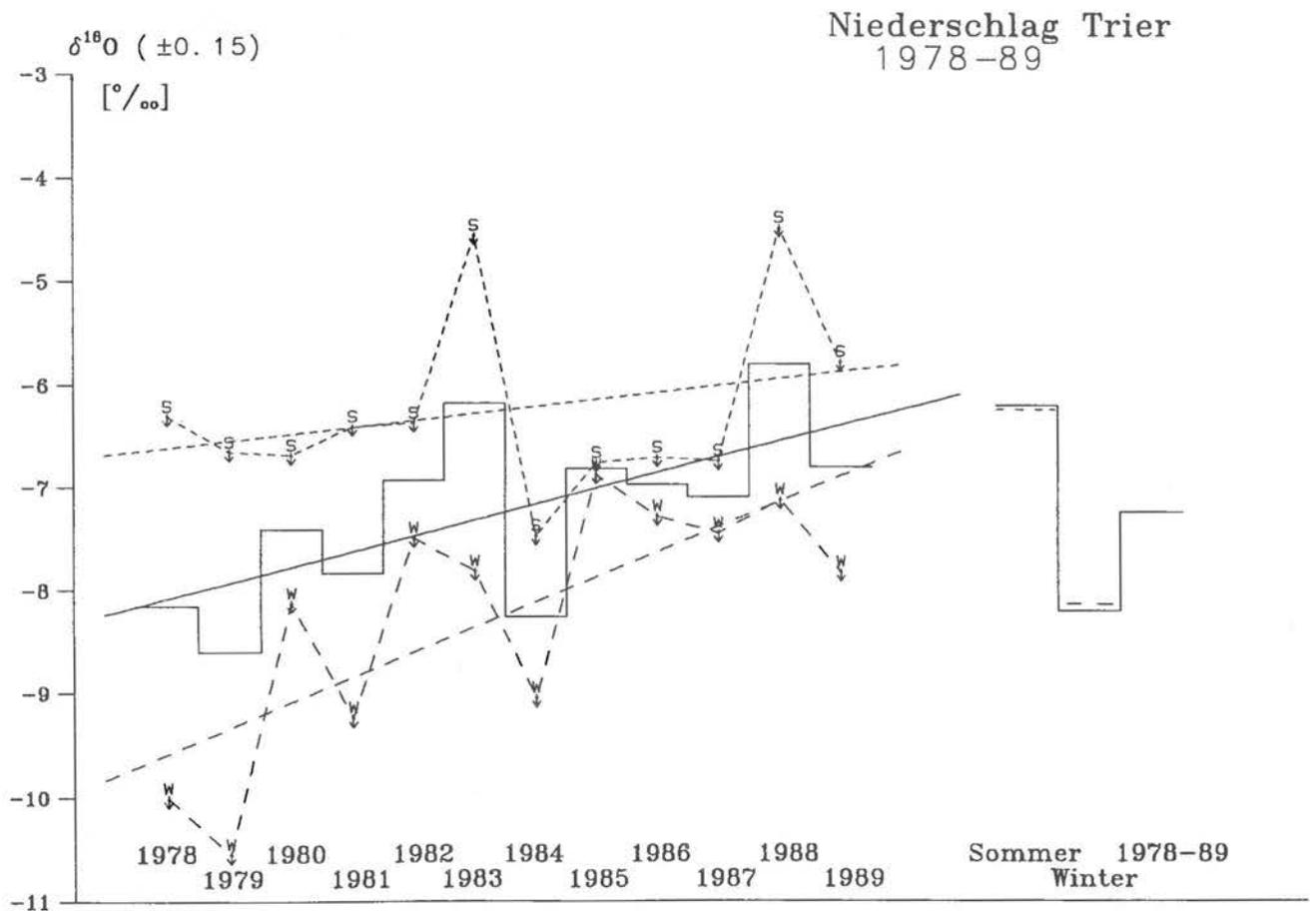
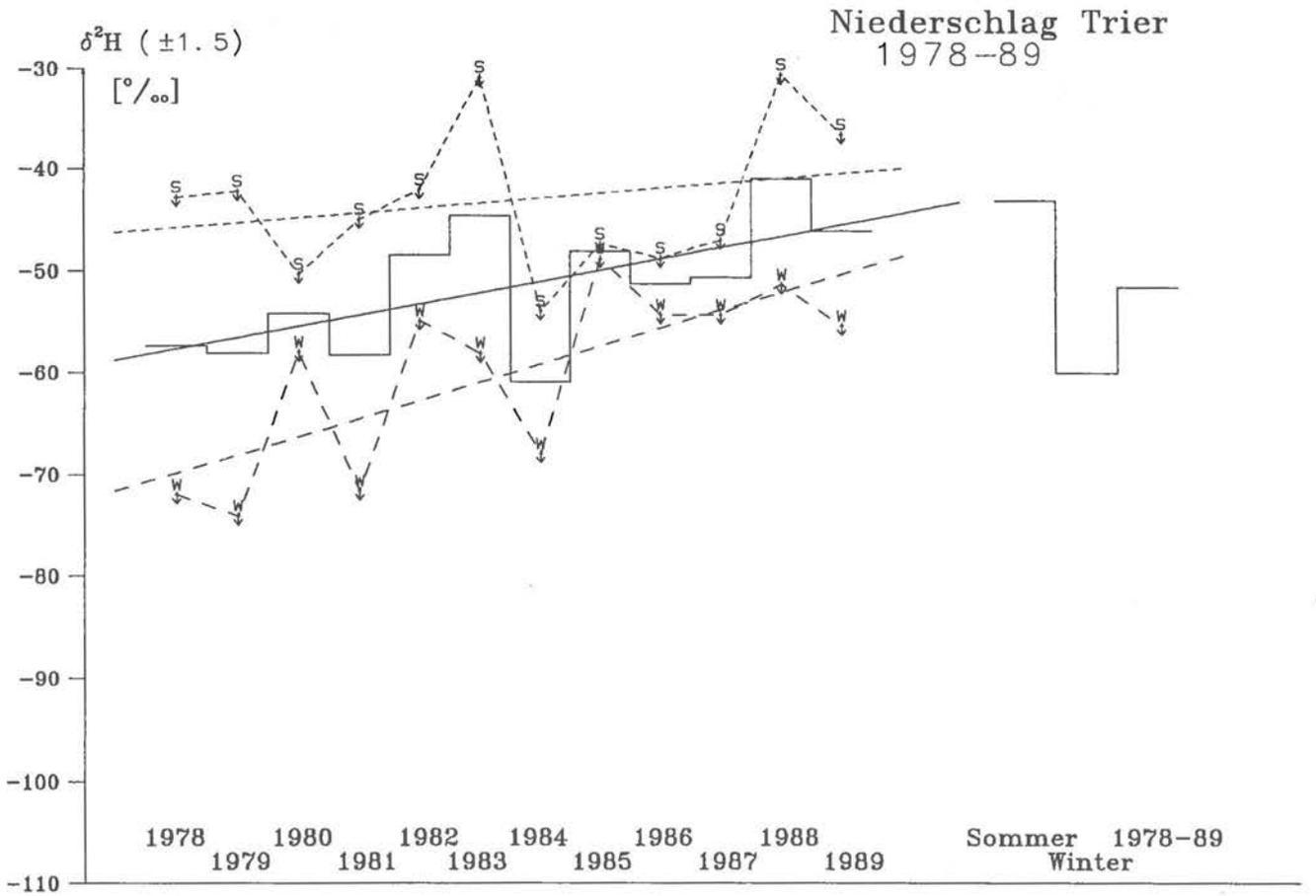


Abb. 39: $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ -Gehalte der Niederschläge Meßstation Trier

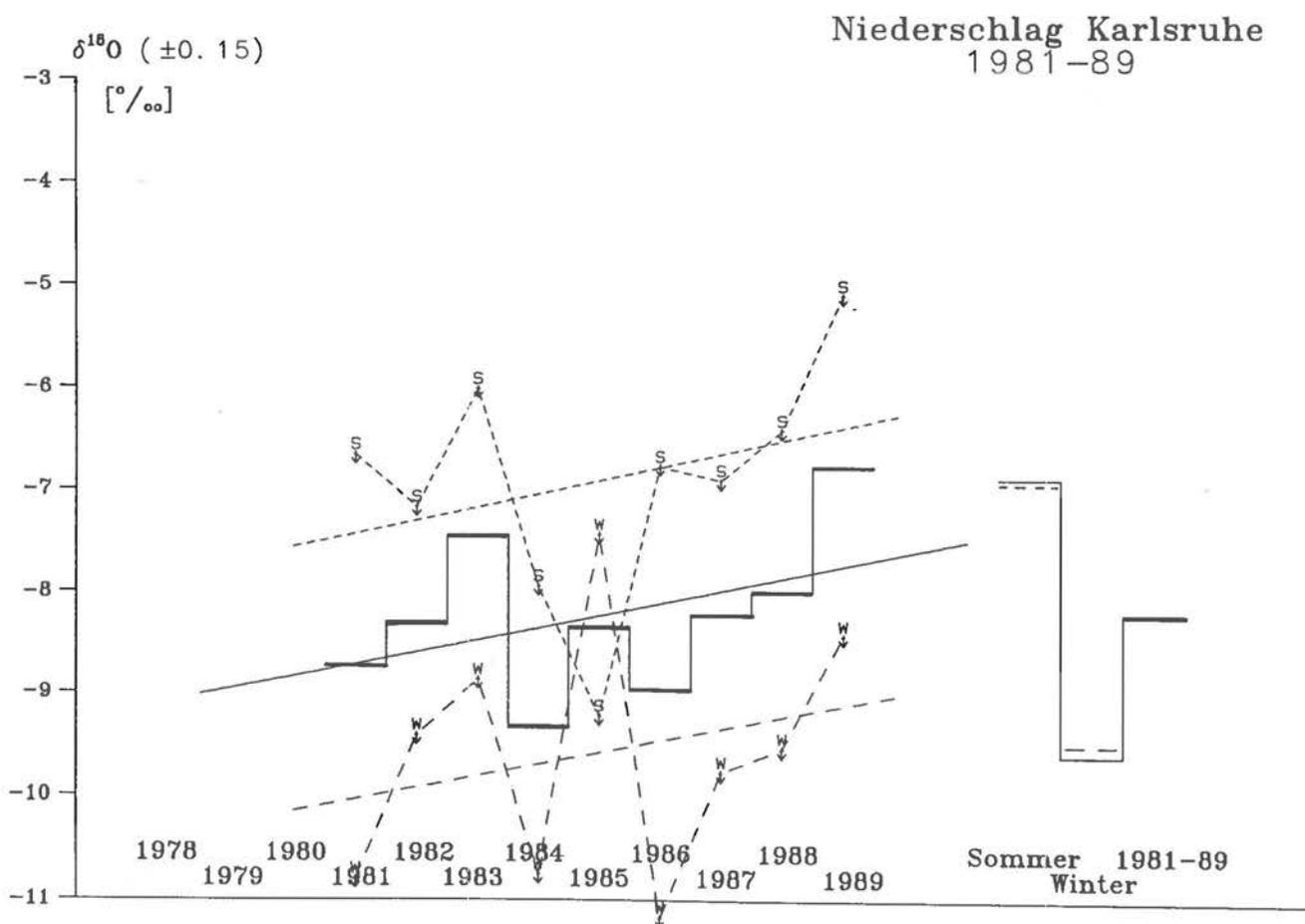
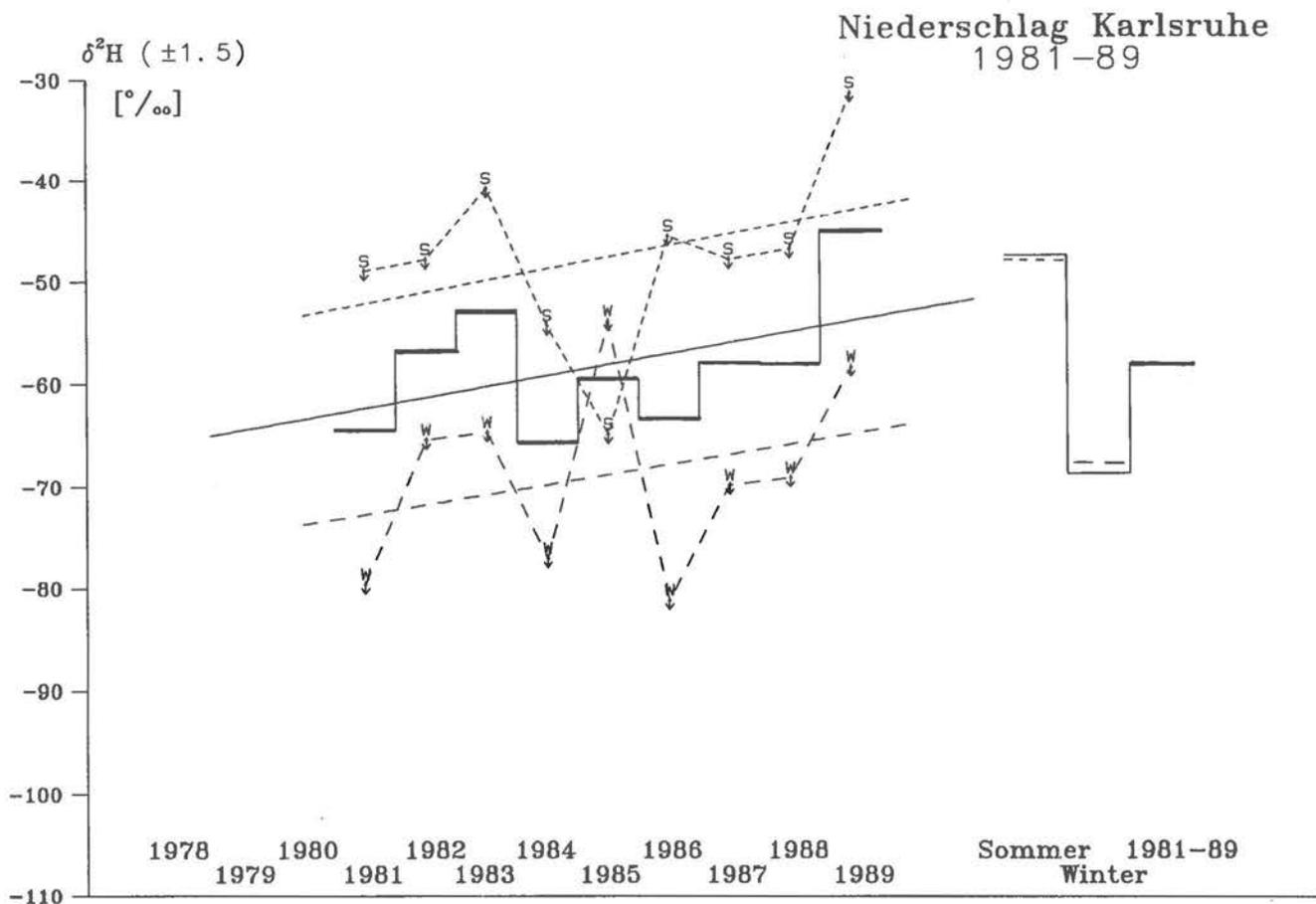
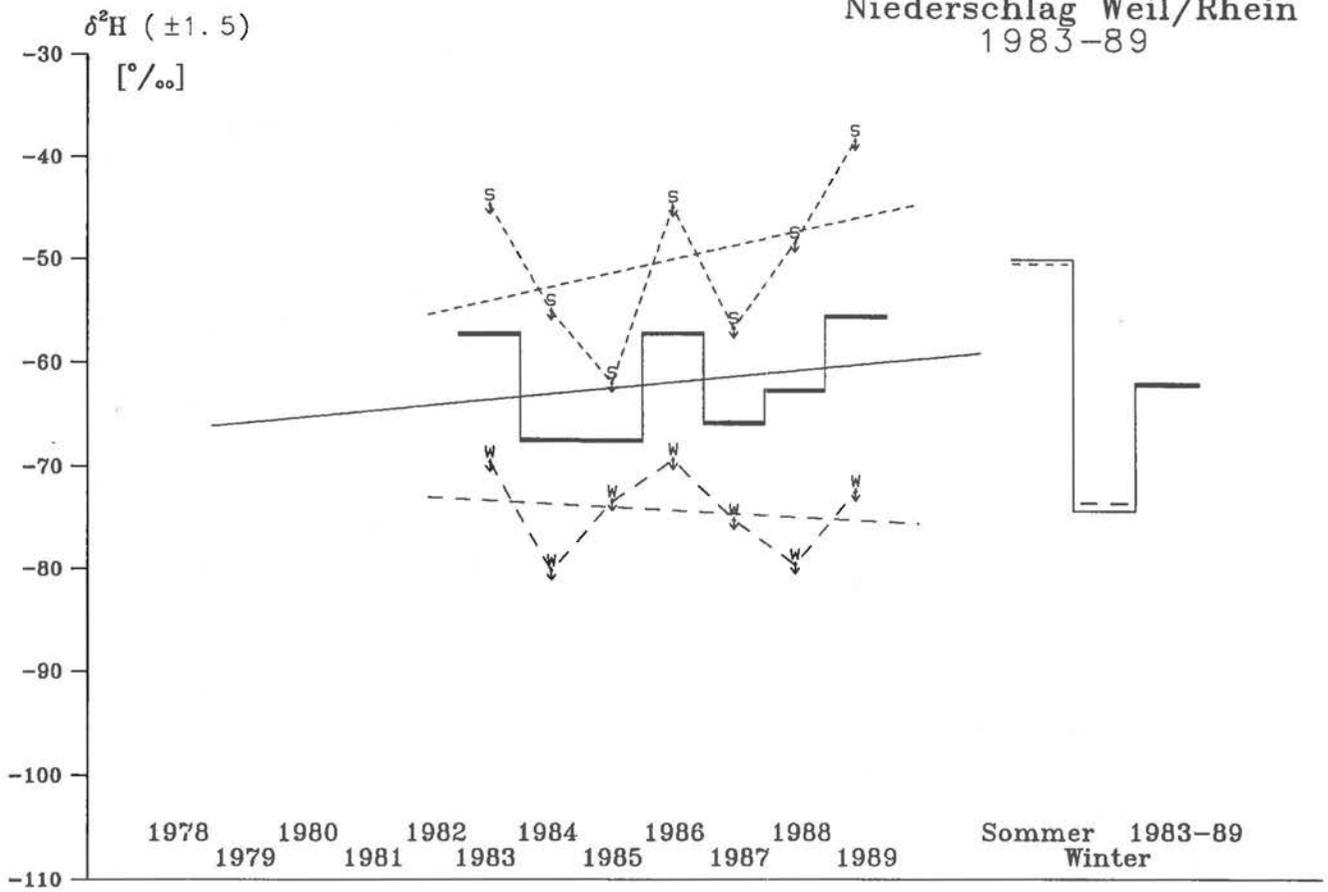


Abb. 40: $\delta^{18}\text{O}$ -/ $\delta^2\text{H}$ -Gehalte der Niederschläge Meßstation Karlsruhe

Niederschlag Weil/Rhein
1983-89



Niederschlag Weil/Rhein
1983-89

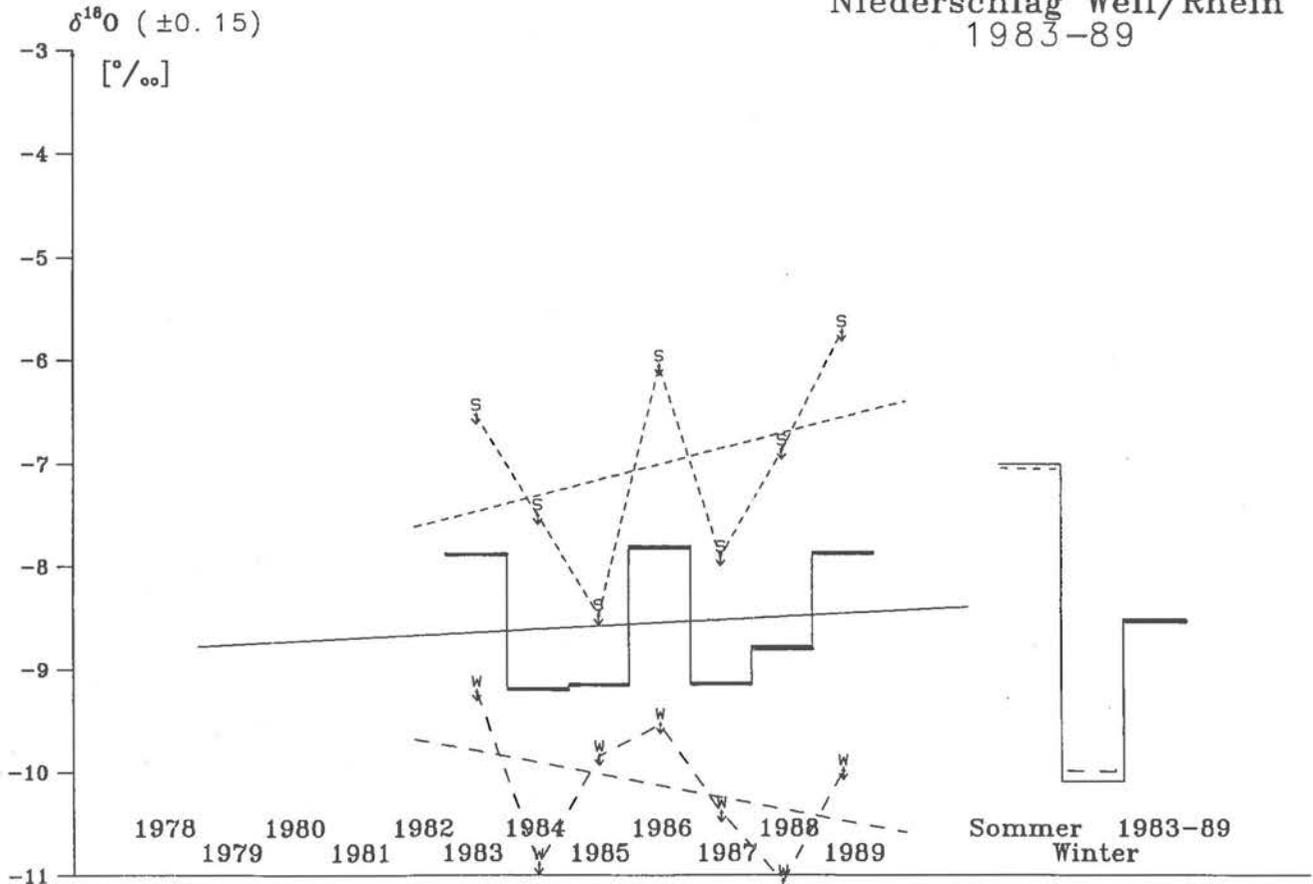


Abb. 41: $\delta^{18}\text{O}$ -/ $\delta^2\text{H}$ -Gehalte der Niederschläge Meßstation Weil/Rhein

Niederschlag Weil am Rhein: (Abb.41) Die Meßwerte weisen, im Vergleich mit denen der anderen Stationen, nur geringe Schwankungen auf. Die Jahresmittelwerte besitzen einen nur sehr geringen positiven Trend, der sich durch die divergent verlaufenden Trends der hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahre ergibt. Der Anstieg der hydrologischen Sommerhalbjahreswerte entspricht dem der anderen Stationen. Die Mittelwerte der hydrologischen Winterhalbjahre zeigen hingegen eine deutliche Zunahme der Isotopenfraktionierung.

Diese Darstellungen zeigen eine für die hydrologischen Sommerhalbjahre insgesamt einheitliche Entwicklung in den Isotopengehalten der Niederschläge von 1978-89, hin zu geringerer Isotopenfraktionierung bzw. zu einer höheren Niederschlagstemperatur. Dieser Trend läßt sich auch für die Niederschläge in den hydrologischen Wintermonaten der Stationen Trier und Karlsruhe feststellen. In Weil am Rhein tritt ein gegenläufiger Trend, eine zunehmende Isotopenfraktionierung in den Winterniederschlägen auf. Für den Verlauf der Jahresmittelwerte der Gehalte an Deuterium und Sauerstoff-18 hat der Temperaturanstieg der Winterniederschläge maßgebliche Bedeutung (Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung). So wird aus der Zunahme der Isotopenfraktionierung in den Winterniederschlägen in Weil am Rhein die Umkehrbarkeit der beobachteten Trends und ihre nur regionale Aussagekraft deutlich. Aus diesen nur relativ kurzzeitigen Aufzeichnungen lassen sich keine Aussagen über die Dauer bzw. Fortdauer solcher Trends herleiten.

Der Einfluß des Kontinentaleffektes (Abreicherung der schweren Isotope mit zunehmender Entfernung vom Meer) und der des Breiteneffektes (Abreicherung an schweren Isotopen mit zunehmender geographischer Breite; abnehmende Jahresmitteltemperaturen) kann bei diesen Betrachtungen außer acht gelassen werden. Der Einfluß des Mengeneffektes (Isotopenfraktionierungen mit der Niederschlagsmenge und der Dauer des Einzelereignisses) ist durch die Bildung von Monatsmittelwerten genügend gut ausgeglichen (MOSER & RAUERT 1980). Der Einfluß des Mengeneffektes auf den jahreszeitlichen Verlauf der Isotopenfraktionierung ist bei den auftretenden Temperaturdifferenzen (min., max. Mittelwerte 1931-60 für Luxemburg-Stadt: Januar 0,2°C; Juli 18,1°C; FABER 1971) von den temperaturbedingten Effekten deutlich überprägt, z.B. vom Jahreszeiteffekt (bei geringen Temperaturdifferenzen, z.B. 2°C im Pazifik, sind Mengeneffekte deutlich beobachtbar; YURTSEVER 1976.)

Diese Input-Informationen sollen im folgenden im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm mit der besonderen Position und Verteilung der Meßwerte aus Trois Ponts und Koerich verbunden werden (Abb.42).

Die etwas abgereichertere Position der Meßwerte aus Koerich liegt, gegenüber der aus Trois Ponts, etwas näher an den Winterniederschlägen. Hieraus lassen sich für die Zeiten der Neubildung der Grundwässer aus Koerich kühlere, etwa der heutigen Winterwitterung entsprechende Bedingungen ableiten. Die Verteilung entlang der MWL kann hierbei auf vergleichbare Trends in den Isotopengehalten der Niederschläge, wie sie bei den rezenten Niederschlägen beobachtet wurden, zurückgeführt werden.

Die Auswertungen der Isotopengehalte der rezenten Niederschläge geben einen indirekten Hinweis auf die Lage der Proben aus Trois Ponts oberhalb der Werte aus Koerich (siehe Abb.37 unten). So wird aus dem regionalen Charakter und den variablen Trendrichtungen der rezenten Niederschläge ersichtlich, daß für eine andere Position im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm bereits geringe Änderungen in den regionalen Klimafaktoren wie z.B. eine Änderung der Hauptwindrichtung, oder eine andere Niederschlagsverteilung bzw. eine andere jahreszeitliche Verteilung der Grundwasserneubildung ausreichen kann.

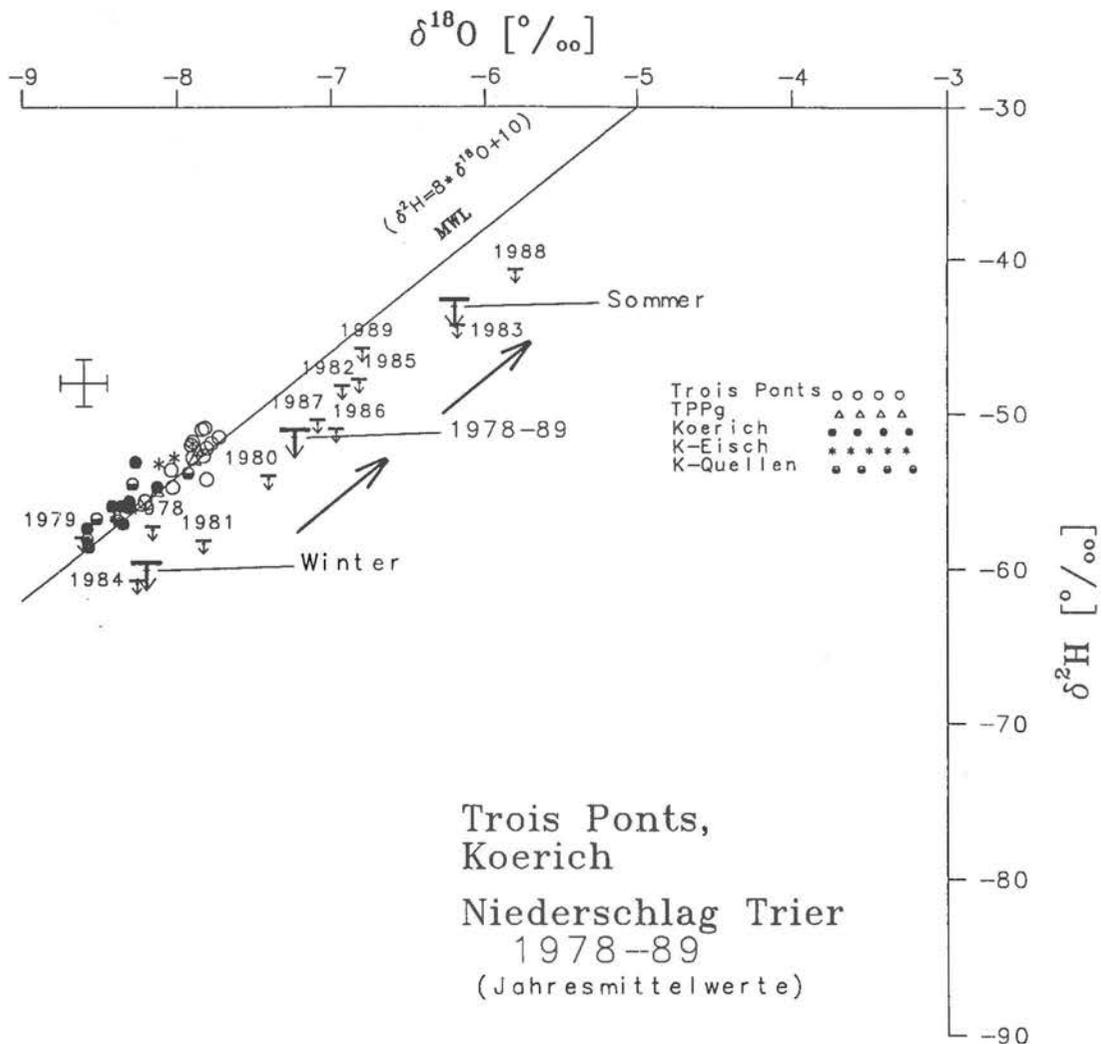


Abb. 42: $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ -Relation mit Trend in den Isotopengehalten der Niederschläge der Station Trier

Eine großräumige klimatische Erklärung für die abgereichertere Position der Daten aus Koerich, gegenüber denen aus Trois Ponts, läßt sich aus Abb. 76 herleiten. Der Verlauf der "Klimakurve Grönlandeis" wird in stark abgeschwächter Form von den, aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten berechneten, Niederschlagstemperaturen (zu Zeiten der Grundwasserneubildung) nachgezeichnet. Für die Grundwasserneubildung in Koerich werden niedrigere Jahresmitteltemperaturen (Luft) in Ansatz gebracht, so daß in den Niederschlägen eine stärkere Abreicherung an schweren Isotopen stattgefunden haben kann. Der Zeitraum der Neubildung der Grundwässer aus Trois Ponts kann in einem direkten Zusammenhang mit der Zunahme an Niederschlägen stehen, während für die Neubildung der Koericher Grundwässer bereits aktuelle Niederschlagshöhen angenommen werden (Abb.76). Diese Vorstellungen zur Grundwasserneubildung werden durch die saisonale Fraktionierung des Inputs (s.o.) und durch die, in den hydraulischen Untersuchungen (Kap.4.2.2) aufgezeigten günstigen Infiltrationsbedingungen der vegetationslosen Wintermonate ergänzt.

Die bereits mehrfach angesprochene Gruppierung der Gehalte an diesen stabilen Isotopen ist auch in den Tritiumgehalten wiederzufinden. So ist eine klare Gruppierung, unter lokalem Bezug, im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm mit Hilfe der ^3H -Gehalte möglich (Abb.43). Weitere Ausführungen zum Tritium-Verfahren sind im nächsten Kapitel zu finden.

Es lassen sich aus diesen Werten eine Gruppe aus Probennahmestellen aus Koerich, eine aus Trois Ponts und eine Gruppe der Eisch-Meßwerte ausgliedern. Die Eisch-Proben streuen über nahezu den gesamten Wertebereich. Zwischen der Gruppe aus Koerich (32-43 TU) und der aus Trois Ponts (<1,7 TU; tritiumfrei) vermitteln, sowohl durch ihre Position im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm, als auch durch ihre ³H-Gehalte von tritiumfrei bis 10 TU, die Proben aus KBR3 und KBR4.

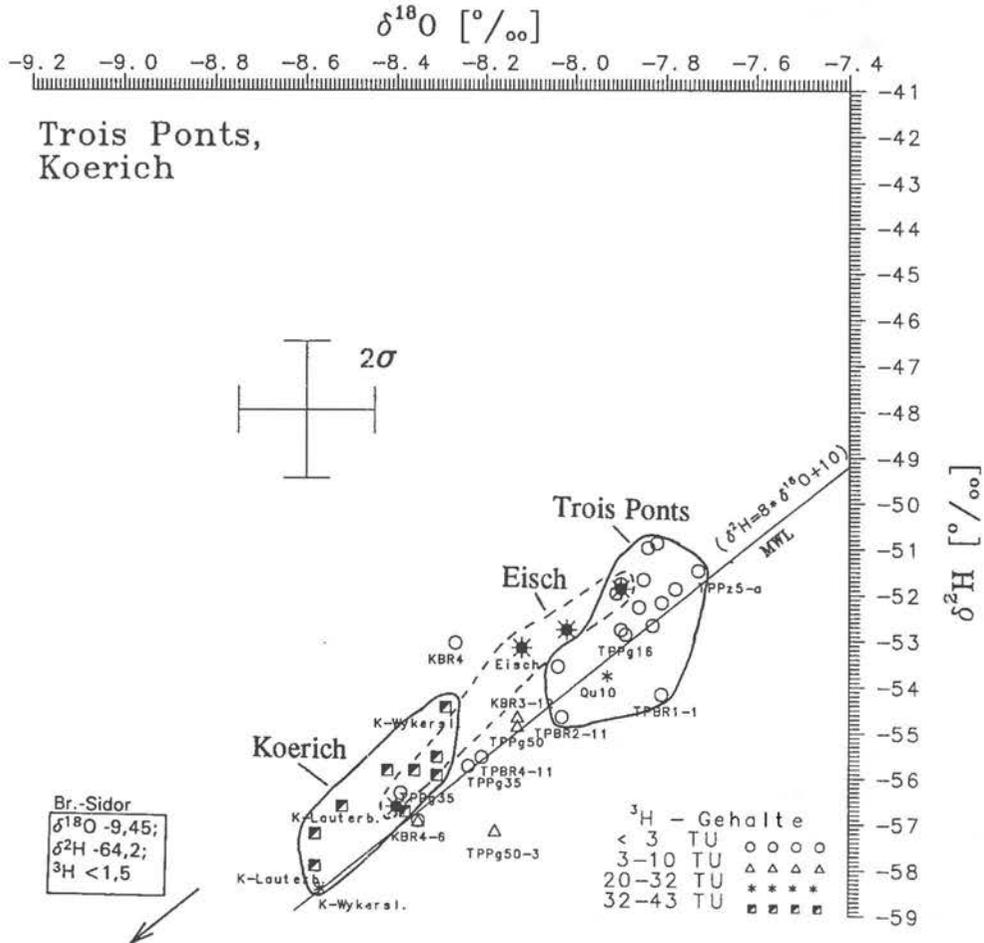


Abb. 43: $\delta^2H/\delta^{18}O$ -Relation, kombiniert mit 3H -Gehalten der Grundwässer am Standort Koerich und Trois Ponts

Br.-Sidor

Der Meßwert der Probe aus Br.-Sidor liegt auf der MWL deutlich abgereichert an schweren Isotopen gegenüber der Gruppe aus Trois Ponts und Koerich (Tab.13, Abb.37 oben und Abb.43).

Diese Position wird als ein deutlicher Hinweis auf Zeiten der Grundwasserneubildung mit kühleren Temperaturen (Pleistozän) angesehen.

Everlange

Die ^{18}O - und ^2H -Gehalte der Grundwasserproben aus den Brunnen in Everlange liegen im ähnlichen Bereich wie die aus Trois Ponts und Koerich, zwischen den Extrema Attert ($\delta^{18}\text{O}$: -8,19‰ ; $\delta^2\text{H}$: -53,0‰) und E15-1-3 ($\delta^{18}\text{O}$: -8,61‰ ; $\delta^2\text{H}$: -42,6‰).

Eine Aufbereitung dieser Meßwerte ist den beiden Graphiken der Abb. 44 und Abb. 45 zu entnehmen.

Anhand der Deuteriumgehalte lassen sich in der Abb. 44 oben, bei signifikanten Unterschieden, eine oberhalb des Mittelwertes liegende Gruppe aus den Brunnen E15-3, E15-4 und E15-5, sowie eine unterhalb des Mittelwertes liegende Gruppe der Brunnen E15-1 und E15-2 erkennen.

Diese Gruppen lassen sich auch in den ^{18}O -Gehalten (Abb.44 unten) wiedererkennen. Durch die hinzugefügten Meßwerte aus der Probenserie am Ende der Grundwasserentnahmen (9/91) der *solution de rechange* wird ein entnahmebedingter Trend zu weniger stark an schwereren Isotopen abgereicherten Grundwässern angedeutet. Mit signifikanten Unterschieden werden diese Veränderungen an den Meßwerten der Brunnen E15-1 und E15-2 besonders deutlich. Die ^{18}O -Gehalte der Grundwässer dieser Brunnen sind durch die Grundwasserentnahmen in ein Niveau um den Mittelwert angestiegen, so daß nur die beiden Proben des Ausgangszustandes (6/91) der Brunnen E15-1 (E15-1-3) und E15-2 (E15-2-3) eine deutlich abgereicherte Position einnehmen. Bei diesen Probennahmeserien wurden wiederum durch Mehrfachbestimmungen und Kontrollmessungen die systematischen Fehler überprüft.

Im Deuterium/Sauerstoff-18 -Diagramm (Abb.45) plotten die Proben, mit Ausnahme der Attert-Probe, auf bzw. leicht unterhalb der MWL. Das Flußwasser der Attert ist, gegenüber den Grundwasserproben und gegenüber der Schamicht, an schweren Isotopen nicht so stark abgereichert. Sie liegt deutlich oberhalb der MWL. Dies kann an einem, bei einer Beprobung nicht zu erkennendem Jahresgang liegen oder in unterschiedlichen Einzugsgebieten begründet sein. Die Attert ist in ihrem Niedrigwasserabfluß (MNQ) stark durch Grundwasserübertritte geprägt (Effluenz), während der Schamicht-Bach ein relativ oberflächennahes, landwirtschaftlich bewirtschaftetes Einzugsgebiet hat.

Die deutlich abgereicherte Position der Proben E15-1-3 und E15-2-3, leicht unterhalb der MWL, wird in Verbindung mit anderen Isotopengehaltsbestimmungen weiter unten diskutiert.

5.2 Tritium (^3H)

Tritium, das radioaktive Isotop des Wasserstoffs mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 12,43$ Jahren, wird unter natürlichen Bedingungen im höheren Bereich der Atmosphäre durch kosmische Strahlung laufend erzeugt. Als natürlicher Bestandteil des Wassermoleküls gelangt Tritium, bei wechselnden Konzentrationen in den Niederschlägen, in die Hydrosphäre (siehe z.B. MOSER & RAUERT 1980, FRITZ & FONTES 1986)

Das Meßergebnis wird in TU (-Einheiten; Tritium Units) angegeben. 1 TU entspricht einer Konzentration von einem ^3H -Atom auf 10^{18} H-Atomen, was einer (radioaktiven) Aktivität von 0,119 Bq/l entspricht. Die Meßgenauigkeit liegt bei 1-2 TU, so daß Tritiumgehalte < 2-3 TU (2σ bereits einberechnet) als "tritiumfrei" anzusehen sind.

Der natürliche ^3H -Gehalt in den mitteleuropäischen Niederschlägen liegt im Jahresmittel bei ca. 4-6 TU. Durch die Kernwaffentests wurde der ^3H -Gehalt der Niederschläge von 1953 an

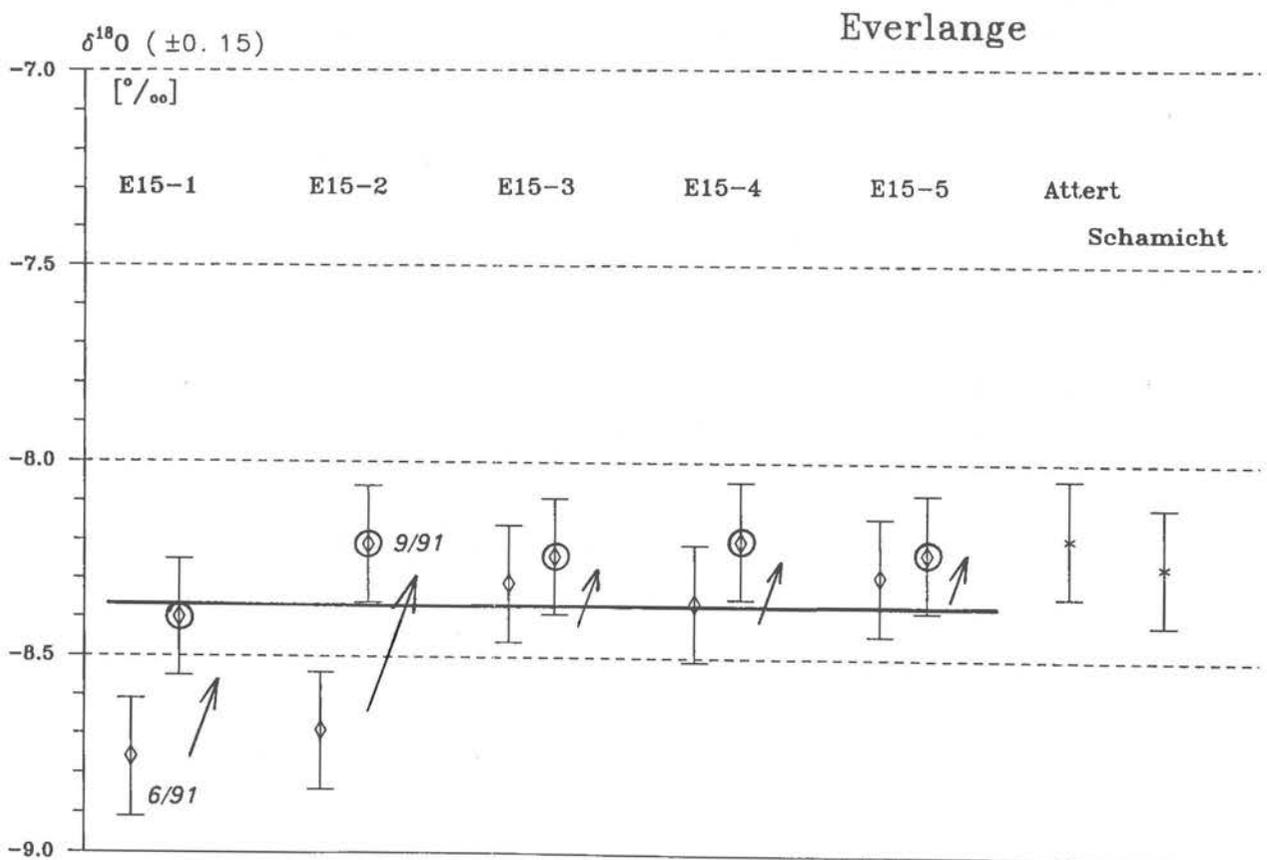
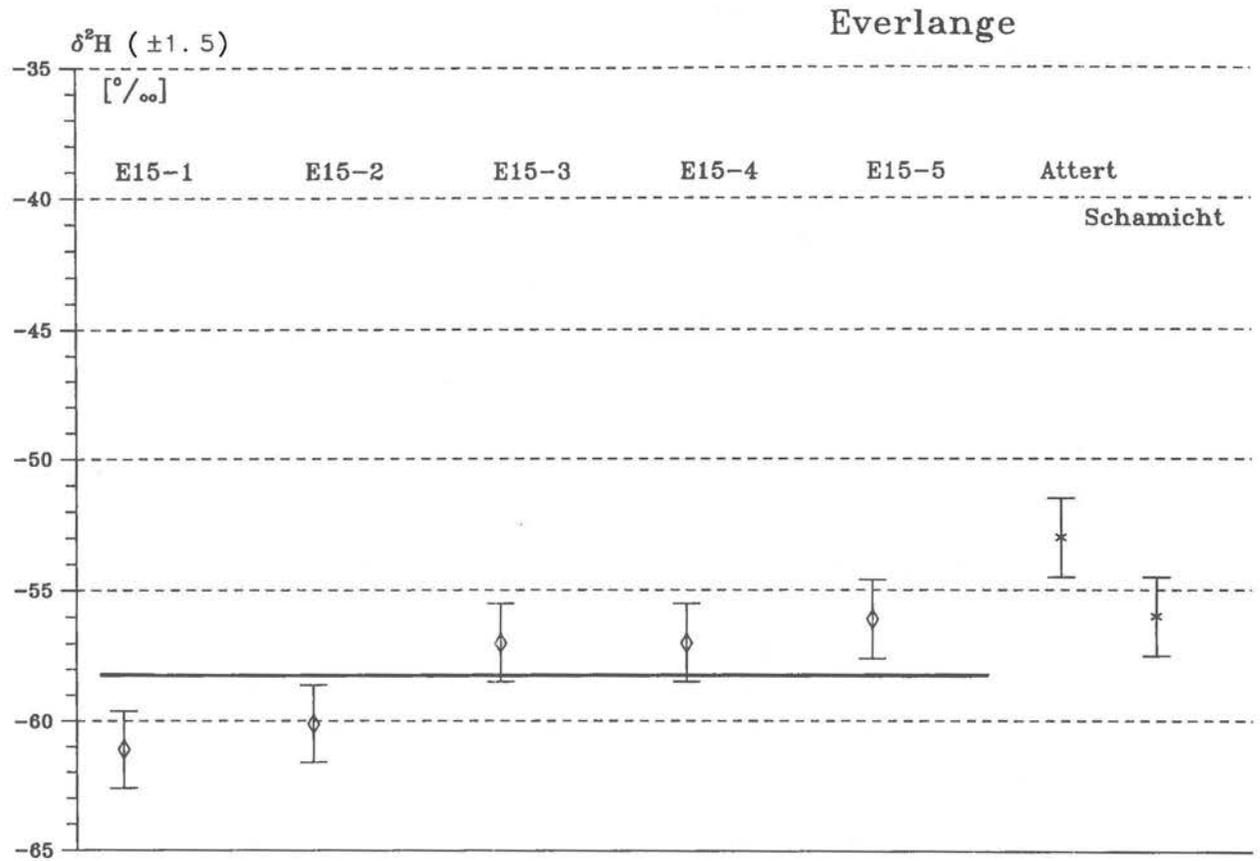


Abb. 44: $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte der Grundwässer am Standort Everlange; Pfeile verdeutlichen den Trend zwischen den Beprobungsserien 6/91 und 9/91

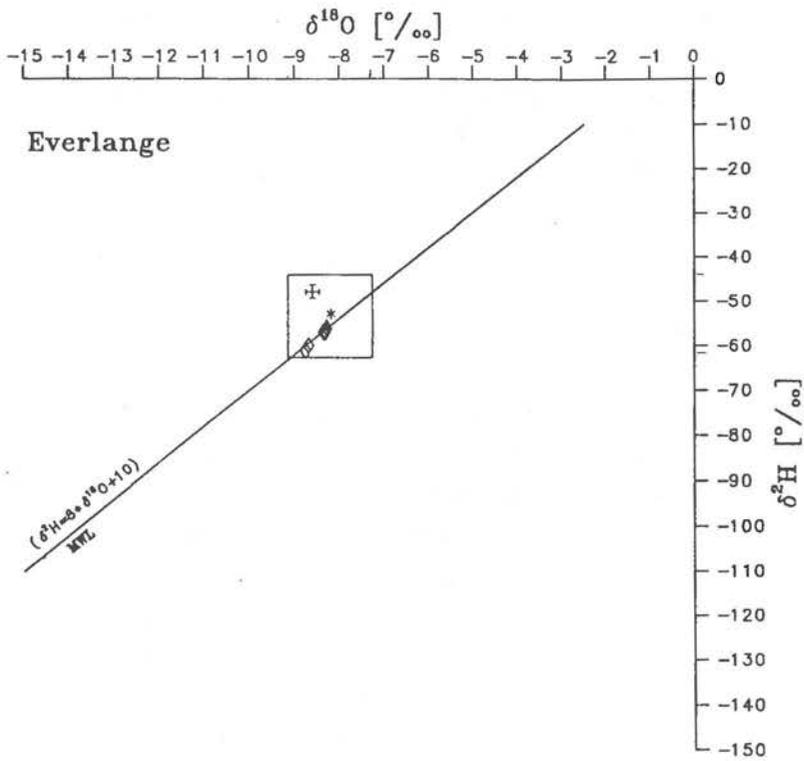
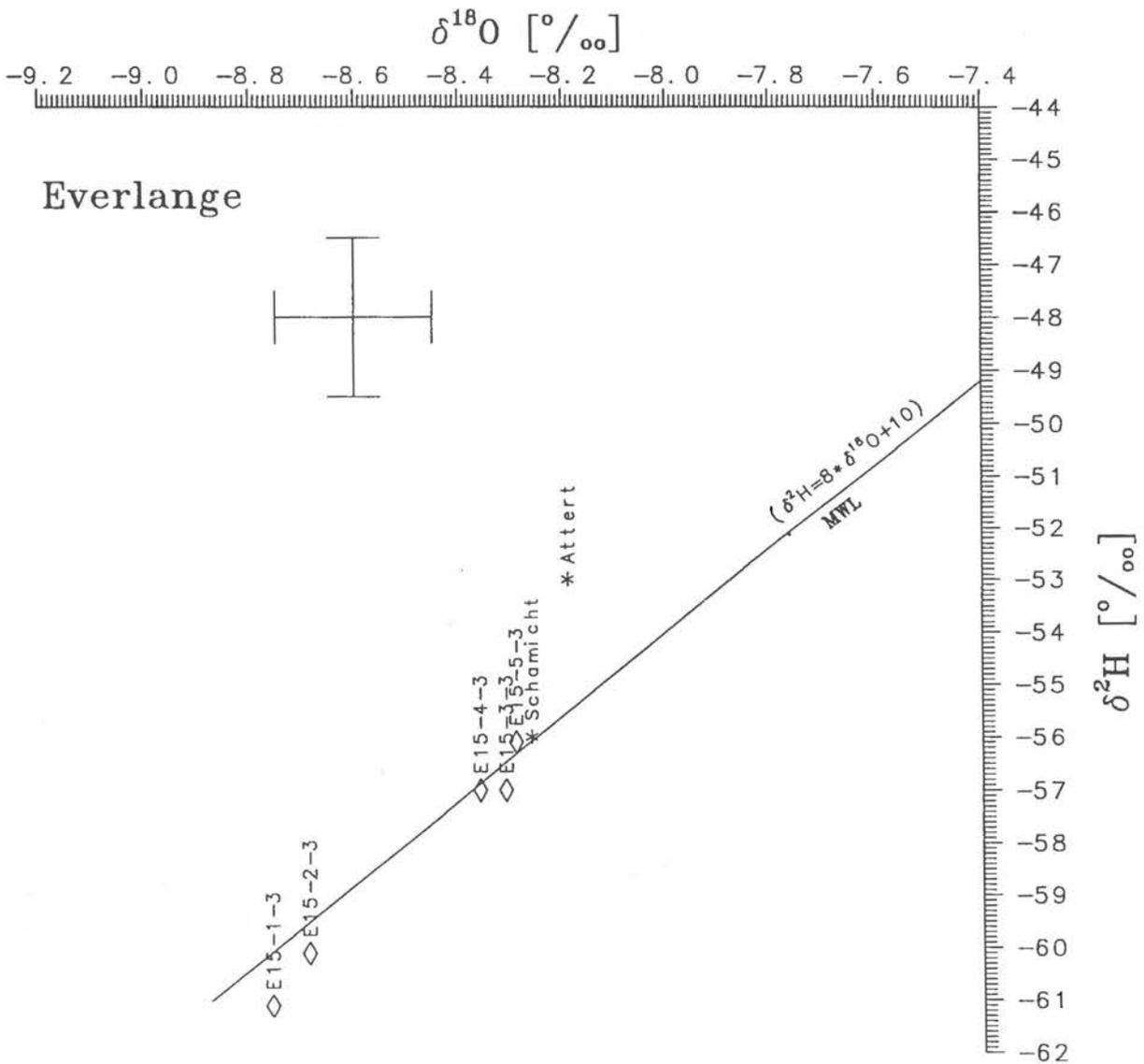


Abb. 45: $\delta^{18}\text{O}$ -/ $\delta^2\text{H}$ -Relation für Grundwässer am Standort Everlange



bis zum Maximum, dem 1000fachen der natürlichen Konzentration, im Jahre 1963 erhöht (Abb.46). Seitdem ist durch radioaktiven Zerfall und durch Verdünnungsvorgänge die ^3H -Konzentration in den Niederschlägen auf <20 TU abgesunken, wobei periodische jahreszeitliche Konzentrationsschwankungen (Jahreszeiteffekt, NCRP 1979) nicht mehr auftreten sollen. Nach mdl. Mitt. Dr. Eichinger, Fa. HYDROISOTOP, sind an aktuelleren Messungen aus der Schweiz Jahreszeitschwankungen zu erkennen.

Über diese Markierung der Niederschläge (^3H -Input für unterirdischen Abflußanteil) lassen sich die niederschlagsbürtigen Anteile des Grundwasserstroms zeitlich aufgliedern. Grundlage für diese Betrachtungen ist die Annahme, daß sich die ^3H -Konzentration im Grundwasser nur noch durch Verdünnung und radioaktiven Zerfall ändert.

"Tritiumfreies" Wasser ist eindeutig vor 1953 gebildet worden. Wässer mit hohen Tritiumgehalten haben größere Anteile an jungen (auch aktuellen) Niederschlägen. Bei ^3H -gehalten von 30-50 TU ist eine genaue, kurzzeitige Zuordnung der verschiedenen Mischungsanteile nur über eine Kombination mit anderen Isotopengehaltsbestimmungen (z.B. Krypton-85) möglich. Eine Kombination mit ^{14}C -gehalten ist bei niedrigen ^3H -gehalten sinnvoll.

Unter der Annahme von gewissen hydraulischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen und der Anwendung des Zerfallsgesetzes (siehe Kap.5.3) lassen sich verschiedene Modelle aufstellen, mit deren Hilfe die Anteile von Wässern eines bestimmten Alters am Mischgrundwasser (^3H -Output) berechnet werden können. Das sich hieraus ergebende Modell-Alter der jeweiligen Mischung ist die "Mittlere Verweilzeit", das Mittel über alle beteiligten Verweilzeiten. Weitere Ausführungen hierzu sind im Kap. 5.3 zusammengestellt.

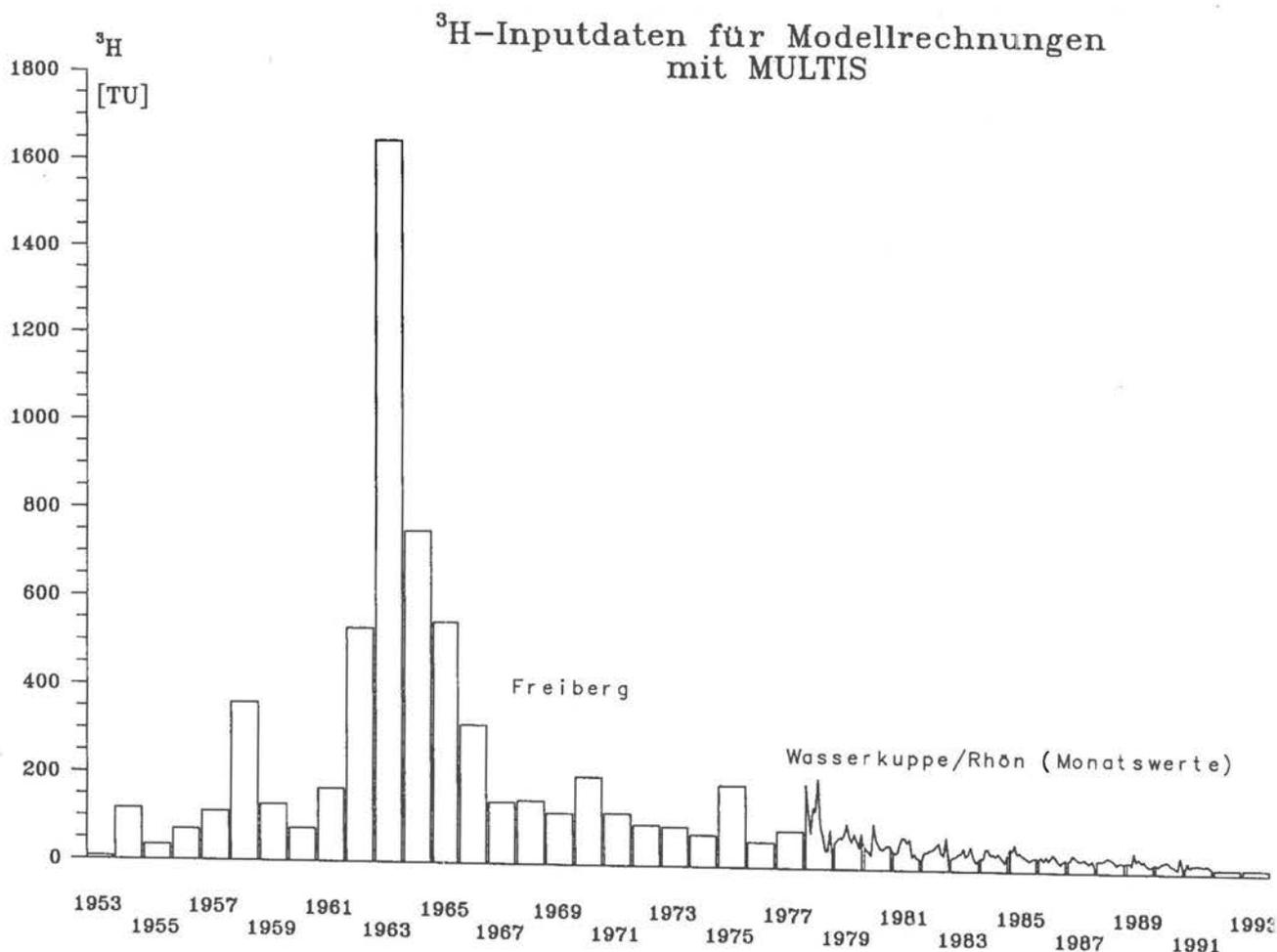


Abb. 46: ^3H -Gehalte im Niederschlag, verwendet als Inputdaten für Modellrechnungen

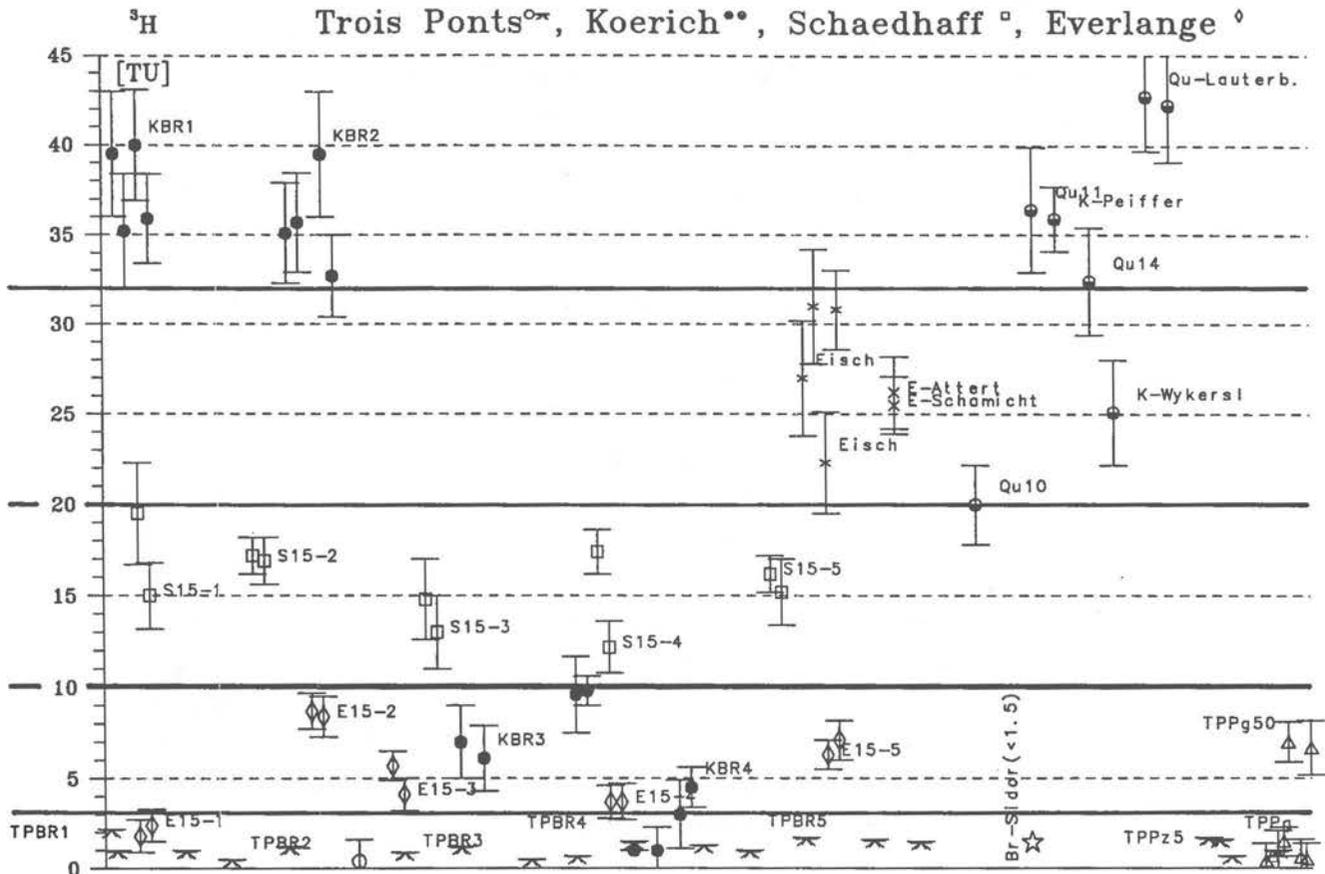


Abb. 47: ^3H -Gehalte der Grundwässer der Standorte der *solution de recharge*

5.2.1 Meßwerte

Die Meßwerte der ^3H -Isotopengehaltsbestimmungen sind mit den entsprechenden Beprobungsstellen und Beprobungszeitpunkten in den Tabellen ISOTOPEN-Daten Luxemburg im Anhang aufgelistet.

Standort	Entnahmestelle	min.	^3H [TU]	max.
Trois Ponts	Brunnen, TPPz5	<2,2	(Mehrzahl <1,7)	
	TPPg	<1		7,0±1,1
Koerich	Brunnen	<1		40,0±3,1
	Quellen	20,0±2,2		42,2±3,1
	Eisch	22,3±2,8		31,0±3,2
Br.-Sidor		<1,5		
Schaedhaff	Brunnen	12,2±1,4		19,5±2,8
Everlange	Brunnen	1,8±0,9		8,7±1,0
	Attert	26,2±2,0		
	Schamicht	25,5±1,6		

Tab. 14: Variationsbreiten der ^3H -Meßwerte aus den Isotopengehaltsbestimmungen an Grundwässern in Luxemburg

Die Meßwerte der Proben aus **Trois Ponts** haben in der Mehrzahl weniger als 1,7 TU. Zwei Proben aus den Deckschichten (TPPg50-2 und TPPg50-3 mit $7,0 \pm 1,1$ TU bzw. $6,7 \pm 1,5$ TU) müssen als nicht repräsentativ angesehen werden, da nicht auszuschließen ist, daß noch geringe Anteile an Spülwasser vom Kernbohrvorgang (Trinkwasser der SES; größtenteils Quellwasser aus dem Luxemburger Sandstein) beigemischt sind.

Die ^3H -Gehalte der Proben aus **Koerich** variieren zwischen "tritiumfrei" bei der ersten Probe aus KBR4 und 42,3 TU in der Quellwasserprobe K-Lauterbur.

Die Tritiumgehalte des Grundwassers aus **Schaedhaff** liegen zwischen 10 und 20 TU.

Das Grundwasser aus **Br.-Sidor** ist "tritiumfrei".

Die Probe aus Brunnen E15-1 in **Everlange** kann als "tritiumfrei" eingestuft werden, während die Proben aus den anderen Brunnen unter 10 TU liegen. Attert (26,2 TU) und Schamicht (25,5 TU) weisen den höchsten Tritiumgehalt auf.

Diese Ergebnisse der Tritiumgehaltsbestimmungen sind in Abb. 47 mit den entsprechenden Meßgenauigkeiten (2σ) dargestellt. Die Meßwerte sind nach den Probenahmeorten geordnet, wobei die zeitliche Abfolge der Probennahmen von links nach rechts berücksichtigt ist. Der Wertebereich wird aufgrund der Datenverteilung in 5 Klassen aufgeteilt (siehe hierzu Abb.47). Die Klasse mit Werten < 3 TU beinhaltet die "tritiumfreien" Wässer. Generelle Trends zwischen den verschiedenen Probenahmeserien werden nicht deutlich.

5.2.2 Auswertung / Interpretation

Trois Ponts und Koerich

Das Grundwasser am Standort **Trois Ponts** ist "tritiumfrei" und somit vor 1953 gebildet worden. Anteile jüngerer Grundwässer sind nicht erkennbar. Die Wässer aus den in den überlagernden Tonsteinserien in 16 m und 35 m Teufe verfilterten Piezometern (TPPg16, TPPg35; in Abb.47 mit TPPg bezeichnet) sind ebenfalls "tritiumfrei". Dies deutet darauf hin, daß diese Kluftwässer entweder keinen Kontakt zu den oberflächennahen, wassererfüllten Kluftsystemen haben, oder bei hydraulischem Kontakt kein Transport bzw. kein Grundwasserumsatz in den Klüften stattfindet, der Niederschläge der letzten 40 Jahre in eine Teufe von 16 m verfrachtet hätte.

Die Meßwerte der Proben aus TPPg50 (Filterstrecke 50-52 m Teufe; ca. 2-3 m im Hangenden des Luxemburger Sandsteines) belegen eine Mischung aus "tritiumfreiem" Grundwasser mit einem Wasser (Bohrspülung), dessen Tritiumgehalt denen der Quellen aus Koerich entspricht. Um hierbei den Wert von 7 bzw. 6,7 TU zu erreichen, genügen bereits geringe Anteile jüngerer Grundwassers.

Die Tritiumgehalte der Proben aus **Koerich** verteilen sich auf 4 der 5 Klassen. Die ersten beiden Grundwasserproben aus KBR4 sind "tritiumfrei", während die beiden folgenden Proben einen fortschreitenden, signifikanten Anstieg auf 4,5 TU zeigen. Ein Anstieg der ^3H -Gehalte ist auch in KBR3 zu verfolgen, wobei die letzten beiden Proben um ca. 3 TU auf 9,6 und 9,8 TU ansteigen. Die ^3H -Werte der Proben aus KBR1 und KBR2 liegen bei ungeordneter Verteilung in der Klasse > 32 TU und damit deutlich oberhalb der Werte der Eisch-Proben. Diese streuen über die Klasse 20-32 TU. Mit 42 TU weist das Grundwasser in der Quellfassung Lauterbur den höchsten Tritiumgehalt auf, wobei es wie die Quellwässer Qu11, K-Peiffer, Qu14 in den glei-

chen Bereich fällt, wie die der Brunnen KBR1, KBR2. Die Quellwasserproben K-Wykerslooth und Qu10 (Quelle Frontzenberg) sind von dieser Gruppe deutlich abgesetzt.

Diese Variationen im ^3H -Gehalt werden wie folgt interpretiert (siehe hierzu Abb.48): Das Grundwassersystem in Koerich besteht aus mindestens 3 unterschiedlichen Komponenten, einer sehr jungen Komponente, die auf den aktuellen Niederschlag der letzten Jahre zurückgeht, aus einer Komponente, in der noch Anteile aus dem "Tritiumpeak" der 50-er und 60-er Jahre stecken und aus einer alten, "tritiumfreien" Komponente, die älter als 40 Jahre ist.

Die Proben aus den Brunnen in Koerich wurden während der Pumpversuche entnommen, so daß der Anstieg der ^3H -Gehalte in KBR4 und in KBR3, sowie die Lage der ^3H -Gehalte der KBR3-Proben insgesamt, eine \pm geringe, entnahmebedingte Zumischung der "jungen" Komponente aufzeigen. KBR1 und KBR2 liegen in der durch effluente Strömungsbedingungen geprägten Talau der Eisch und zeigen ein gut durchmisches Grundwasser an. Eine Änderung an diesen Strömungsbedingungen durch die Pumpversuche ist nicht sichtbar. Die Position im Diagramm der Abb. 47 oberhalb der Eisch-Werte läßt Mischungsanteile aus dem "Tritiumpeak" erkennen. In diesen Rahmen lassen sich die Quellen Lauterbur, Peiffer und Wykerslooth einordnen. An den Werten der Quelle Wykerslooth werden die sich ändernden Mischungsanteile deutlich. Die Quelle Frontzenberg ist nicht perennierend, hat ein sehr kleinräumiges Einzugsgebiet und scheint keinen Anschluß an das "Tiefenwasser" zu haben, so daß hier "Mischungs-Modell-Rechnungen" Hinweise auf den natürlichen, infiltrationsbestimmten Wasserumsatz geben (siehe Kap.5.2.3).

Die "Tritiumfreiheit" der ersten beiden Proben aus KBR4 wird als Bestätigung bzw. als eindeutiger Hinweis auf ein "Tiefenwasser" aufgefaßt. Dieses "Tiefenwasser" liegt, orographisch gesehen, unterhalb der Quellniveaus und wird im unbeanspruchten Fließzustand nicht oder noch nicht von Anteilen jüngerer Komponenten erreicht. Inwieweit eine Altersbeziehung zwischen dem "Tiefenwasser" in Koerich und dem Grundwasser in Trois Ponts besteht, ergibt sich aus den Kohlenstoff-Isotopenuntersuchungen.

Ein direkter Einfluß der Grundwasserentnahmen aus KBR3 auf die Quelle Peiffer ist, trotz der örtlichen Nähe, nicht erkennbar. Es handelt sich um zwei unterschiedliche Grundwässer.

Das Oberflächengewässer Eisch hat je nach Grundwasseranteil andere ^3H -Gehalte, die über die Klasse 20-32 TU streuen und etwas oberhalb der aktuellen Konzentrationen der Niederschläge liegen.

In diese Klasse (20-32 TU) fallen auch die Werte der Vorfluter Attert und Schamicht in Everlange.

Schaedhaff

Die Tritiumgehalte der Grundwässer aus Schaedhaff liegen in der Klasse 10-20 TU, wobei sich die jeweiligen Probengehalte einer Entnahmestelle nicht signifikant unterscheiden. Die Ausnahme hierbei bilden die Proben aus dem Brunnen S15-4.

Die ^3H -Gehalte von 10-20 TU können für ein Grundwasser mit einem einheitlichen, geringen Alter sprechen oder wiederum eine Mischung aus altem, "tritiumfreiem" Grundwasser mit einem hier größeren Anteil an jungem, ^3H -haltigem Grundwasser darstellen. Diese Frage läßt sich mit Mischungsrechnungen diskutieren. Bei einem Mischalter wird das Grundwasser in Schaedhaff, innerhalb des Luxemburger Sandstein - Aquifers, zwischen einem nicht durchmischtem Grundwasser in Trois Ponts und Teilbereichen von Koerich einerseits und zwischen einem gut durchmischtem Grundwasser in der Eisch-Talau andererseits vermitteln. Im Kapitel 5.2.3 wird dies weiter diskutiert.

Grundwasserströmung und Tritiumgehalte in Koerich *schematisiert*

S - - - im Verlauf der Muldenachse - - - N

SW - E'-Muldenschenkel - NE

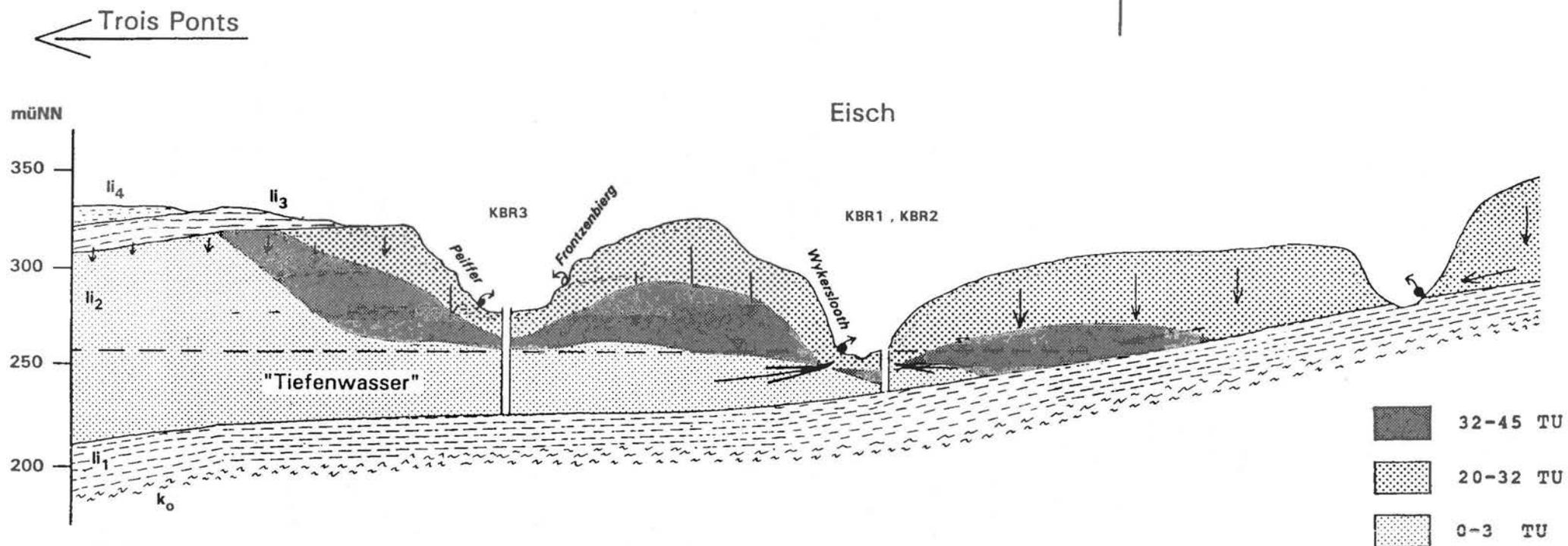


Abb. 48: Grundwasserströmung und Tritiumgehalte in Koerich

Everlange

Die Tritiumgehalte der Grundwässer aus den Brunnen am Standort Everlange gruppieren sich in die Klasse 3-10 TU (E15-2, E15-3, E15-4, E15-5), ohne daß die Proben der jeweiligen Entnahmestelle signifikant variieren. Das Grundwasser des Brunnen E15-1 ist "tritiumfrei". Der große Sprung in den ^3H -Gehalten zwischen E15-1 und E15-2 wird auf den Einfluß bzw. auf die Auswirkungen einer zwischen den beiden Brunnen verlaufenden Störung zurückgeführt. Die Störung ver- bzw. behindert die Zumischung einer jungen Komponente.

5.2.3 Modellrechnungen

Für die Berechnung von Verweilzeiten eines Grundwassers im Untergrund werden die Eigenschaften der Umweltisotope Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium als "Ideale Tracer" genutzt. Über die Infiltration der Niederschläge ergibt sich ein \pm konstanter Tracer-Input in das Grundwassersystem. Die kurzfristigen Variationen der Niederschlagshöhe und deren Isotopengehalte (Tracerkonzentrationen) gleichen sich im Laufe der Infiltration zu einem gleichmäßigen Eintrag oder zu saisonalen Schwankungen in der Grundwasserneubildung aus (hydrologische Sommer- und Winterhalbjahre). Aus dem Vergleich der Tracerkonzentrations-Zeitverteilungen (Input/Output) lassen sich systembedingte Veränderungen erkennen und das Grundwassersystem beschreibende Parameter bzw. Merkmale ableiten. Die an einem Grundwassersystem beteiligten Grundwasserkomponenten werden erst am Ort der Grundwasserentnahme (GW-Aufschluß, Brunnen, Piezometer) bzw. im Quellbereich miteinander vermischt (Aufschlußmischung). Somit repräsentiert die Grundwasserprobe mit ihrer Verweilzeit einen Mittelwert über alle an dieser Mischung beteiligten Verweilzeiten einer jeden Grundwasserkomponente. Diese "Mittlere Verweilzeit", MVZ, (turnover time, mean transit time: mean age of water leaving the system) kann, gegeben durch die jeweilige spezielle Verteilung der verschiedenen alten Grundwasserkomponenten, als Charakteristikum für ein Grundwassersystem angesehen werden. Beschreibt man ein Grundwassersystem mit mathematisch umsetzbaren Modellvorstellungen, so kann die Berechnung von Grundwasserverweilzeiten auf einige Jahrhunderte ausgedehnt werden. Unter Umständen kann dann auf die, an der Grundwassermischung beteiligten, verschiedenen alten Komponenten geschlossen werden.

Die im folgenden beschriebenen Modellrechnungen zur Ermittlung der Mittleren Verweilzeiten gehen auf die Arbeiten von MALOSZEWSKI & ZUBER (1982) und ZUBER (1986) zurück und wurden vom Autor mit dem Programm MULTIS (RICHTER & SZYMCZAK 1991) bei der HYDROISOTOP GmbH in Schweitenkirchen durchgeführt. Mit Hilfe dieser sog. "lumped-parameter"-Modelle wurde das "inverse Problem", die Suche nach einer systembeschreibenden Funktion (weighting function) bei gegebenem Input und Output (Niederschlag bzw. Probenmeßwert), gelöst und die MVZ berechnet.

Die Tabelle 15 aus ZUBER (1986) gibt die wichtigsten Modelle, deren "weighting functions" und die berechenbaren Größen wieder. Eine graphische Anschauung der diesen Modellen zugrunde liegenden hydrogeologischen Abstraktion ist durch die Abb. 49 aus MALOSZEWSKI & ZUBER (1982) gegeben.

MALOSZEWSKI & ZUBER halten nach den Ergebnissen ihrer vergleichenden Untersuchungen die Berechnungen mit dem von ihnen entwickelten Dispersionsmodell und dem Exponential-Piston-Flow-Modell für realistisch. EICHINGER (1982) verweist auf gute Erfahrungen mit dem Exponentialmodell (realistische Ergebnisse bei hydrologischen Anwendungen). In den im fol-

genden beschriebenen Anwendungen erweist sich das Exponentialmodell als genügend genau in der Erfassung und Wiedergabe der verschiedenen Grundwassersysteme.

Bei der Verwendung von Deuterium, Sauerstoff-18 und Tritium als Grundwassermarkierungen sind Wechselwirkungen mit dem Gestein des Grundwasserleiters, die zu einem verzögerten Tracerdurchgang führen, vernachlässigbar ("Ideale Tracer"), so daß für den Fall des konstanten Tracer-Inputs (C_{in}) in ein stationär strömendes Grundwassersystem der Tracer-Output (C_{out}) wie folgt beschrieben werden kann (MALOSZEWSKI & ZUBER 1982, S.211):

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-t') \exp(-\lambda t') g(t') dt' \quad (25)$$

oder

$$C_{out}(t) = \int_{-\infty}^t C_{in}(t') \exp(-\lambda (t-t')) g(t') dt' \quad (26)$$

C_{in} Tracer-Input-Konzentration
 C_{out} Tracer-Output-Konzentration
 λ Zerfallskonstante; in Jahre⁻¹
 t "Kalenderzeit"
 t' Fließzeit bzw. Verweildauer
 $g(t')$ "system response function" oder "weighting function": beschreibt die Verteilung der Verweilzeiten eines Tracers, der in das System zum Zeitpunkt $t=0$ eingetreten ist; in Jahre⁻¹

Bei der Verwendung eines radioaktiven Tracers vereinfacht sich die Formel für das Piston-Flow-Modell (PFM) und das Exponentialmodell (EM) nach ZUBER (1986, S.31) wie folgt.

Models, their weighting functions, parameters and some other characteristics

Model	Weighting function, $g(t)$	Parameters	Mean transit time of tracer, t_t	Variance
(1) Piston flow (PFM)	$\delta(t - T)$	T	T	0
(2) Exponential (EM) or good mixing	$T^{-1} \exp(-t/T)$	T	T	T^2
(3) Combined exponential and piston flow (EPM) or real system	$\begin{cases} (T/\eta)^{-1} \exp(-\eta t/T + \eta - 1), & \text{for } t \geq T(1 - \eta^{-1}), \\ 0 & \text{for } t < T(1 - \eta^{-1}) \end{cases}$	T, η	T	$(T/\eta)^2$
(4) Linear (LM)	$\begin{cases} 1/2T & \text{for } t \leq 2T \\ 0 & \text{for } t > 2T \end{cases}$	T	T	$0.833 T^2$
(5) Combined linear and piston flow (LPM)	$\begin{cases} \eta/2T & \text{for } T - T/\eta \leq t \leq T + T/\eta \\ 0 & \text{for other } t \end{cases}$	T, η	T	$0.833(T/\eta)^2$
(6) Finite state mixing-cell (FSM)	—	V_i, Q_i with a constraint $\sum^n V_i / \sum^n Q_i = T$ ($2n - 1$ parameters, when n is the number of cells in series)	T	
(7) Dispersive (DM)				
(a) C_{FF} case	$A t^{-1}$	$T, D/vx$	T	$T^2 (2D/vx)$
(b) C_{FR} case	$(2A - B) T^{-1}$	$T, D/vx$	$T(1 + D/vx)$	$T^2 \{2D/vx + 3(D/vx)^2\}$
(c) C_{RF} case	$0.5 A t^{-1} (1 + t/T)$	$T, D/vx$	$T(1 + D/vx)$	$T^2 \{2D/vx + 5(D/vx)^2\}$
(d) C_{RR} case	$A T^{-1}$	$T, D/vx$	$T(1 + 2D/vx)$	$T^2 \{2D/vx + 8(D/vx)^2\}$

$$A = (4\pi t D/vx T)^{-1/2} \exp[-T(1 - t/T)^2 vx/4Dt].$$

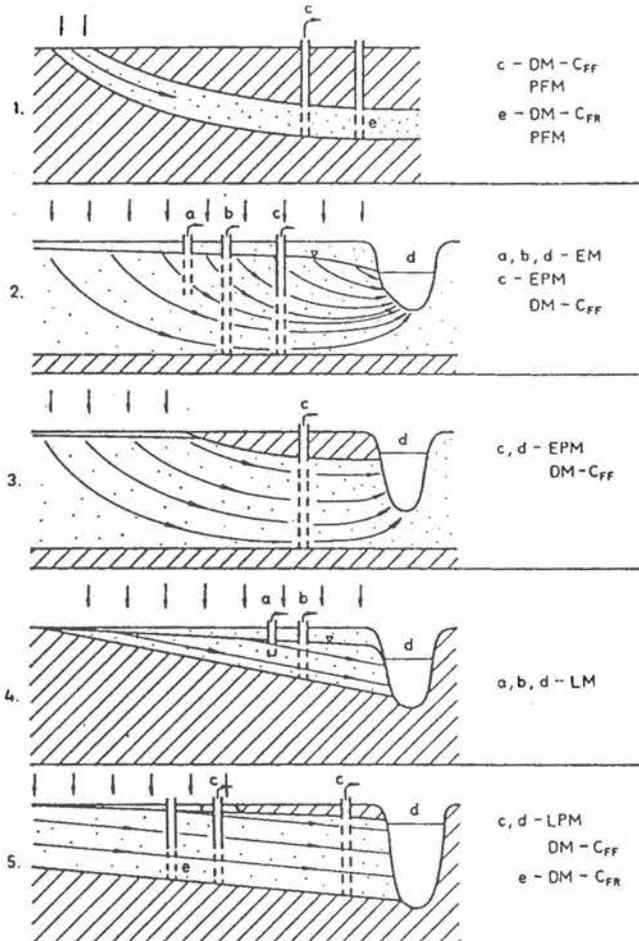
$$B = (vx/2D) \exp(vx/D) \operatorname{erfc}[(1 + t/T)(4tD/vx T)^{-1/2}].$$

Tab. 15: Daten zu "lumped-parameter"-Modellen aus ZUBER (1986)

5.2.3.1 Piston-Flow-Modell (PFM)

$$C_{out}/C_{in} = \exp(-\mathcal{E} \cdot MVZ) \quad (27) \quad \text{MVZ Mittlere Verweilzeit, "Turnover time of a system", "mean transit time"}$$

Für die Altersverteilung im Piston-Flow-Modell (Abb.49 Situation 1.c,e) wird angenommen, daß auf dem Weg des Tracers durch dem Untergrund keine Dispersion, keine Diffusion und kein Austausch stattfindet und die Tracerkonzentration nur durch den radioaktiven Zerfall verringert wird.



Schematic situations showing examples of possible applicability of particular models (Małoszewski and Zuber, 1982). Cases a, b, c, and d correspond to sampling in outflowing or abstracted water, thus the sampling is averaged by the flow rates (case C_{FF}). Case e corresponds to samples taken separately at different depth (e.g., during drilling) and next averaged by the depth intervals (case C_{FR}). Cross-sections: 1. A confined aquifer with a narrow recharge area far from the sampling points. Sampling either in the pumped out water (case c) or averaged across the aquifer depth (case e). 2. An unconfined aquifer. Sampling including flow lines with infinitesimal short transit times is shown as cases a, b, and d to which the exponential model applies. In the case of deeper sampling (c) EM is not applicable and either the dispersion model or the exponential-piston flow model have to be used. Similarly if the infiltration time through the unsaturated zone is not negligibly short in comparison with the total turnover time, EM is not applicable to cases shown as a, b, and d. 3. An aquifer confined in the downstream part. The unconfined volume has an exponential distribution of transit times whereas the confined part is approximated by the piston flow. The parameter η in EPM represents the ratio of the total volume to the volume of the exponential part. 4. An unconfined aquifer with linearly increasing depth. Negligible infiltration time (see description of cross-section 2). 5. An aquifer with linearly increasing depth in the unconfined part. The downstream part is confined and can be approximated by piston flow (see description of cross-section 3). In the case of sampling averaged across the aquifer depth (e), the C_{FR} version of the dispersion model should be applied (cf. case e in cross-section 1).

Abb. 49: Hydrogeologische Abstraktionen zu Modell-Ansätzen nach MALOSZEWSKI & ZUBER (1982)

5.2.3.2 Exponentialmodell (EM)

$$C_{\text{out}}/C_{\text{in}} = 1/(1 + \mathcal{E} \cdot \text{MVZ}) \quad (28)$$

Für die Altersverteilung im Exponentialmodell (Abb.49 Situation 2.a,b,d) wird angenommen, daß das Grundwasserreservoir aus den verschiedenen Niederschlägen der aufeinanderfolgenden Jahre gebildet wird, wobei die Mischungsanteile der Jahresniederschläge mit zunehmender Verweilzeit im Grundwasserleiter exponentiell abnehmen.

5.2.3.3 Exponential-Piston-Flow-Modell (EPM)

Die Kombination eines EM mit einem PFM (Abb.49 Situation 2.c und 3.c,d) beschreibt ein Grundwasserleitersystem, das im anstehenden Bereich durch ein EM repräsentiert wird, während im anschließenden überdeckten und dann auch gespannten Bereich die Altersverteilung in die eines PFM übergeht. Mit dem EPM läßt sich die MVZ und der Anteil der EM-Komponente am EPM-System (in %) berechnen. Diese Reihenschaltung von EM und PFM (EPM bei MALOSZEWSKI & ZUBER 1982; ZUBER 1986) wird bei RICHTER & SZYMCAK (1991) um die Möglichkeit einer Parallelschaltung von EM und PFM erweitert. Diese Konfiguration entspricht in etwa der Situation 2.c in Abb. 49, wobei eine ± deutliche Grundwasseraltersschichtung vorliegt. Dabei läßt sich die Altersverteilung im oberen Teil des Grundwasserleiters mit dem EM und die des tieferen Bereiches durch das PFM beschreiben. Die Mischung beider Komponenten erfolgt erst bei der Grundwasserentnahme (Aufschlußmischung).

Aus diesen Ausführungen und aus den Systemskizzen der Abb. 49 ist ersichtlich, daß das Grundwassersystem in Koerich am ehesten durch das Exponentialmodell und durch das kombinierte Exponential-Piston-Flow-Modell erfaßt wird. Bei den Berechnungen nach dem $\text{EPM}_{(\text{parallel})}$ mit MULTIS (RICHTER & SZYMCAK 1991) wird der PFM-Komponente der tritiumfreie Anteil am Mischungssystem in Koerich ("Tiefenwasser") zugeschrieben. Die Tritiumgehalte der Grundwasserproben aus Schaedhaff und Everlange werden mit dem EM bearbeitet.

Im Falle eines variablen Tracer-Inputs, hier z.B. Tritium, errechnet sich die Tracer-Inputfunktion, $C_{\text{in}}(t)$, aus gemittelten und über die Grundwasserneubildungsrate gewichteten ^3H -Konzentrationen der Niederschläge zu (ZUBER 1986, S.34):

$$C_{\text{in}} = \frac{\sum_{i=1}^{12} C_i \alpha_i P_i}{\sum_{i=1}^{12} \alpha_i P_i} \quad (29)$$

C_i mittlere ^3H -Konzentration im Niederschlag des i -ten Monats
 α_i Infiltrationskoeffizient des i -ten Monats
 P_i Niederschlagshöhe des i -ten Monats, in $\text{m} \cdot \text{Monat}^{-1}$

Unter der Annahme, daß die Grundwasserneubildungsrate der Sommermonate (s) einen Bruchteil der Wintermonate (w) ausmacht, erhält man:

$$C_{\text{in}} = \frac{(\alpha \sum C_i P_i)_s + (\sum C_i P_i)_w}{(\alpha \sum P_i)_s + (\sum P_i)_w} \quad (30)$$

Bei der Anwendung von ^3H -Gehalten werden somit bei monatlichen Inputdaten die Berechnungen des "direkten" bzw. "indirekten Problems" (weighting function, turnover time, MVZ) auf Jahresbasis durchgeführt. Liegen für die Berechnungen mit ^2H - und ^{18}O -Gehalten ge-

nügend gute Inputdatenreihen vor (siehe Abb.50), so kann in diesen Fällen monatsbezogen ausgewertet werden.

Die Berechnungen mit den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Quelle Frontzenberg, Qu10, wurden auf Monatsbasis durchgeführt.

5.2.3.4 Inputdaten für Modellrechnungen

Für die Berechnung der Mittleren Verweilzeit aus den ^2H - und ^{18}O -Gehalten der Grundwasserproben aus der Quelle Frontzenberg (Qu10) in Koerich wurden als Inputdaten die Monatsmittelwerte des Niederschlages der Station Trier der Jahre 1978-89 verwendet (Abb.50 oben und unten). Für die Monate vor 1978 (Jan.1953 bis Dez.1977) wurden die Mittelwerte des Jahres 1978 ($-57,4\text{‰}\delta^2\text{H}$; $-8,2\text{‰}\delta^{18}\text{O}$) eingesetzt und für die Monate nach 1989 (Jan.1990 bis Dez.1993) die Mittelwerte von 1989 ($-46,0\text{‰}\delta^2\text{H}$; $-6,8\text{‰}\delta^{18}\text{O}$). Zur Verdeutlichung des in diesen Niederschlagswerten steckenden Trends (vergl. Kap.5.1.2) sind zusätzlich die Jahresmittelwerte eingetragen.

Als Inputdatensatz (Abb.44) für die Berechnungen mit den ^3H -Gehalten der Grundwasserproben werden die ^3H -Jahresmittelwerte der Niederschlagsgehalte des Freiburger Raumes (KRÜGER 1989) verwendet, da diese Meßreihe den gesamten Zeitraum von 1953 bis 1993 erfaßt und diese ^3H -Gehalts-Zeitverteilung auch für den Mittelgebirgsraum (Wasserkuppe, Rhön) anwendbar ist (HEBERT et al. 1991). Ein Vergleich mit den Monatsmittelwerten der IAEA-Meßreihen der Stationen Koblenz (Aug.1974 bis Dez.1991) und Wasserkuppe/Rhön (Jan.1978 bis Dez.1991) bestätigt die generelle Vergleichbarkeit bzw. Anwendbarkeit der Meßreihen. Die aktuellen ^3H -Werte der Stationen Koblenz und Wasserkuppe/Rhön liegen um ca. 10 TU über denen aus Freiberg. Gute Übereinstimmung besteht für den ^3H -Peak in 1975, der, aus China kommend, den Westen Deutschlands nicht maßgeblich beeinflußt haben soll (mdl.Mitt. Dr. Eichinger, Fa. HYDROISOTOP). Inwieweit die an der Nordseeküste beobachtete Erhöhung der ^3H -Gehalte in den Niederschlägen nach Osten (bis in den Luxemburger Raum hinein) Auswirkungen hat, ist ebenfalls nicht verifizierbar. Berechnungen mit süddeutschen Niederschlagsdaten erbrachten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die gute Übereinstimmung der im folgenden weiter ausgeführten Berechnungen mit den Isotopengehalten der Quelle Frontzenberg, Qu10, (Tab.16, Abb.51, 52) läßt auf zutreffende ^3H -Inputdaten rückschließen.

5.2.3.5 Ergebnisse der Modellrechnungen

Als Ergebnis aus den Berechnungen (EM, EPM) mit MULTIS (RICHTER & SZYMCZAK 1991) erhält man nach Lösung des "inversen Problems" die Mittlere Verweilzeit (Tab.16) und eine graphische Darstellung der Outputfunktion (weighting function) für die Inputdaten im Bezug auf die Meßwerte (Abb.51, 52, 53).

Anhand dieser Mittleren Verweilzeiten ist eine Einordnung der Grundwässer und ihrer Neubildungszeiträume in die Gliederung des Quartärs möglich (siehe Kap.5.5).

Die Berechnungen mit dem EM und dem EPM zeigen neben genau übereinstimmenden Mittleren Verweilzeiten jeweils einen durch das EM beschriebenen Anteil am EPM-System von 100%. Das EM gibt somit eine genügend gute, realistische Beschreibung des Grundwassersystems in Koerich wieder.

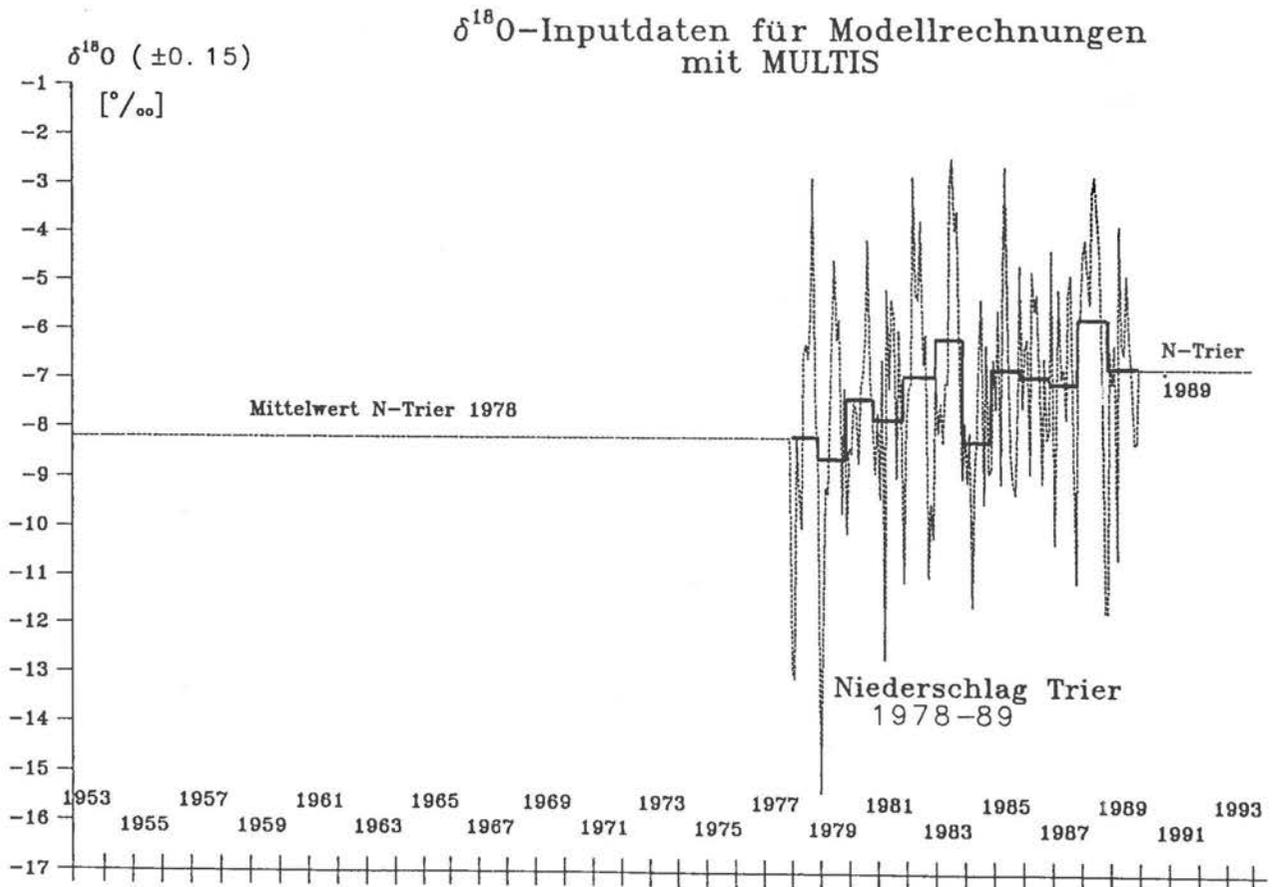
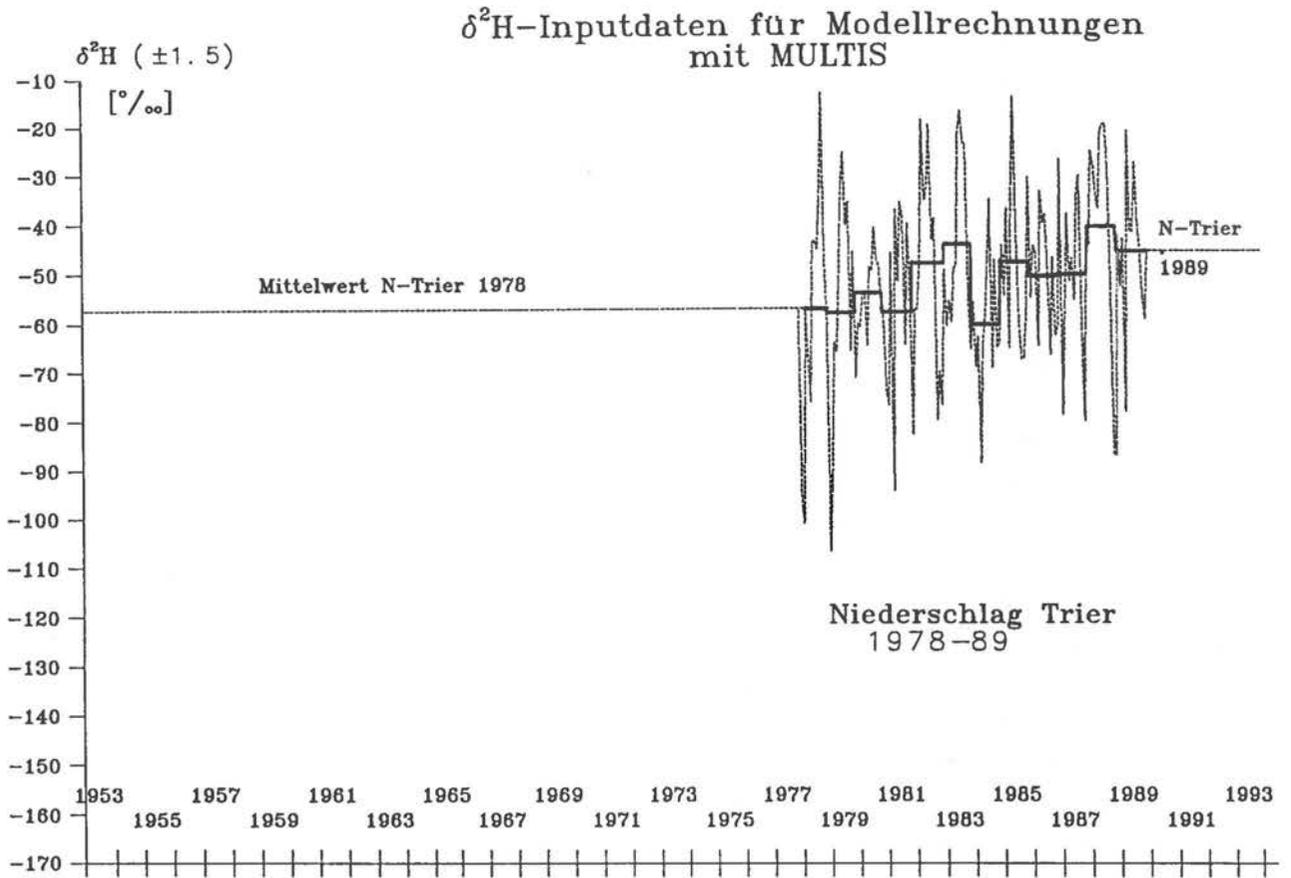
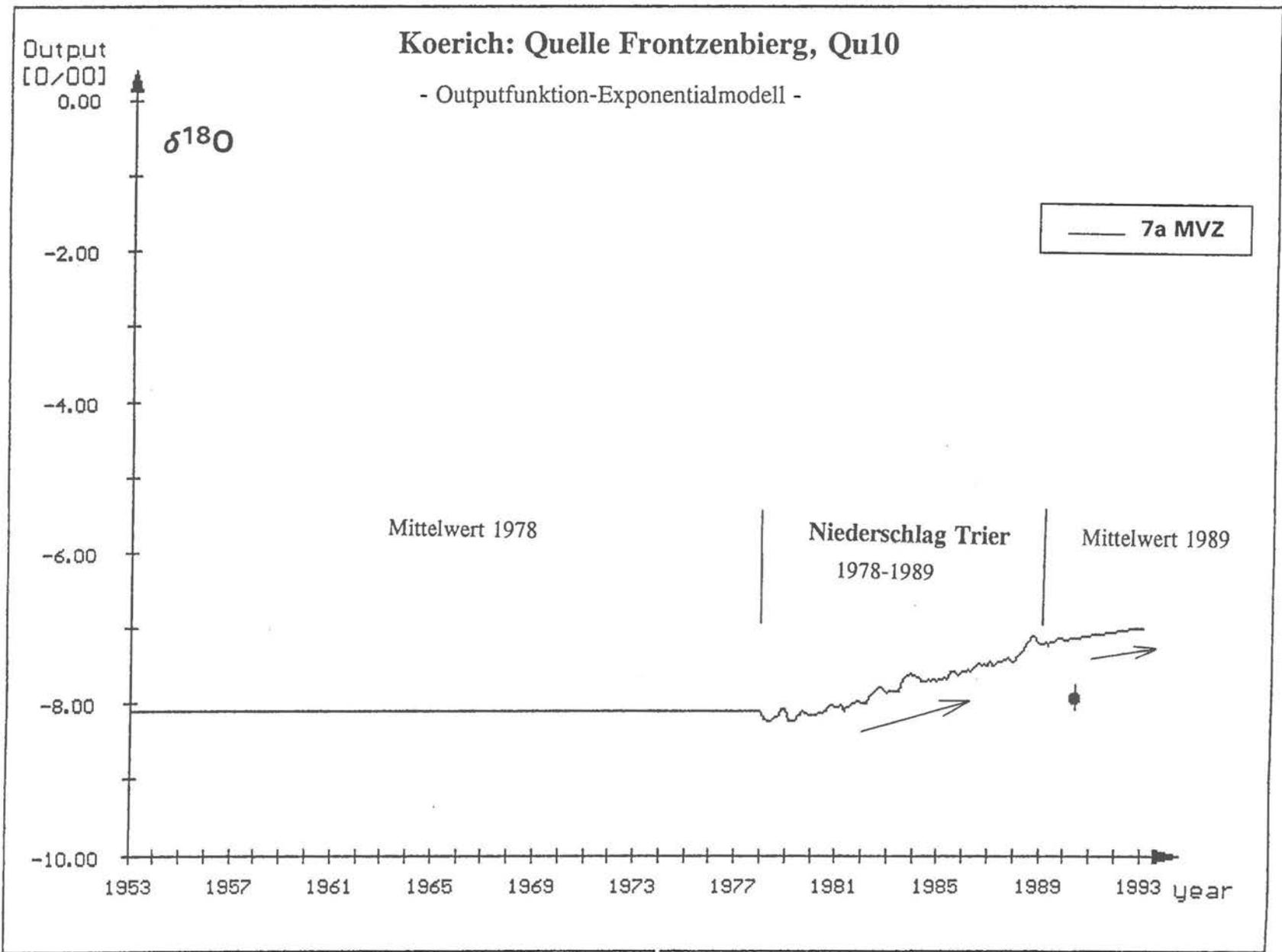
| Abb. 50: $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Inputdaten für Modellrechnungen

Abb. 51: Outputfunktion-Exponentialmodell zu $\delta^{18}\text{O}$ -Daten der Quelle Frontzenberg, Koerich



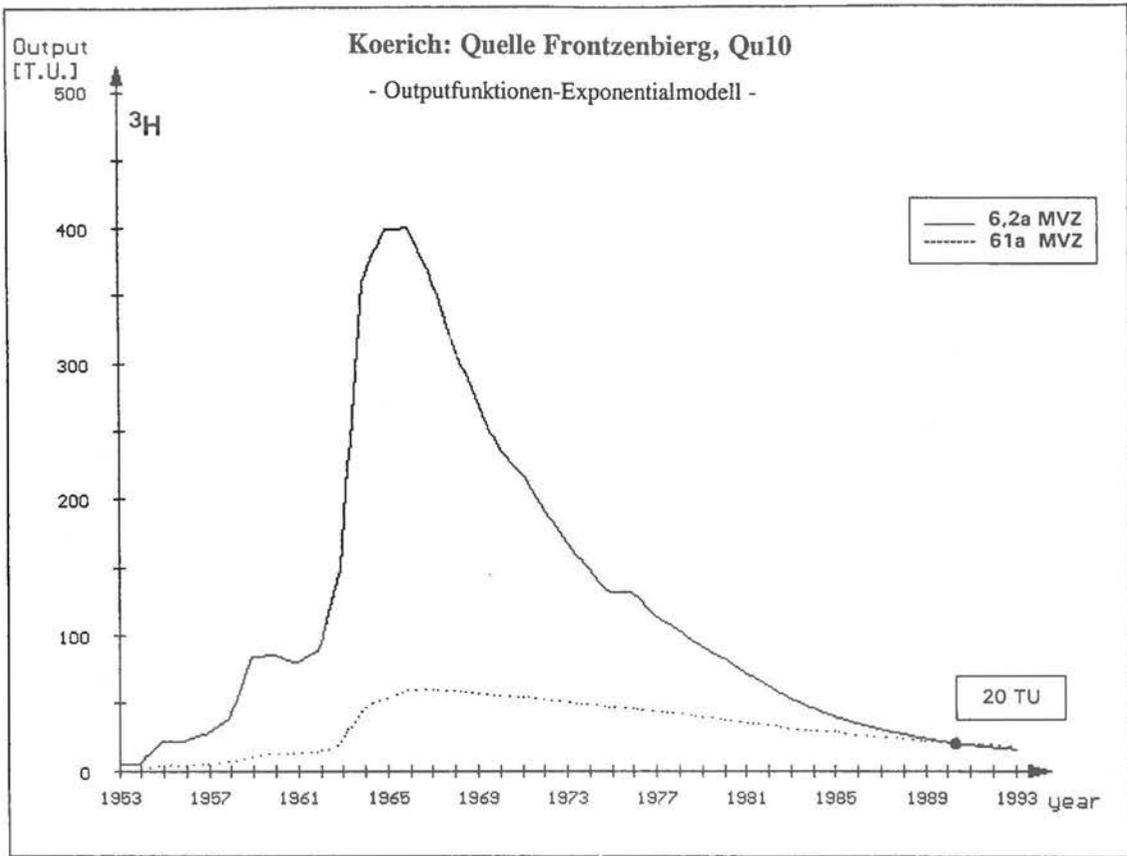


Abb. 52: Outputfunktion-Exponentialmodell zu ^3H -Daten der Quelle Frontzenberg, Koerich

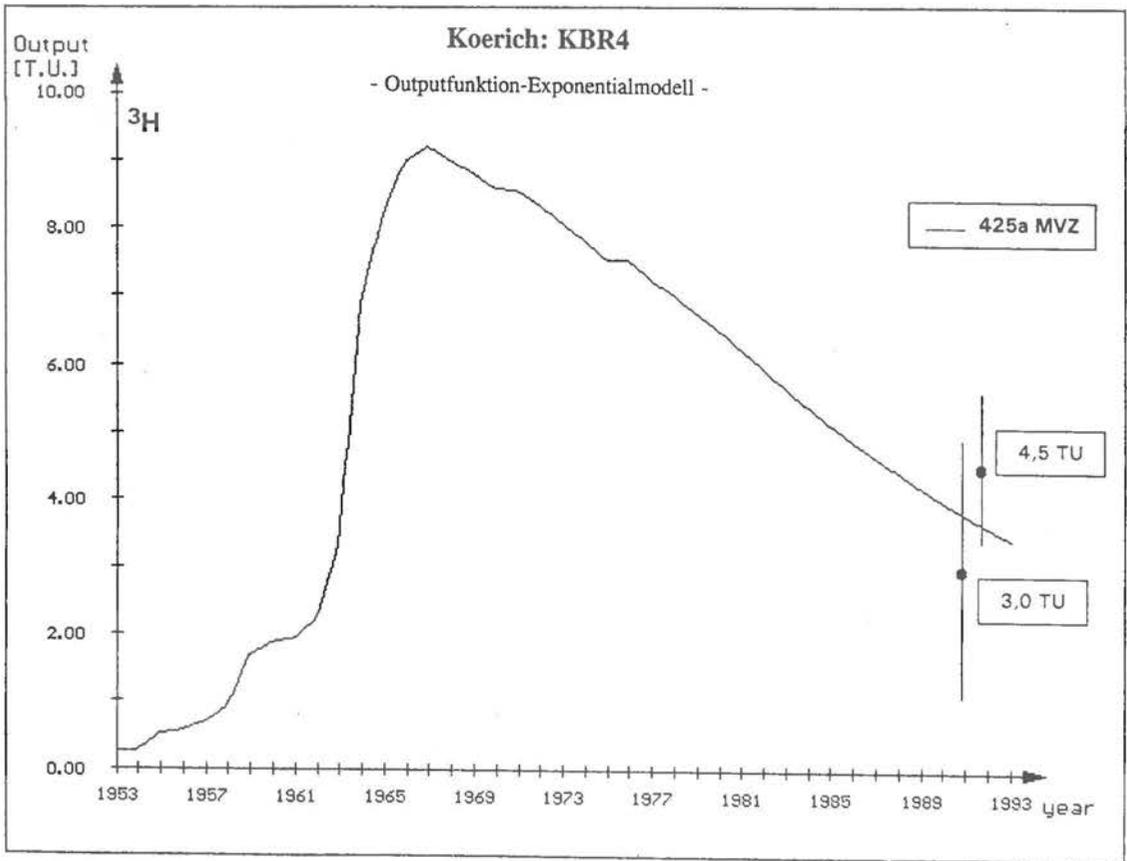


Abb. 53: Outputfunktion-Exponentialmodell zu ^3H -Daten aus Brunnen KBR4, Koerich

Mittlere Verweilzeiten nach Modellrechnungen mit MULTIS						
Bezeichn.	Isotop	Modell	MVZ	Modell	MVZ	Input Daten
Koerich						
Qu10	² H	EM	7,0 a			
	¹⁸ O	EM	7,0 a			
	³ H	EM	6,2 a	EM	62 a	20 TU
Qu11	³ H	EM	19,2 a	EPM*	19,2a EM100%	36;36 TU
Qu14	³ H	EM	14,7 a	EPM*	14,7a EM100%	32;25 TU
QuLauterb	³ H	EM	19,6 a			42,7 TU
KBR1	³ H	EM	19,1 a	EPM*	19,1a EM100%	s.Tab-Lux.
KBR2	³ H	EM	19,1 a	EPM*	19,1a EM100%	s.Tab-Lux.
KBR3 min.	³ H	EM	(240a) >40 a			6,1;7,0 TU
max.	³ H	EM	(149a) >40 a			9,6;9,8 TU
KBR4	³ H	EM	(425a) >40 a			3,0;4,5 TU
Schaedhaff						
6/91;	³ H	EM	78 a	EM	5,1 a	17,0±1,6 TU
9/91						14,5±1,7 TU
max. 6/91	³ H	EM	58 a	EM	7,1 a	19,5 TU
min. 9/91	³ H	EM	(109a) >40 a	EM	1,5 a	12,2 TU
Everlange						
E15-1	³ H	EM	(770a) >40 a			1,8;2,4 TU
E15-2	³ H	EM	(169a) >40 a			8,4;8,7 TU
E15-3	³ H	EM	(315a) >40 a			4,1;5,7 TU
E15-4	³ H	EM	(425a) >40 a			3,7;3,7 TU
E15-5	³ H	EM	(225a) >40 a			6,3;7,1 TU
E15-2,-3,	³ H	EM	(255a) >40 a		6/91	6,1±0,9 TU
-4,-5					9/91	5,8±1,0 TU
EM : Exponential-Modell						
EPM* : Exp.-Mod. mit Piston-Flow-Mod. (PM = 0 TU) parallel gekoppelt						

Tab. 16: Mittlere Verweilzeiten nach Modellrechnungen mit MULTIS

Die Doppeldeutigkeit des ³H-Verfahrens bei ³H-Gehalten von 12-20 TU wird an den Ergebnissen aus Schaedhaff verdeutlicht und für die Quelle Frontzenberg (Qu10) in Abb. 52 dargestellt.

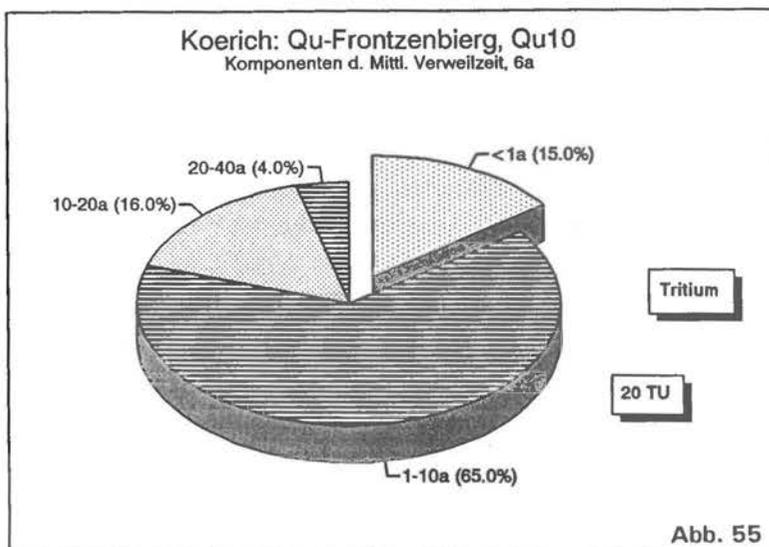
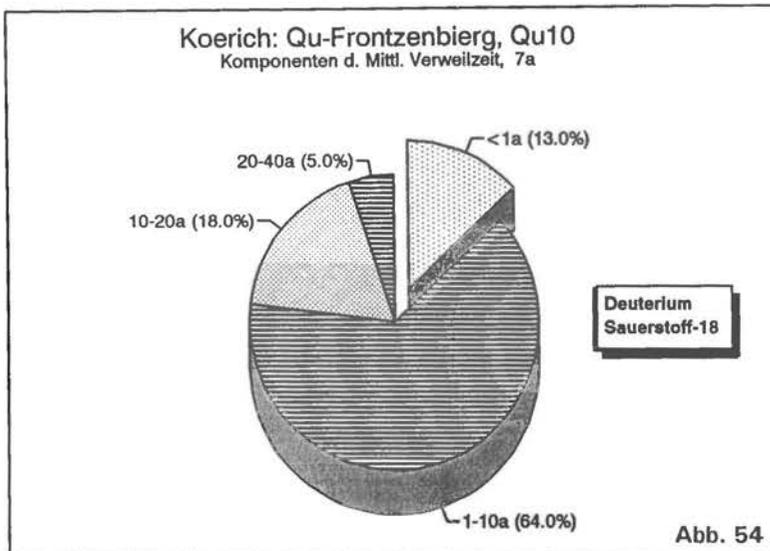
Die Abb. 51 zeigt am ¹⁸O-Gehalt aus Qu10 die Outputfunktion (MVZ 7a) für die Niederschlagsdaten aus Trier (Abb.50). Bei einem ausgeglichenen Kurvenverlauf bleibt der Trend zu weniger stark abgereicherten Werten in voller Größe erhalten und setzt sich trotz gleich großer Inputwerte (Mittelwert 1989) bei leichter Abschwächung fort. Der Meßwert wird mit seiner Meßgenauigkeit wiedergegeben. Die Berechnungen mit den ²H-Gehalten zeigen das gleiche Bild.

Die Doppeldeutigkeit des ³H-Verfahrens wird an der Graphik der Abb. 52 deutlich. Bei einem ³H-Gehalt von 20 TU (Qu10) zeigen die beiden Kurven Outputfunktionen nach dem EM bei 6,2 und 61 Jahren Mittlerer Verweilzeit. Hierbei sind die Kurvenverläufe gegenüber dem Input (Abb.50) geglättet, in der Amplitude verringert und in der Phase verschoben (Maxima 1965-66 bei ≈400 TU und ≈50 TU).

In Richtung geringer ³H-Gehalte (z.B. 3,0;4,5 TU aus KBR4) nimmt die Amplitudenverringerng und die Phasenverschiebung zu (Abb.53). So tritt ein maximaler ³H-Output von ≈9 TU erst in den Jahren 1966-67 auf.

5.2.3.6 Komponenten der Mittleren Verweilzeit (MVZ)

Aus der Annahme einer exponentiellen Verteilung der verschiedenen alten Komponenten eines Grundwassersystems lassen sich über das Exponentialmodell Mischungsanteile einer Komponente, die jünger als ein jeweils festzulegendes Grundwasseralter (z.B. 40 Jahre) ist, ausgliedern (u.a. bei: HEBERT et al. 1992a, 1992b, JORDAN et al. 1988, als sog. Jungwasseranteil bezeichnet). Auf dieser Basis wurden die die MVZ bestimmenden Mischungsanteile der beteiligten Grundwasseralterskomponenten prozentual berechnet und graphisch dargestellt (Abb.54 bis 70). Die Mittlere Verweilzeit wird im wesentlichen durch eine sehr junge (aktuelle) Mischungskomponente und/oder durch eine alte, bei der ^3H -Methode tritiumfreie Komponente geprägt. Vor diesem Hintergrund und weil "tritiumfrei" im striktesten Fall "älter als 40 Jahre" bedeutet, werden 5 Klassen Mittlerer Verweilzeiten (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) gebildet. Aus den Berechnungen mit den Daten aus Everlange wird deutlich, daß bei geringen ^3H -Gehalten (1,8 und 2,4 TU E15-1, tritiumfrei, Grenzfall im Bereich der Meßgenauigkeit) die Grenze zur Ausweisung einer "Klasse Mittlerer Verweilzeiten" bei 4-5% liegt.



Koerich

Abb.54, Abb.55: Qu-Frontzenberg, Qu10

Die außerordentlich gute Übereinstimmung der Mittleren Verweilzeit aus den Modellrechnungen mit den ^2H -, ^{18}O - und ^3H -Gehalten (7; 7 und 6,2 Jahre MVZ) wird durch die geringen Abweichungen in der Komponentenverteilung deutlich. Der Unterschied in der MVZ von einem Jahr kommt in einer 2%igen Differenz im Anteil der aktuellen Komponente (< 1a) zum Ausdruck. Ein tritiumfreier Anteil tritt nicht auf, da modellansatzbedingte rechnerische Mischungsanteile < 1% nicht ausgewiesen werden. Die Komponente mit hohen ^3H -Gehalten (20-40 TU, Tritiumpeak) ist mit 4% an der MVZ nur untergeordnet beteiligt.

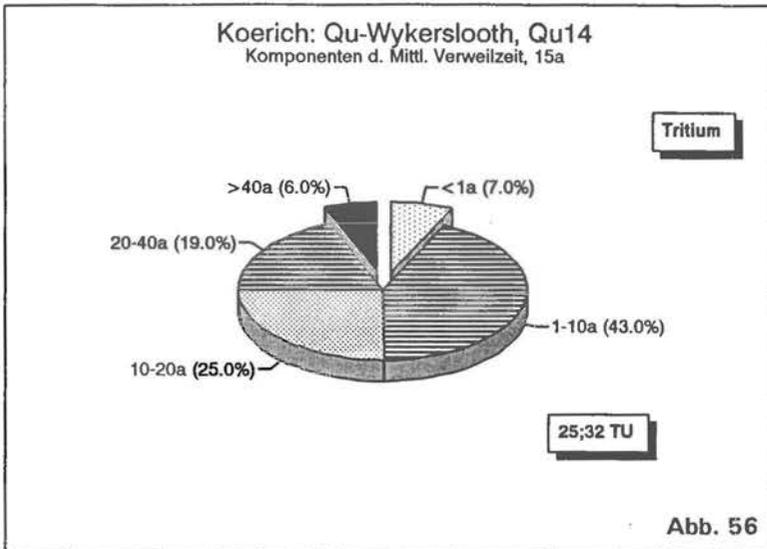


Abb. 56: Qu-Wykerslooth, Qu14

Die tritiumfreie Komponente (>40a) tritt im Grundwasser der Quelle Wykerslooth, Qu14, mit 6% auf. Die Komponente mit den Tritium-Inputpeak (20-40a) ist mit 19% vertreten, so daß die Komponenten mit geringem ^3H -Input mit 75% ausschlaggebend für die MVZ und für den ^3H -Output (25; 32 TU) sind.

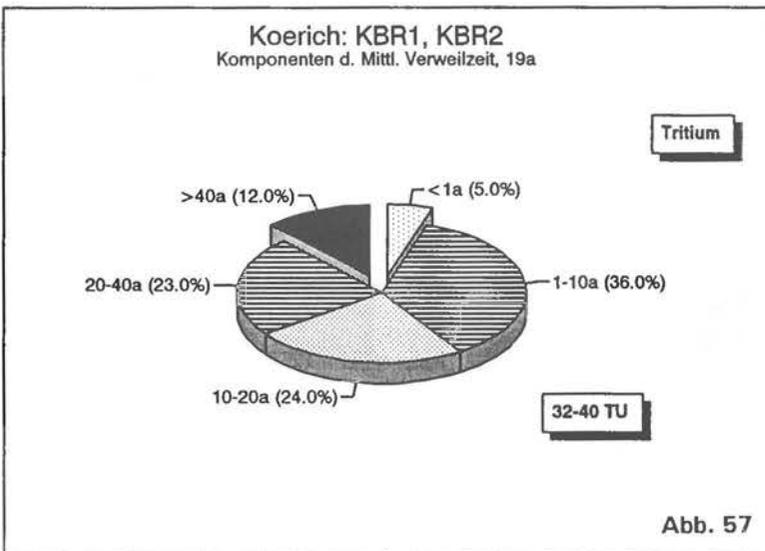
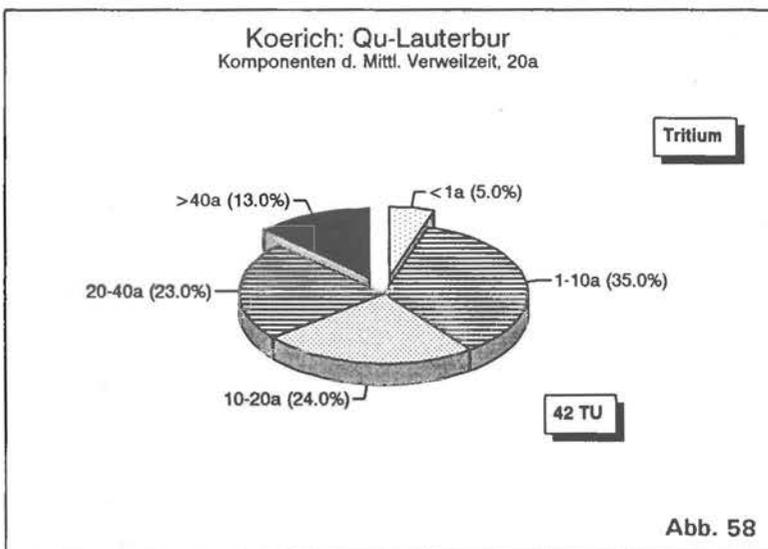


Abb. 57, Abb. 58, Abb. 59: KBR1, KBR2, Qu-Lauterbur, Qu-Peiffer

Die Grundwässer der gut durchmischten Eisch-Talaeue KBR1 und KBR2 und die Quelle Lauterbur lassen sich mit der orographisch höher gelegenen Quelle Peiffer (Qu11) zusammenfassen. Die Mittleren Verweilzeiten liegen bei 19-20 Jahren, die ^3H -Gehalte zwischen 32-42 TU, und die beiden Komponenten "<1a" bzw. ">40a" liegen bei 5% bzw. 12-13%. Der für die relativ hohen ^3H -Gehalte maßgebende Anteil der "20-40a"-Komponente (Tritiumpeak) macht 23% aus.



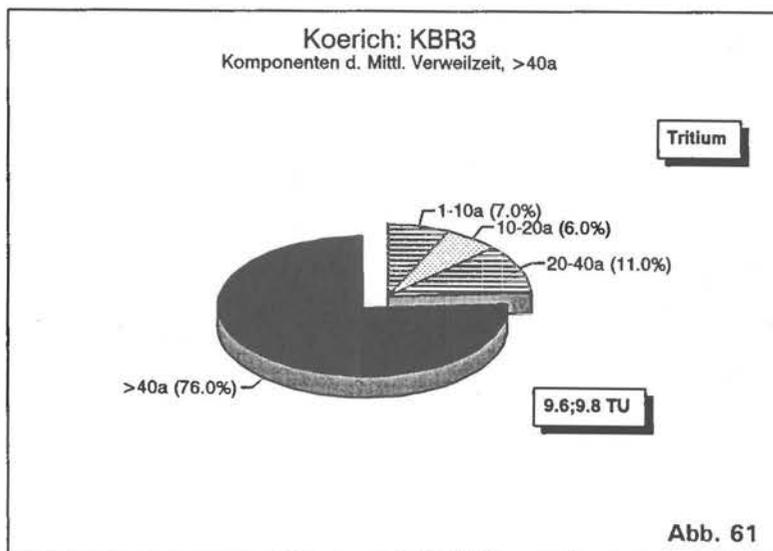
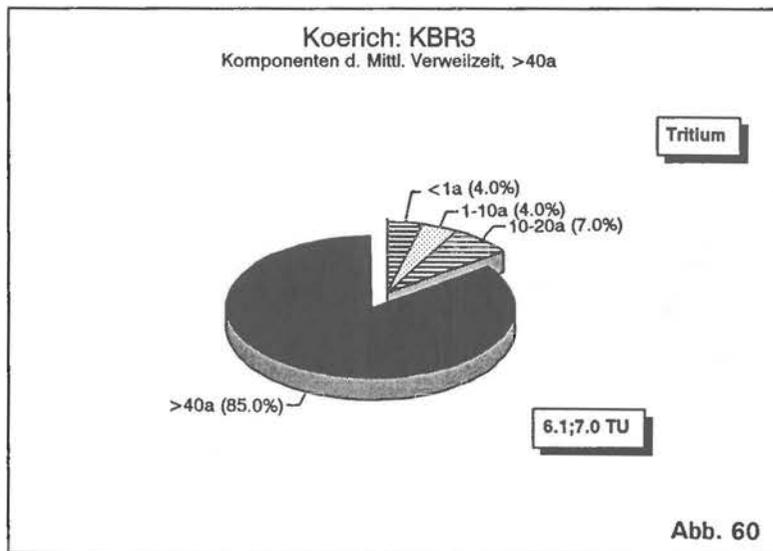
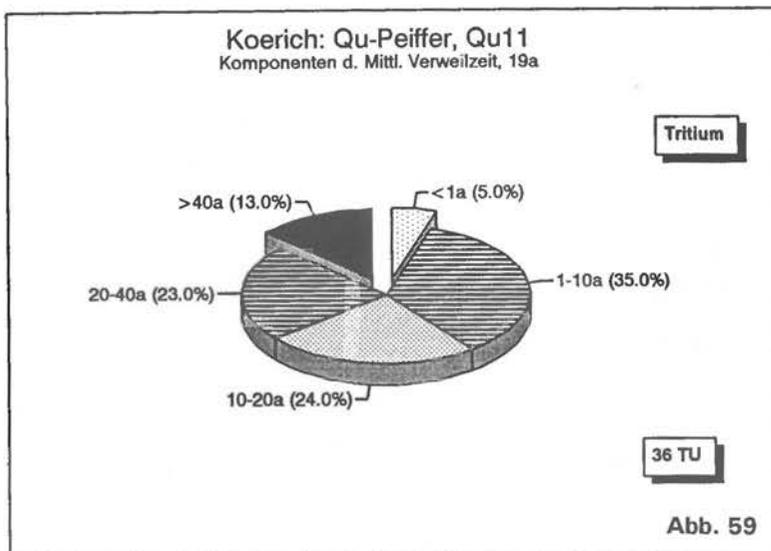
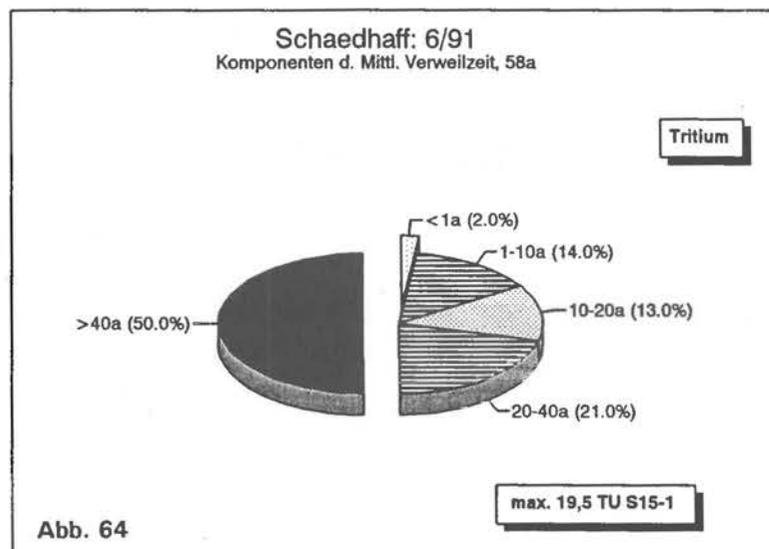
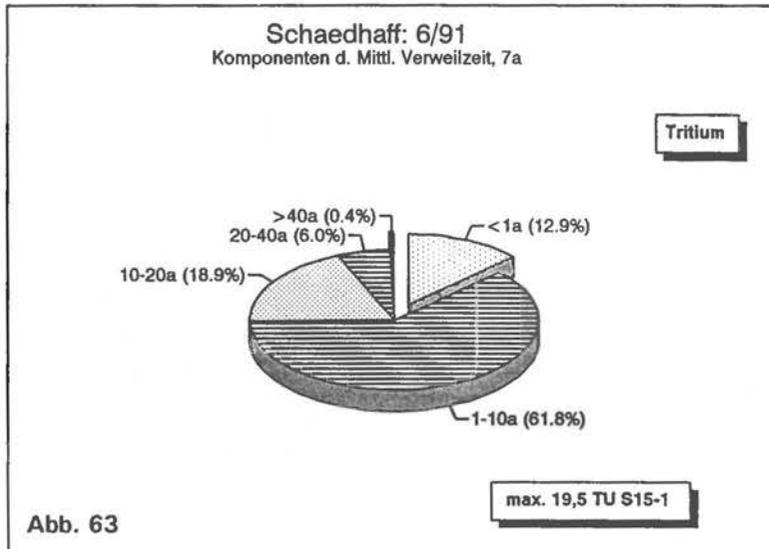
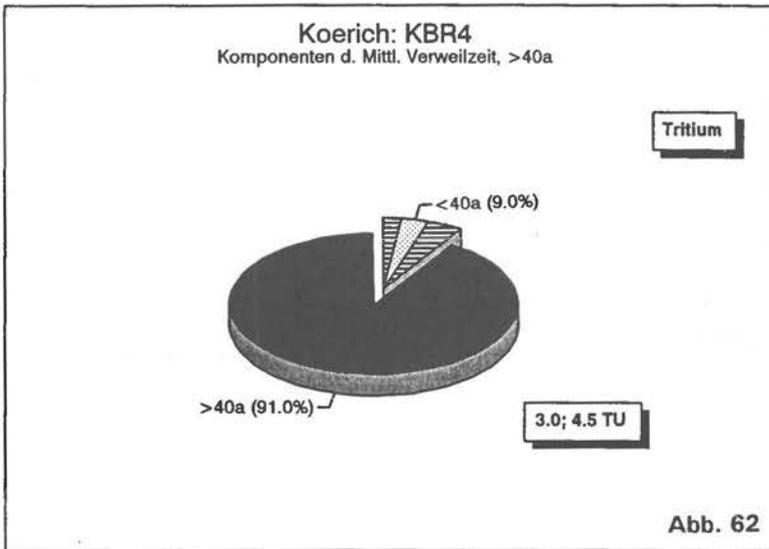


Abb. 60, Abb. 61: KBR3

Die MVZ des Grundwassers aus KBR3 mit mehr als 40 Jahren spiegelt sich im Anteil der Komponente ">40a" wider. Im Laufe der Grundwasserentnahmen stiegen die ^3H -Gehalte (Output) von 6,1;7,0 TU auf 9,6;9,8 TU. In der Grundwasserkomponentenverteilung kommt dies durch einen Anstieg der Komponenten "jünger 40a" von 15% auf 24% zum Ausdruck.

Abb. 62: KBR4

Durch die Grundwasserentnahmen ist auch in KBR4 ein Anstieg des ^3H -Gehaltes von tritiumfrei nach 4,5 TU aufgetreten. So besteht am Ende der Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge* bei ^3H -Gehalten von 3,0;4,5 TU 9% des Grundwassers aus KBR4 aus Mischungskomponenten, die "jünger als 40a" sind.

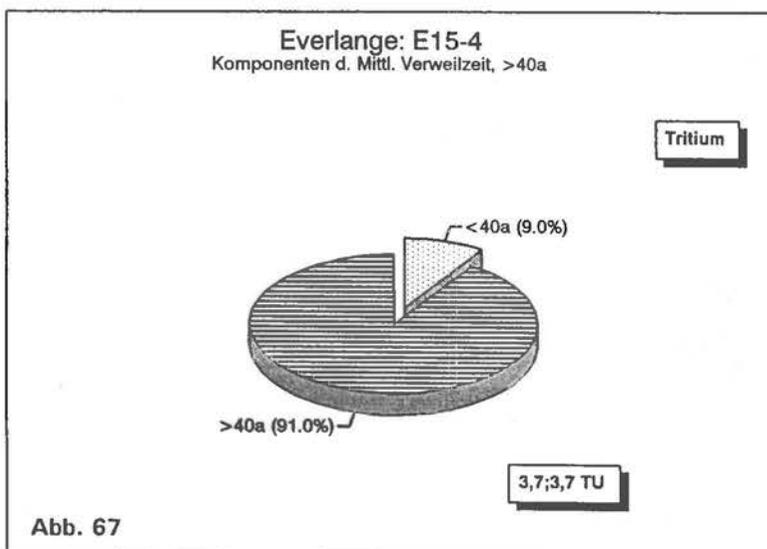
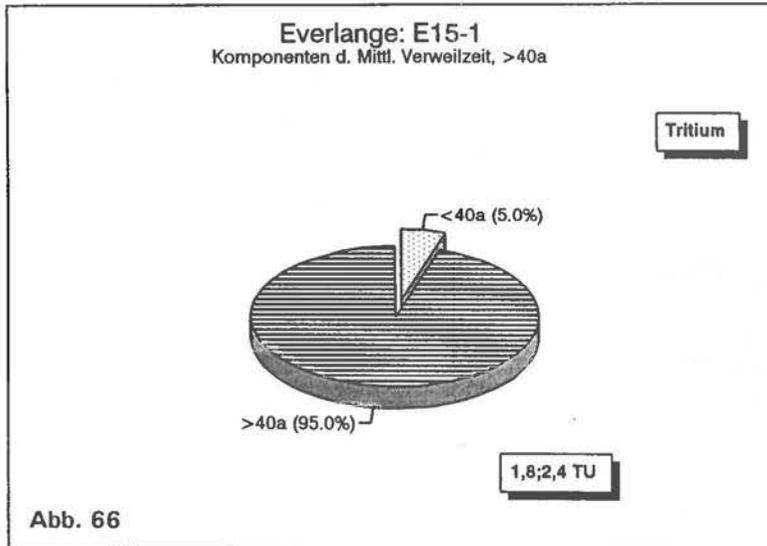
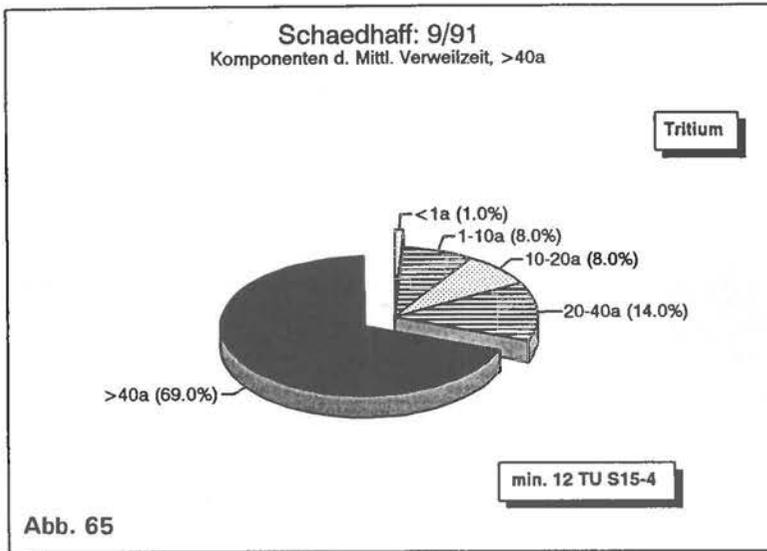


Schaedhaff

Die ^3H -Gehalte der Grundwasserproben aus Schaedhaff sind in Abb. 47 über die Klasse 10-20 TU ohne signifikante Unterschiede verteilt. Die Schwankungen liegen zwischen den Extrema: 19,5 TU in Brunnen S15-1 (Abb.63 und 64) der Beprobung vor den Grundwasserentnahmen der *solution de recharge* (6/91) und 12 TU in Brunnen S15-4 (Abb.65) der Beprobung am Ende des Entnahmezeitraumes (9/91). Aus der Mittelwertbildung der ^3H -Gehalte der beiden Probenmeserien wird eine entnahmebedingte Abnahme der ^3H -Gehalte von $17,0 \pm 1,6$ TU 6/91 nach $14,5 \pm 1,7$ TU 9/91 (vergl. Tab.12) sichtbar.

Für eine weitere Auswertung muß zunächst auf die Doppeldeutigkeit der Aussagen der ^3H -Methode bei Outputwerten von 12-20 TU eingegangen werden. So errechnet sich unter Anwendung des EM für den Meßwert von 19,5 TU (E15-1, 6/91) die MVZ zu 58 bzw. 7 Jahren. Aus Abb. 63 und Abb. 64 ist ersichtlich, daß dabei die beiden maßgebenden Grundwassermischungs-komponenten ">40a" und "<1a" von 0,4% modellansatzbedingt bis zu 50% schwanken. Die Übertragbarkeit dieser Berechnungen auf den Standort muß über die hydrogeologischen Rahmenbedingungen abgeklärt werden.

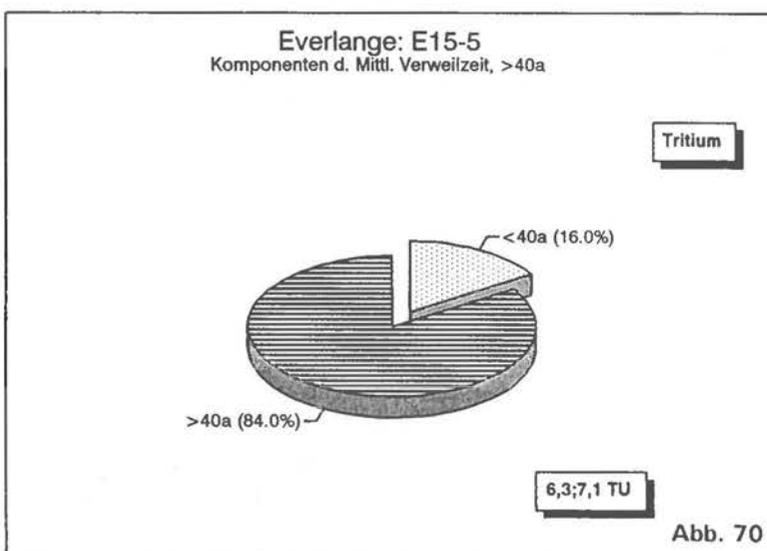
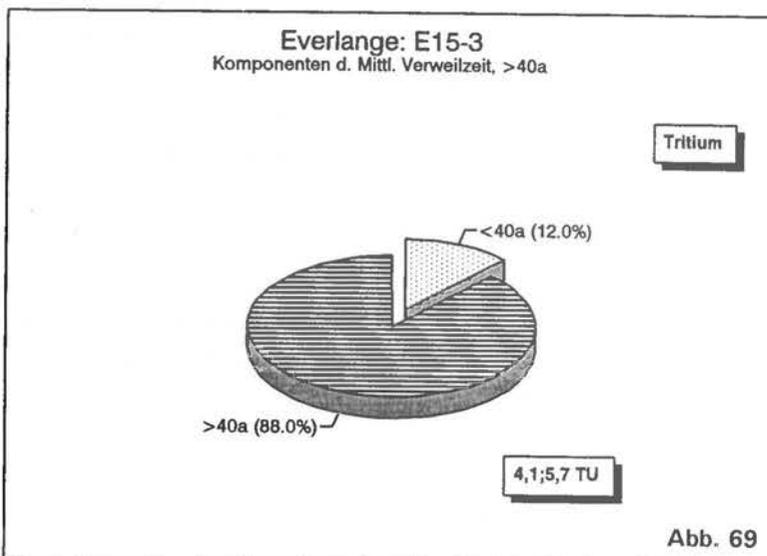
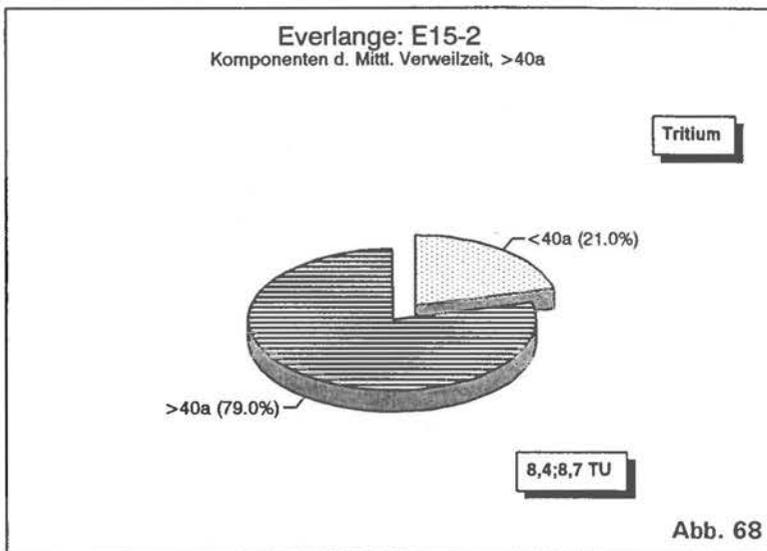
Die hydraulischen Strömungsbedingungen dieses



gespannten und lokal artesischen Grundwassersystems aus Luxemburger Sandstein haben sich durch die Grundwasserentnahmen nicht geändert, so daß ein \pm direkter Eintrag und Austausch von Niederschlags- bzw. Oberflächenwässern (MVZ "<1a") ins Grundwasserreservoir nicht denkbar ist, zumal aus den Untersuchungen an den Quellen des offenen Grundwassersystems in Koerich die kürzesten Mittleren Verweilzeiten einige Jahre betragen (6-7a MVZ: Qu10). Eine Zunahme der Mittleren Verweilzeiten von 58a auf 109a durch eine entnahmebedingte verstärkte Anströmung von altem, tritiumfreiem Grundwasser des tieferen Aquiferbereiches befindet sich im Einklang mit den hydraulischen Rahmenbedingungen. Somit erscheint eine MVZ von 78 Jahren als Mittelwert aller Brunnen über den Entnahmezeitraum als realistisch.

Everlange

Die ^3H -Gehalte der Grundwasserproben aus Everlange variieren zwischen 1,8 TU (E15-1) und 7,1 TU (E15-5). Die Meßwerte aus E15-1 sind gegenüber denen aus den anderen Brunnen leicht abgesetzt (Abb.47). Aus den Berechnungen der MVZ ergeben sich eindeutige Ergebnisse mit Mittleren Verweilzeiten von 169 Jahren (E15-2) bis 770 Jahren (E15-1). Mit diesen Größenordnungen



ist die Aussagekraft des Exponentialmodells überstrapaziert, so daß als MVZ die Angabe ">40a" eingesetzt wird. In den Graphiken zur Verteilung der Komponenten der MVZ werden zwei Klassen ausgeschieden: ">40a" und "<40a".

Abb. 66, Abb. 67: E15-1, E15-4

Mit Mischungsanteilen der Komponente ">40a" von 95% und 91% lassen sich E15-1 und E15-4 zusammenfassen. Mit einer MVZ von 770 Jahren und einem Mischungsanteil an Grundwasserkomponenten "jünger 40 Jahre" von 5% ist das Grundwasser aus E15-1 mit Abstand das älteste, wobei die Aussagemöglichkeiten dieser Methode ausgereizt sind.

Abb. 68 bis 70: E15-2, E15-3, E15-5

Die Grundwässer der Brunnen E15-2, E15-3 und E15-5 weisen keine deutlichen Unterschiede auf.

Die Mittelwerte (E15-2, -3, -4, -5) über die beiden Probenahmeserien (6/91, 9/91) am Anfang und Ende der Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge* lassen keine Veränderungen deutlich werden, so daß der Mittelwert für die MVZ von 255a als realistisch anzusehen ist.

5.3 Kohlenstoff-14 (^{14}C) ; Kohlenstoff-13 (^{13}C)

Mit Hilfe des radioaktiven ^{14}C -Isotopes lassen sich Grundwasseralter zwischen tausend und wenigen zehntausend Jahren bestimmen. Für diesen (Grundwasser-) Altersbereich gibt es keine Alternative zur ^{14}C -Datierung (EICHINGER 1982). Grundlage für die ^{14}C -Methode bildet das Zerfallsgesetz. Da Kohlenstoffatome auch im Grundwasser einem Austausch unterliegen, muß dieser über die $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Relation überprüft bzw. gegebenenfalls korrigiert werden.

Die Meßergebnisse der ^{13}C -Isotopengehaltsbestimmungen werden in der δ -Notation in ‰ gegenüber dem PDB-Standard (Peedee Belemnite Formation; Kalkstein) angegeben. Die Isotopenkonzentration $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des Standards beträgt $\approx 1120 \cdot 10^{-6}$.

Kohlenstoff-14 wird laufend, wie ^3H , in der höheren Atmosphäre durch kosmische Strahlung erzeugt, zu $^{14}\text{CO}_2$ oxidiert und gelangt dann über den Niederschlag direkt oder über die Biosphäre in die Hydrosphäre.

Als Meßbezugsgröße wird der "Rezentstandard", definitionsgemäß 100 % modern, verwendet. Er entspricht der natürlichen ^{14}C -Aktivität von Holz aus dem Jahre 1860, bei einer Zerfallskorrektur auf den Meßzeitpunkt (EICHINGER 1982, S.2). Diese Aktivität entspricht 13,56 Zerfällen pro Minute und Gramm Kohlenstoff (dpm/gC). Die spezifische Aktivität des Rezentstandards beträgt per Definition 95% der spezifischen Aktivität der Oxalsäure des National Bureau of Standard, Washington (Literaturhinweise z.B. bei MOSER & RAUERT 1980, S.45).

Die Konzentration des ^{14}C im CO_2 der Luft wird, außer den nur geringen Schwankungen in der Produktion (De Vries-Effekt, bedingt durch Schwankungen in der Sonnenaktivität und im erdmagnetischen Feld), hauptsächlich durch den Suesseffekt und den Kernwaffeneffekt beeinflusst. Die ^{14}C -Abnahme von 2-3 % modern und die deutliche Verringerung von etwa 2‰ im $\delta^{13}\text{C}$ -Wert des atmosphärischen CO_2 durch die seit der Jahrhundertwende stattfindende Emission von CO_2 aus der Verbrennung fossiler (^{14}C -freier und ^{13}C -abgereicherter) Kohlenstoffprodukte wird durch den Suesseffekt beschrieben. Die Kernwaffenversuche der 50er Jahre führten bis zu einer Verdoppelung des ^{14}C -Gehaltes im atmosphärischen CO_2 in den Jahren 1963/64, der seitdem wieder abnimmt (z.B. MOSER & RAUERT 1980).

Die Verwendung der sog. Radiokohlenstoff-Methode, ^{14}C -Methode, zur Altersbestimmung beruht auf der Anwendung des Zerfallsgesetzes.

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{mit} \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad (31)$$

A = Anzahl der nach der Zeit t vorhandenen radioaktiven Atome

A_0 = Anzahl der nach der Zeit $t=0$ vorhandenen radioaktiven Atome

λ = Zerfallskonstante

$T_{1/2}$ = Halbwertszeit

Die Halbwertszeit für ^{14}C beträgt 5730 Jahre.

5.3.1 Meßergebnisse

Die Probenaufbereitung wurde vom Verfasser direkt im Anschluß an die Probennahme im Labor des Service Géologique de Luxembourg nach dem Fällungsverfahren (Zugabe von karbonatfreier NaOH und Fällung mit $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) durchgeführt. Angaben über die Aufbereitung von im August 1988, nach Erstellung der Brunnen, durch den Service Géologique de Luxembourg entnommenen Proben liegen nicht vor, so daß aufbereitungsbedingte oder von geringen Trüb-

stoffgehalten herrührende Einflüsse auf die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte dieser Proben (nicht zuletzt wegen der abweichenden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte) nicht ausgeschlossen werden können.

Die Meßgenauigkeit der $\delta^{13}\text{C}$ -Angaben liegt bei $\pm 0,2\text{‰}$ (2σ bereits einbezogen). Die Meßgenauigkeit der ^{14}C -Gehaltsangaben variiert, je nach Probenalter und zur Verfügung stehendem Kohlenstoffgewicht. Der jeweils angegebene Schwankungsbereich ist mit 2σ berechnet.

Die Meßwerte der ^{13}C - und ^{14}C -Isotopengehaltsbestimmungen sind mit den entsprechenden Beprobungsstellen und Beprobungszeitpunkten in den Tabellen ISOTOPEN-Daten Luxemburg im Anhang aufgelistet.

Die ^{14}C -Gehalte der Proben aus **Trois Pons** und **Koerich** liegen zwischen 29 ± 3 %modern und $53,6 \pm 0,8$ %modern. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte schwanken zwischen $-13,09 \pm 0,2 \text{‰}$ und $-14,48 \pm 0,2 \text{‰}$. Die beiden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der 1988 durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (Prof. Dr. M.A. GEYH), Hannover gemessenen Proben aus TPBR1 und TPBR5 haben $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte von $-12,1 \text{‰}$ bzw $-12,2 \text{‰}$.

Die Probe **Br.-Sidor** hat die Gehalte: $^{14}\text{C} < 2$ %modern; $\delta^{13}\text{C} -10,71 \pm 0,2 \text{‰}$.

5.3.2 Bestimmung des GwModellalters nach der ^{14}C -Methode

Für die Anwendung der ^{14}C -Methode zur Grundwasseraltersbestimmung wird die MÜNNICH'sche Modellvorstellung, nach der das Regenwasser beim Durchsickern der Bodenschichten biogenes, ^{14}C -haltiges CO_2 aufnimmt und anschließend ^{14}C -freies Gesteinskarbonat auflöst, zugrundegelegt (MÜNNICH 1957, EICHINGER & MERKEL 1992).

Bereits hieraus wird das Problem einer möglichst präzisen Bestimmung des ^{14}C -Anfangsgehaltes deutlich. Zu diesem Zweck muß der Kohlenstoffhaushalt des jeweiligen Grundwassers mit seiner Isotopenfraktionierung und seinem Isotopenaustausch sowie den physikalisch-chemischen Rahmenbedingungen möglichst gut bekannt sein.

Je nach Herkunft des anorganischen Kohlenstoffs weist dieser bestimmte ^{13}C -Gehalte auf. Dem biogenen CO_2 der Wurzelatmung wird ein $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von -23‰ und dem des Gesteinskarbonates von 0‰ $\delta^{13}\text{C}$ zugeordnet (vergl. EICHINGER 1982, S.14). Aus diesen charakteristischen Variationen in den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten werden mit Hilfe des Isotopenmischungsmodells (sog. $\delta^{13}\text{C}$ -Korrekturmodell) Rückschlüsse auf Kohlenstoff- und Isotopengehaltsänderungen gezogen, um hieraus wiederum den ^{14}C -Anfangsgehalt ($A_{0\text{-Isot.}}$) zu bestimmen. Das Chemiemischungsmodell ermittelt aus Konzentrationen der in einer Grundwasserprobe gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen und deren Verhältnis zum rezenten ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre einen ^{14}C -Anfangsgehalt ($A_{0\text{-Chem.}}$).

Diese beiden hier angewendeten sog. "einfachen Modelle" zur Bestimmung des ^{14}C -Anfangsgehaltes werden zusammen mit detaillierteren bzw. aufwendigeren Modellen (MOOK 1972, 1976; FONTES & GARNIER 1979; REARDON & FRITZ 1978; WIGLEY et al. 1978) bei EICHINGER 1982 diskutiert. Mit diesen Anfangsgehalten wird dann unter Verwendung des Zerfallsgesetzes das jeweilige Grundwasseralter der Probe berechnet. Da Grundwasserproben zumeist ein Mischprodukt verschieden alter Grundwasserkomponenten repräsentieren, sind die Altersangaben als "Verweilzeit" des jeweiligen Grundwassers im Untergrund anzusehen. Diese Modellauswahl ist eine Fortsetzung der beim Tritiumverfahren begonnenen modellmäßigen Beschreibung der Grundwasserströmung, bei der die junge Komponente mit dem Exponentialmodell und die alte, tritiumfreie Komponente mit dem Piston-Flow-Modell beschrieben wird (vergl. EPFM). Somit wird die isotopische Entwicklung des Tiefengrundwassers aus Trois Pons durch das Chemie- und das Isotopenmischungsmodell als "piston-flow" in Richtung Grundwasserabströmung beschrieben.

5.3.2.1 Chemiemischungsmodell

Entsprechend dem Eintrag von anorganischem Kohlenstoff ins Grundwasser (Luft/Boden/Gestein des Grundwasserleiters) wird, in Anlehnung an das Kalk-Kohlensäure-Verhältnis bzw. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (SIGG & STUMM 1991), aus den Konzentrationen der in der Grundwasserprobe analysierten Kohlenstoffverbindungen ein Mischungsverhältnis aufgestellt, das unter Bezug auf die rezenten ^{14}C -Konzentration einen ^{14}C -Anfangsgehalt ($A_{0\text{-Chem.}}$) angibt. Dieses auch als TAMERS-Modell bezeichnete Verfahren wurde von INGERSON & PEARSON (1964) vorgeschlagen und von TAMERS (1967, 1975) sowie von TAMERS & SCHARPENSEEL (1970) ausführlich diskutiert.

$$A_{0\text{-Chem.}} = \frac{\{\text{CO}_2\text{ aq}\} + \frac{1}{2}\{\text{HCO}_3^-\}}{\text{DIC}} \cdot A_{\text{Gas}} \quad (32)$$

$A_{\text{Gas}} = \text{def.} = 100\% \text{ modern} = A_{\text{CO}_2\text{-Atmosphäre}}$
 $\{ \}$: Konzentrationen aus wasserchem. Analysen
 DIC : im Wasser gelöste anorganische Kohlenstoffkonzentration (dissolved inorganic carbon)

5.3.2.2 Isotopenmischungsmodell

Unter der Annahme, daß sich ^{14}C und ^{13}C in ihrem physikalisch-chemischen Verhalten nicht unterscheiden, läßt sich mit dem von INGERSON & PEARSON (1964) und PEARSON (1965) vorgeschlagenen Isotopenmischungsmodell (sog. $\delta^{13}\text{C}$ -Korrekturmodell) aus der Kenntnis der $\delta^{13}\text{C}$ -Gehaltsänderungen (beeinflusst durch charakteristische $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für Bodengas und Karbonate des Grundwasserleiters) ein ^{14}C -Anfangsgehalt ($A_{0\text{-Isot.}}$) bestimmen.

$$A_{0\text{-Isot.}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{GW-Probe}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{Gestein}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{Bodengas}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{Gestein}}} \cdot (A_{\text{Bodengas}} - A_{\text{Gestein}}) + A_{\text{Gestein}} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{Gestein}} &= 0\% \quad * \\ A_{\text{Bodengas}} &= 100\% \quad * \\ \delta^{13}\text{C}_{\text{Bodengas}} &= -23\text{‰} \quad * \\ & \quad * \text{ nach EICHINGER (1982)} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse dieser Grundwasseraltersbestimmungen sind in Tab. 17 zusammengestellt.

Die Konzentrationsangaben für $\text{CO}_2\text{ aq}$, HCO_3^- und DIC wurden den Analysen des Labors der Administration de l'Environnement, Division des Eaux (siehe Kap.6) entnommen und mit dem Programm WATEQ (BALL & NORDSTROM 1992) überprüft bzw. berechnet.

5.3.3 Auswertung / Interpretation

Die Anfangsgehalte an ^{14}C der Grundwässer aus Trois Ponts und Koerich berechnen sich nach dem Chemiemischungsmodell zu 56%modern (54-57%mod. Trois Ponts). Mit dem Isotopenmischungsmodell ergeben sich ^{14}C -Anfangsgehalte von 62%modern in Koerich und Variationen von 57%modern (TPBR4) bis 64%modern (TPPz5a), Mittelwert 60%modern, für Trois Ponts.

Für das Grundwasser aus Br.-Sidor liegen die ^{14}C -Anfangsgehalte bei 51%modern nach dem Chemiemischungsmodell und 47%modern nach dem Isotopenmischungsmodell.

Die sich aus diesen Anfangsgehalten, unter Anwendung des Zerfallsgesetzes, ergebenden Grundwassermodellalter ($GwA_{\text{Chemiem.}}$, $GwA_{\text{Isotopenm.}}$) werden zu **Verweilzeiten (VZ)** zusammengefaßt.

- VZ: $\leq \approx 1000a$
- "Tiefenwasser" in Koerich (K-Qu14 $\approx 900a$)
 - in Trois Ponts geringfügig jünger (700-900a) TPBR2, TPBR3-3; jüngere Mischungskomponenten immer tritiumfrei
- VZ: $\updownarrow 1000-2000a$
- TPBR1, TPBR3-7, TPBR5, TPPz5-3
 - je nach Mischungsanteilen (immer tritiumfrei) auch jünger
 - bei Zumischung von Komponenten mit Isotopenaustausch auch älter
- VZ: $\approx 3000a$
- TPBR4, hier wird ein Isotopenaustausch deutlich (s.u. und vergl. Abb.72)
- VZ: $\leq \approx 6000a$
- TPPz5a, "stagnierendes" Kluftwasser aus den Mergeln und Kalken von Strassen
- VZ: $\approx 26400a$
- Br.-Sidor, fast vollständiger Austausch des anfänglichen ^{14}C mit dem Kohlenstoff der Karbonate des Grundwasserleiters

Diese Einteilung der Grundwässer im Trois Ponts in drei (Verweilzeit-) Gruppen wird von Veränderungen der Verweilzeiten, die auf die Grundwasserentnahmen zurückzuführen sind, begleitet.

Grundwasser - Modellalter nach ^{14}C -Methode

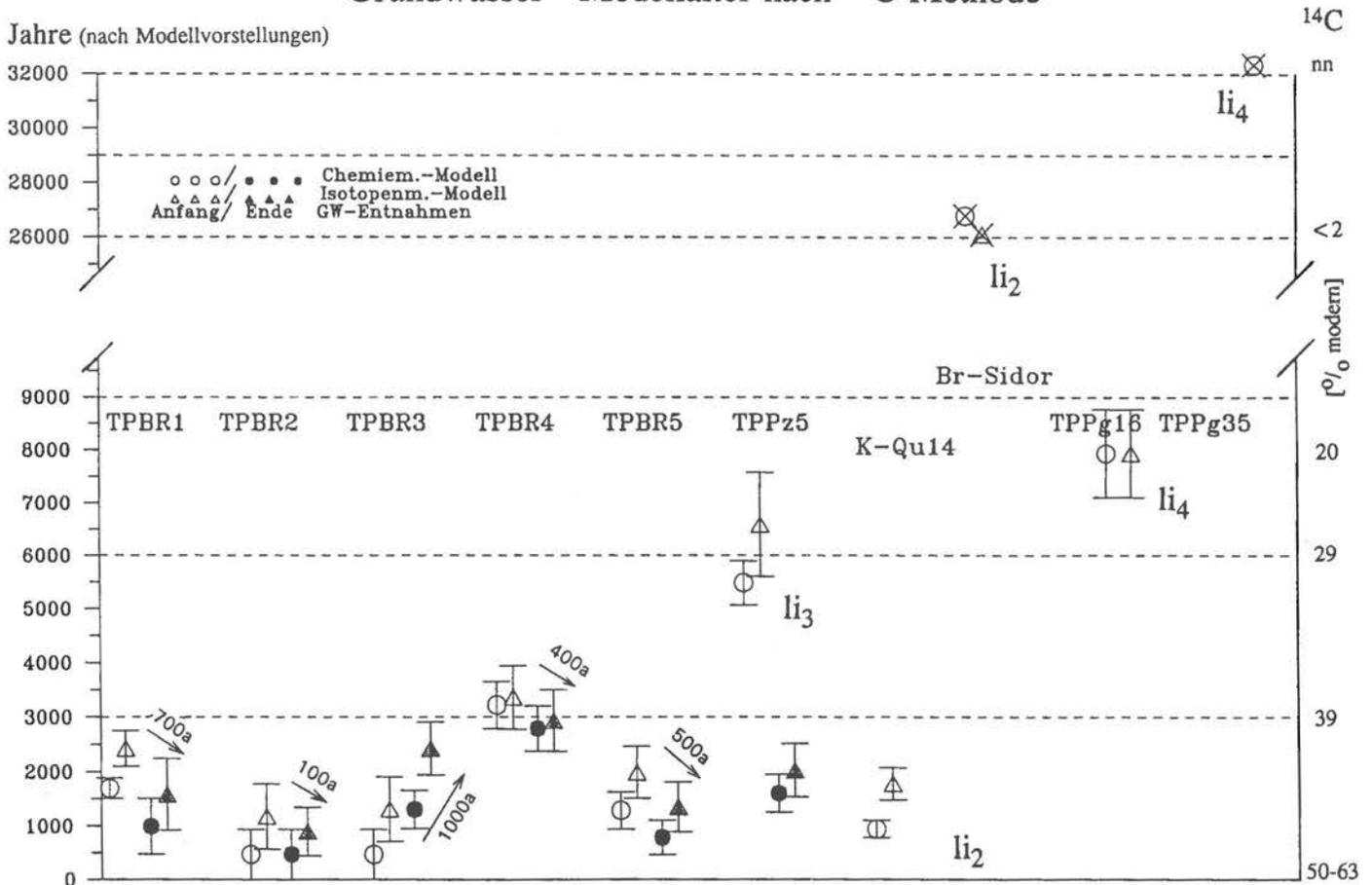


Abb. 71: Grundwassermodellalter nach ^{14}C -Methode; mit z.T. gegenläufigen Trends (Pfeile) in der Veränderung der GwModellalter zwischen den Probenserien

Im Laufe der Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge* werden die Modellalter der Grundwässer aus den Brunnen in Trois Ponts um 500-700a geringer; mit Ausnahme von TPBR2 und TPBR3 (Abb.71). Diese Tendenz ist zwar deutlich erkennbar (vergl. VZ in Tab.17), verbleibt aber zumeist unterhalb der Signifikanzschwelle. In TPBR2 bleibt eine Verweilzeit von $\approx 700-800a$ bestehen. Im TPBR3 steigt die VZ von 900a (vergleichbar mit TPBR2) auf 1900a (vergleichbar mit den Anfangswerten von TPBR1 und TPBR5). Hier hat sich ein Sprung in eine andere (Verweilzeit-) Gruppe vollzogen.

Die systematischen Altersunterschiede aus dem Chemie- und dem Isotopenmischungsmodell verlieren sich bei höheren Grundwassermodellaltern (siehe TPBR4 in Abb.71).

Diese Festlegung von Zeiträumen der Neubildung der untersuchten Grundwässer ermöglicht ihre Einordnung in die Gliederung des Quartärs (siehe Kap.5.5).

Grundwasser - Modellalter nach ^{14}C -Methode										
	$\text{CO}_2 \text{ aq}$	HCO_3^-	DIC	A_0 Chem	$\delta^{13}\text{C}$	A_0 Isot	^{14}C	GWA Chemiem.	GWA Isotopenm.	VZ
	mol/l	mol/l	mol/l	‰ mod.	‰ $\pm 0,2$	‰ ± 1	‰ mod.	Jahre	Jahre	Jahre
TPBR1-3	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	54%	-13,63	59%	44 ± 1	1695 ± 188	2426 ± 328	≈ 2000
TPBR1-6				"	-13,40	58%	48 ± 3	990 ± 517	1579 ± 660	≈ 1300
TPBR2-3	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,20 \cdot 10^{-3}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	56%	-13,99	61%	53 ± 3	469 ± 469	1174 ± 604	≈ 800
TPBR2-6				"	-13,65	59%	53 ± 2	469 ± 469	891 ± 452	≈ 700
TPBR3-3	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4,42 \cdot 10^{-3}$	$4,95 \cdot 10^{-3}$	56%	-14,32	62%	53 ± 3	469 ± 469	1309 ± 602	≈ 900
TPBR3-7	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$4,92 \cdot 10^{-3}$	55%	-14,48	63%	47 ± 2	1307 ± 352	2428 ± 483	≈ 1900
TPBR4-3	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	56%	-13,09	57%	38 ± 2	3217 ± 435	3362 ± 581	≈ 3300
TPBR4-6				"	-13,18	57%	40 ± 2	2792 ± 414	2937 ± 559	≈ 2900
TPBR5-3	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,11 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$	56%	-14,03	61%	48 ± 2	1282 ± 345	1987 ± 480	≈ 1600
TPBR5-6				"	-13,77	60%	51 ± 2	780 ± 325	1348 ± 462	≈ 1100
TPPz5-a	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$5,70 \cdot 10^{-3}$	56%	-14,65	64%	29 ± 3	5485 ± 412	6587 ± 987	≈ 6000
TPPz5-3	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$4,65 \cdot 10^{-3}$	$5,53 \cdot 10^{-3}$	57%	-13,85	60%	47 ± 2	1602 ± 352	2025 ± 490	≈ 1800
K-Qu14	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$5,06 \cdot 10^{-3}$	56%	-14,22	62%	50 ± 1	938 ± 166	1779 ± 299	≈ 900
Br-Sidor	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$	51%	-10,71	47%	<2	26773	26096 ± 176	≈ 26400
TPPg16-3	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$5,58 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$	52%	-12,05	52%	20 ± 2	7940 ± 829	7940 ± 829	≈ 8000
TPPg35-3	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$4,31 \cdot 10^{-3}$	50%	-6,13	27%	nn	32339		>32000

$\text{GWA}_{\text{Chemiem.}}$: GWalter, berechnet mit Chemiemischungsmodell und Zerfallsgesetz
 $\text{GWA}_{\text{Isotopenm.}}$: GWalter, berechnet mit Isotopenmischungsmodell und Zerfallsgesetz
 DIC : im Wasser gelöste anorgan. Kohlenstoffkonzentration; dissolved inorganic carbon
 A_0 : ^{14}C -Anfangsgehalte (nach Chemie- bzw. Isotopenmischungsmodell)
 VZ : Verweilzeit
 nn : nicht nachweisbar

Tab. 17: Grundwasser-Modellalter nach ^{14}C -Methode der Grundwässer vom Standort Trois Ponts und aus Br.-Sidor

In diesem Diagramm (Abb.72) ist die im $\delta^{13}\text{C}$ -Wert und im ^{14}C -Gehalt leicht erniedrigte Position der Proben aus TPBR4 auffällig, da sie tendenziell dem Verlauf der "Isotopenaustauschkurve" für Grundwässer der Fossilarmen Tone als auch der eines Grundwassers aus dem Luxemburger Sandstein mit größeren Anteilen an Austauschwässern entspricht. Durch die Kluftgrundwasserproben aus den Deckschichten (TPPg16, TPPg35) ist das Vorkommen von Ionen- und Isotopen- Austauschwässern belegt und der Verlauf der Isotopenaustauschkurven gefestigt (Abb.72 und Kap.6). Der in Kap. 4 mit hydraulischen Methoden geführte Nachweis und die Quantifizierung von natürlich stattfindendem Leakage eröffnet die Möglichkeit, am Standort Trois Ponts über eine "leakage-bedingte isotopische Alterung" der Grundwässer im Luxemburger Sandstein zu diskutieren.

$\delta^2\text{H}/^{14}\text{C}$ -Diagramm

In diesem Diagramm wird ein Zusammenhang zwischen dem ^{14}C -Gehalt und der Deuterium-Fraktionierung dargestellt. Wie bei der Verknüpfung von $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ besteht für $\delta^{18}\text{O} - ^{14}\text{C}$ ein vergleichbarer Zusammenhang.

Die Deuteriumgehalte des Grundwassers aus Br.-Sidor sind deutlich gegenüber denen aus Trois Ponts abgereichert. Der exponentielle Kurvenverlauf wurde mit $^{14}\text{C} = 1\%$ modern für Br.-Sidor berechnet. Die Verteilung der Proben aus Trois Ponts und Koerich im Diagramm (Abb.73) entspricht der in Abb. 72. Die Grundwässer aus TPPz5 und TPBR4 nehmen wiederum besondere Positionen ein (s.o.).

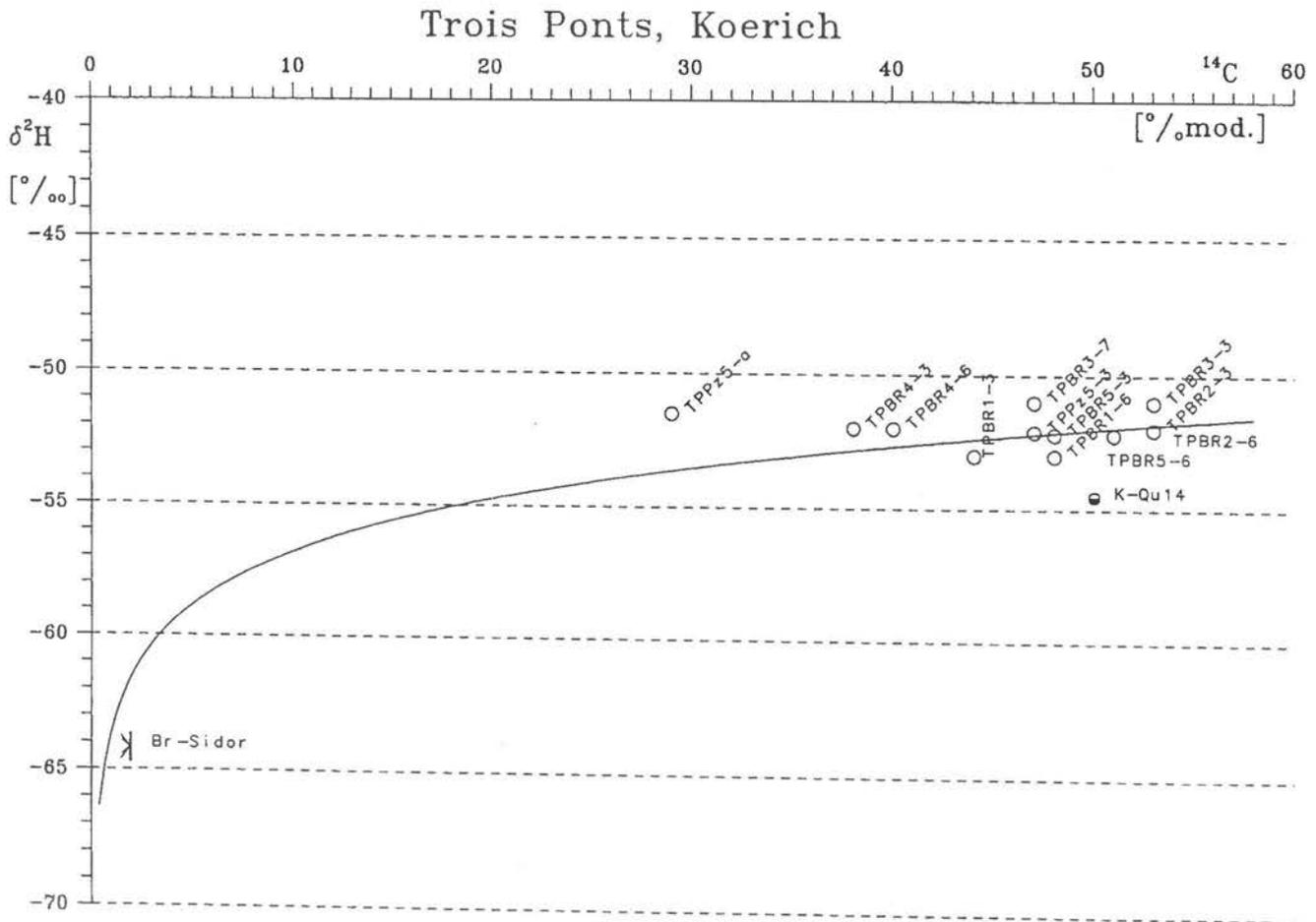


Abb. 73: $\delta^2\text{H}/^{14}\text{C}$ -Diagramm; ^{14}C -Gehalte und Deuterium-Fraktionierung

Aus der hier auftretenden Beziehung der mit dem Grundwasseralter exponentiell zunehmenden Abreicherung an schweren ^2H -Isotopen bzw. Fraktionierung an Deuterium, ergibt sich ein klarer Hinweis auf Zeiten der Grundwasserneubildung unter kälteren Klimabedingungen. In Kombination mit der Altersabschätzung der Probe Br.-Sidor werden hier Einflüsse des Pleistozäns deutlich.

5.4 Kombination von Isotopen-Methoden mit hydrochemischen Daten

Mit Hilfe der Diagramme: $\text{Cl}^-/^3\text{H}$, $\text{SO}_4^{2-}/^3\text{H}$ und $\text{NO}_3^-/^3\text{H}$ wird im folgenden der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus den Umweltisotopengehaltsbestimmungen und denen der hydrochemischen Analysen hergestellt. Die aus diesen Beziehungen abgeleiteten Aussagen sind streng an die jeweiligen hydrogeologischen Rahmenbedingungen geknüpft. Die Einteilung in ^3H -Gehalts-Klassen der Abb. 74 wird übernommen. Die zeitliche Abfolge der Probeentnahmen ist in den Diagrammen von links nach rechts berücksichtigt.

$\text{Cl}^-/^3\text{H}$ -Diagramm und $\text{NO}_3^-/^3\text{H}$ -Diagramm für Trois Ponts und Koerich

Über die lithologisch-hydraulische Verbindung, Luxemburger Sandstein, ist der Zusammenhang Trois Ponts - Koerich gegeben. Die Werte aus den Deckschichten (TPPg) in Trois Ponts werden bei der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Geogene Einflüsse auf die Konzentration der betrachteten Ionen sollen über den gesamten Aquifer homogen verteilt sein, so daß die betrachteten Veränderungen auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden können.

Im Diagramm $\text{Cl}^-/^3\text{H}$ (Abb.74) wird der natürliche Gehalt des chemisch konservativen Chloridions mit <3 mg/l durch die Proben aus Trois Ponts dargestellt. Die über die ^3H -Gehalte aufgestellten Grundwasserstrom-Komponenten finden sich in der Betrachtung der Cl^- -Konzentrationen wieder. So treten in der Eisch (mit Oberflächenabfluß und Niederschlagsanteil) die höheren Cl^- -Gehalte (ca. 17 mg/l) auf, während das gut durchmischte Grundwasser von KBR1, KBR2 mit 10-17 mg Cl^- /l unter diesem Wert liegt. Der Übergang vom natürlichen Background in dieses Niveau bilden die Chloridgehalte der Proben aus KBR4 und KBR3. Dieser Anstieg folgt einer eingezeichneten Mischungsgeraden. Diese Zunahme der Chloridgehalte ist z.T. auf ein Heranziehen und Zumischen von stärker chloridhaltigem Grundwasser während der Pumpversuche zurückzuführen.

Im Diagramm $\text{NO}_3^-/^3\text{H}$ (Abb.74) folgen die Proben aus KBR4 (1;1,1;0,08;1,2;2 mg NO_3^- /l) und KBR3 (5;2,5;2,1;1,6 mg NO_3^- /l) ebenfalls einer Mischungsgeraden, die in das NO_3^- -Konzentrationsniveau von KBR1, KBR2 (8-24 mg NO_3^- /l) führt. Ausgangspunkt dieser Geraden muß der Koordinatenursprung sein, da anzunehmen ist, daß die "tritiumfreien" (älteren) Grundwässer des Luxemburger Sandsteines auch nitratfrei sind. Diese Annahme wird durch den Verlauf der Nitratgehalte im Brunnen KBR3, der Abnahme der Nitratkonzentration von 5 mg/l auf 1,6 mg/l mit fortschreitender Grundwasserentnahme untermauert (Zumischung von geringer nitratbelastetem Grundwasser). Auffällig sind die relativ hohen NO_3^- -Gehalte der Quelle Peiffer (Qu11: 48 mg/l ; K-Peiffer: 50 mg/l). Der Nitratgehalt von 90 mg/l der Quelle Frontzenbiert (Qu10) bestätigt die Annahme, daß an dieser Quellschüttung maßgeblich junges Grundwasser, ohne einen erkennbaren Anteil an "Tiefenwasser", beteiligt ist.

$\text{SO}_4^{2-}/^3\text{H}$ -Diagramm für Trois Ponts und Koerich (Abb.74)

Die Grundwässer des Luxemburger Sandsteines an den Standorten Trois Ponts und Koerich lassen sich nach ihren ^3H -Gehalten und SO_4^{2-} -Konzentrationen in drei Gruppen einteilen:

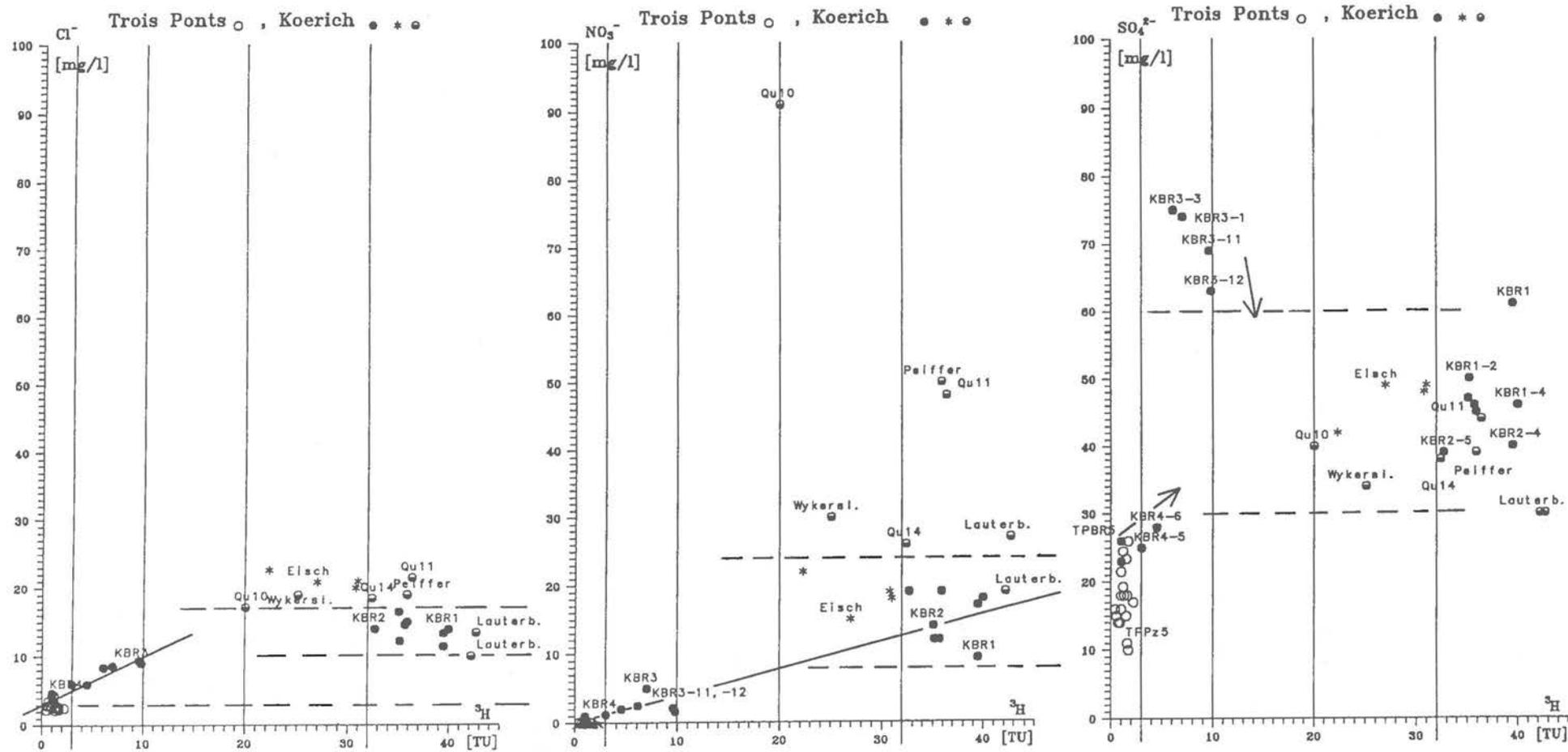


Abb. 74: Kombination von Isotopen-Befunden mit hydrochemischen Daten, Trois Ponts, Koerich

<u>< 10 TU; < 30 mg/l SO₄²⁻ :</u>	- alle Brunnen in Trois Ponts - "Tiefenwasser" in Koerich - KBR4 mit einer Zunahme an Tritium und Sulfat im Verlauf der Grundwasserentnahmen
<u>> 20 TU; 30-50 mg/l SO₄²⁻ :</u>	- Brunnen in der Eisch-Talau in Koerich; der SO ₄ ²⁻ -Gehalt der ersten Probe aus KBR1 ist etwas erhöht (61 mg/l) - alle Quellwasserproben aus Koerich
<u>< 10 TU; > 60 mg/l SO₄²⁻ :</u>	- KBR3 mit einer Zunahme im ³ H-Gehalt und einer Abnahme im SO ₄ ²⁻ -Gehalt im Verlauf der Grundwasserentnahmen

Trois Ponts und Koerich: Aus den Veränderungen in den Tritiumgehalten und den Sulfatkonzentrationen der Grundwässer aus KBR3 und KBR4 im Verlauf der Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge* werden tendenzielle Änderungen in den Mischungsanteilen deutlich. Beide Grundwässer verändern sich, von unterschiedlichen Ausgangspositionen aus, in Richtung auf die gut durchmischten Grundwässer der Eisch-Talau. Dies kann durch eine erhöhte Zumischung von jüngeren Grundwässern mit mittleren Sulfatgehalten eintreten.

Mit dieser Betrachtung ist kein zwingender Hinweis auf anthropogene Einflüsse auszumachen. Das Wasser der Eisch und das Grundwasser der Eisch-Talau sind von den Grundwasserübertritten geprägt (Effluenz). Die auftretenden Variationen im Sulfatgehalt können geogener Natur sein (Pyritverwitterung).

Inwieweit ein indirekter Einfluß des Koerbachs (erhöhter lokaler Sulfateintrag in Talauensedimente des Koerbachs; hierüber eine Erhöhung des SO₄²⁻-Gehaltes einer der Mischungskomponenten des Grundwassers aus KBR3) auf den relativ leicht erhöhten Sulfatgehalt der ersten Grundwasserproben aus KBR3 denkbar ist, bleibt an dieser Stelle offen.

Auch bei diesen Betrachtungen bestätigen sich die deutlichen Unterschiede zwischen dem Brunnen KBR3 und der Quelle Peiffer.

Zusammenfassend läßt sich über die Kombination von hydrochemischen Daten mit Umweltisotopengehalten eine Beziehung zwischen dem Grundwasser in Koerich, insbesondere dem "Tiefenwasser" (KBR4), und dem Grundwasser in Trois Ponts erkennen.

Cl⁻/³H-, SO₄²⁻/³H-, NO₃⁻/³H-Diagramm für Schaedhaff (Abb.75)

In allen Diagrammen wird die bereits in Kap.5.2.2 angesprochene entnahmebedingte Abnahme der Tritiumgehalte deutlich. Die ³H-Gehalte liegen hierbei zwischen dem Maximalgehalt in S15-1-3 (19,5 ± 2,8 TU) der ersten Probennahmeserie (6/91) und dem geringsten ³H-Gehalt in S15-4-4 (12,2 ± 1,4 TU) der zweiten Probenserie (9/91). Ein entnahmebedingter geringer Anstieg der Chloridkonzentrationen führt zu einer klaren Trennung der beiden Probenserien. Die Cl⁻-Gehalte der ersten Probennahmeserie (6/91) schwanken zwischen 12-15 mg/l, die der zweiten Serie zwischen 16-22 mg/l Cl⁻. Im SO₄²⁻/³H- und im NO₃⁻/³H-Diagramm ist keine Gruppierung nach Probenahmestellen möglich. Die Sulfat- bzw. Nitratgehalte variieren zwischen 45-50 mg/l SO₄²⁻ bzw. liegen unter 10 mg/l NO₃⁻.

Cl⁻/³H-Diagramm für Everlange (Abb.76)

Die Proben aus Attert und Schamicht sind aufgrund ihrer ³H-Gehalte von den Grundwasserproben deutlich abgesondert. Mit 21 bzw. 22 mgCl⁻/l ist das Grundwasser aus E15-1 deutlich von denen der anderen Brunnen (< 10 mgCl⁻/l) abgesetzt. Dies wird auf die trennende Wirkung der zwischen E15-1 und E15-2 verlaufenden Störung (vergl. Abb.76) zurückgeführt.

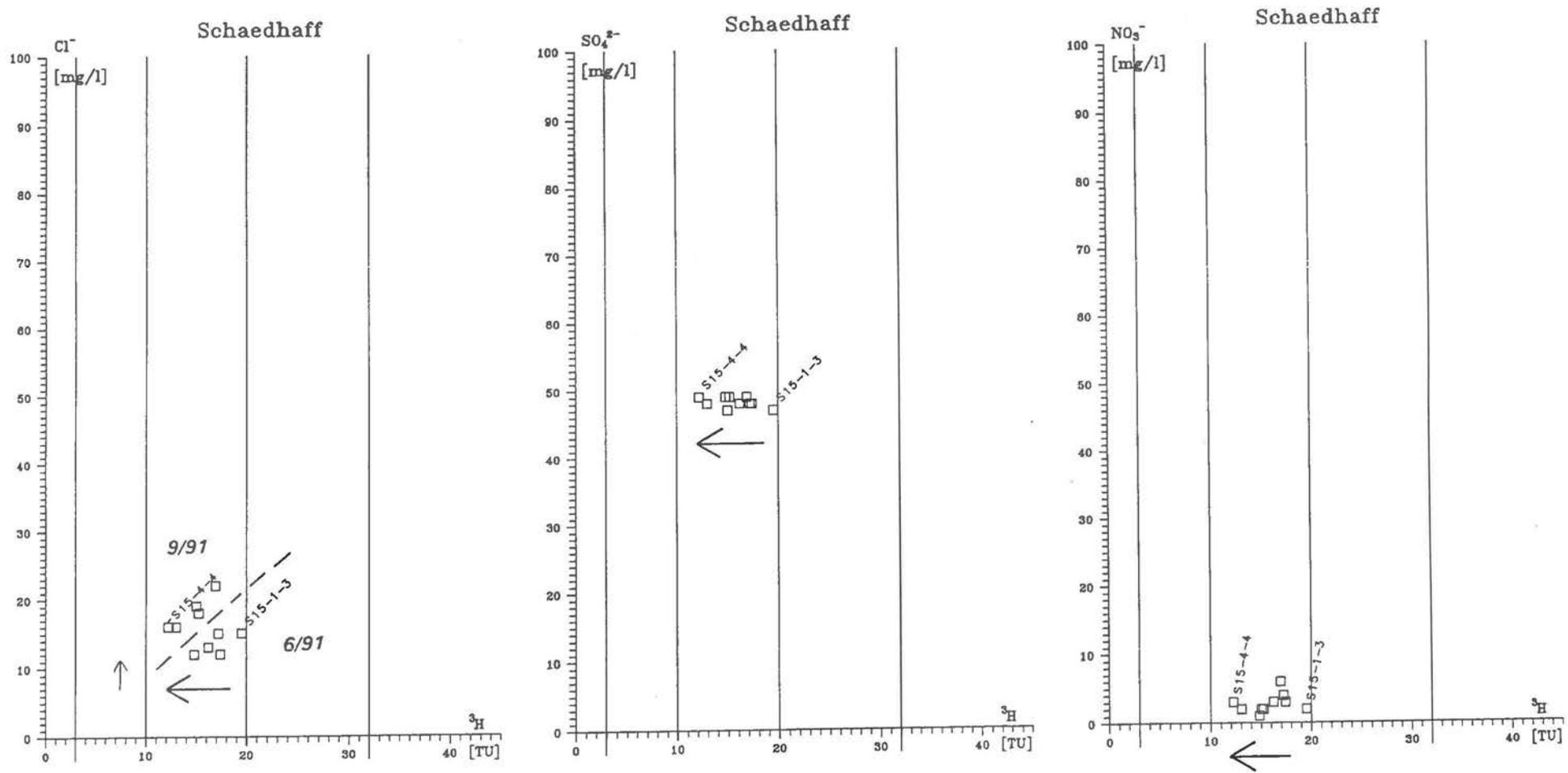


Abb. 75: Kombination von Isotopen-Befunden mit hydrochemischen Daten, Schaedhaff

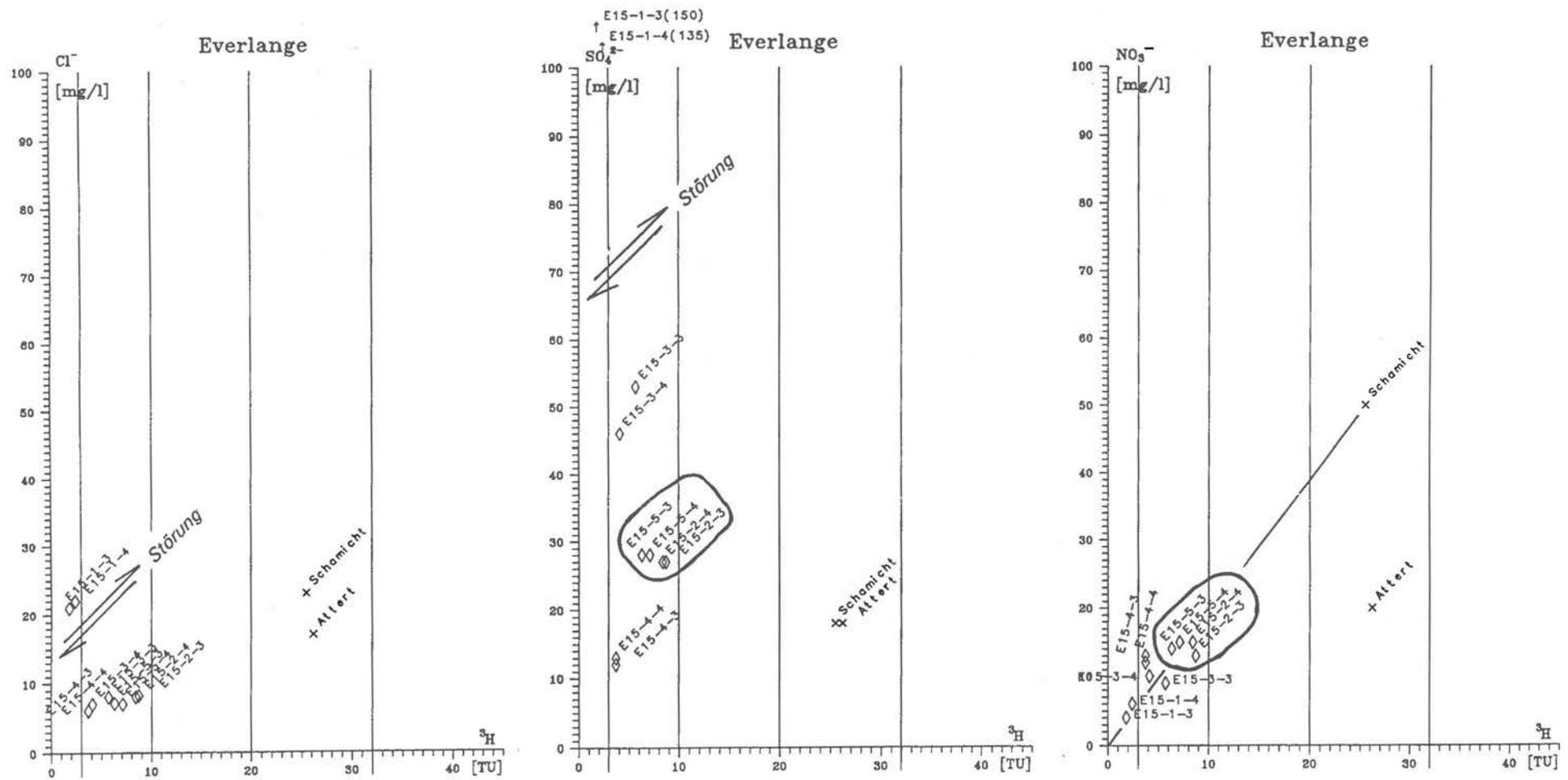


Abb. 76: Kombination von Isotopen-Befunden mit hydrochemischen Daten, Everlange

$\text{SO}_4^{2-}/^3\text{H}$ -Diagramm für Everlange (Abb.76)

Die Abtrennung des Grundwassers aus E15-1 von dem der anderen Brunnen wird am großen Unterschied im Sulfatgehalt deutlich; E15-1 135 bzw 150 mg/l; E15-2, -3, -4, -5, Attert, Schamicht < 60 mg/l SO_4^{2-} . Ein größerer Übertritt von Grundwasser, wie das aus E15-1, in die Attert ist auszuschließen. Das Wasser der Attert scheint vielmehr von Grundwässern, vergleichbar der Gruppe aus E15-2 und E15-5 bzw. aus E15-4 zu bestehen. Mit 12 und 13 mg/l weist E15-4 die geringsten Sulfatgehalte auf.

$\text{NO}_3^-/^3\text{H}$ -Diagramm für Everlange (Abb.76)

Die Nitratgehalte der Grundwässer aus Everlange (< 20 mg/l NO_3^-) liegen auf bzw. entlang einer Mischungsgeraden. Die Schamicht ist von einem relativ oberflächennahen, landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet geprägt (50 mg/l NO_3^-) und legt mit dem Koordinatenursprung die Mischungsgerade fest. Für alte, tritiumfreie Grundwässer ist, bei den gegebenen geologischen Verhältnissen, kein Nitratgehalt zu erwarten. Dies bestätigten die Grundwasserproben aus E15-1 (in Everlange ältestes Grundwasser und geringster Nitratgehalt). Die Probe aus der Attert spiegelt effluente Strömungsbedingungen wider.

Everlange: Die trennende Wirkung der Störung zwischen E15-1 und E15-2 ist deutlich erkennbar. Ein größerer Übertritt von Grundwässern, vergleichbar mit dem aus E15-1, in die Attert ist nicht erkennbar. Eine Speisung der Attert durch Grundwässer, die vergleichbar mit denen aus der Gruppe E15-2 - E15-5 sind, ist naheliegend. Das Grundwasser aus E15-3 vermittelt zwischen dieser Gruppe und dem Grundwasser aus E15-1. Das Grundwasser aus E15-4 ist dieser Abfolge nicht eindeutig zuzuordnen.

5.5 Hinweise auf Klimabedingungen: Quartär, Holozän

Niederschlagstemperatur zur Zeit der Grundwasserneubildung

Aus den ^{18}O -Gehalten der Grundwässer lassen sich mittels einer empirischen Beziehung Temperaturen der Niederschläge errechnen, die an der Neubildung der beprobten Grundwässer beteiligt waren. Die Beziehung

$$\delta^{18}\text{O} [‰] = ((0,34 \pm 0,03) \cdot T_N [^\circ\text{C}]) - 11,99 \quad (34)$$

T_N : Temperatur des Niederschlages

wurde aus dem mittleren, mit der Niederschlagsmenge gewichteten ^{18}O -Gehalt der Niederschläge entwickelt (YURTSEVER 1976).

Hieraus und daraus, daß die ^{18}O -Gehalte der Grundwässer ein Mischprodukt vieler Jahresniederschläge sind, sind diese Niederschlagstemperaturen als **längerfristige Jahresmitteltemperaturen zu Zeiten der Neubildung der beprobten Grundwässer** zu verstehen.

Aus den Mittelwerten der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wurden für die Grundwässer ausgewählter Standorte die "Niederschlagstemperaturen" errechnet.

Die berechneten Temperaturen (T_N) für Trois Ponts, Koerich und Everlange weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Sie liegen etwa 2-3°C über den aktuellen längerfristigen Jahresmitteltemperaturen.

Für Br.-Sidor wird mit $T_N = 7,6 \pm 1,1^\circ\text{C}$ der Hinweis auf Zeiten der Grundwasserneubildung unter kälterem Klima (Pleistozän) bestätigt.

Trois Pons: Brunnen und Piezometer im li_2	$\delta^{18}O: -7,83 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 12,4 \pm 1,6 \text{ °C}$
Piezometer im li_3 (TPPz5-a)	$\delta^{18}O: -7,73 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 12,7 \pm 1,6 \text{ °C}$
Piezometer im li_4 (TPPz16)	$\delta^{18}O: -7,85 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 12,3 \pm 1,5 \text{ °C}$
Piezometer im li_4 (TPPz35)	$\delta^{18}O: -8,35 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 10,8 \pm 1,4 \text{ °C}$
Koerich: Brunnen und Quellen im li_2	$\delta^{18}O: -8,25 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 11,1 \pm 1,4 \text{ °C}$
Everlange: Brunnen	$\delta^{18}O: -8,37 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 11,2 \pm 1,0 \text{ °C}$
Br.-Sidor:	$\delta^{18}O: -9,45 \pm 0,15\text{‰}$	$T_N = 7,6 \pm 1,1 \text{ °C}$

Tab. 18: "Niederschlagstemperaturen" aus ^{18}O -Gehalten der Grundwässer der Standorte der *solution de recharge*

Zum Vergleich beträgt die mittlere Lufttemperatur (1931-1960) in Luxemburg-Stadt und Ettelbrück $9,3\text{°C}$ (FABER 1971).

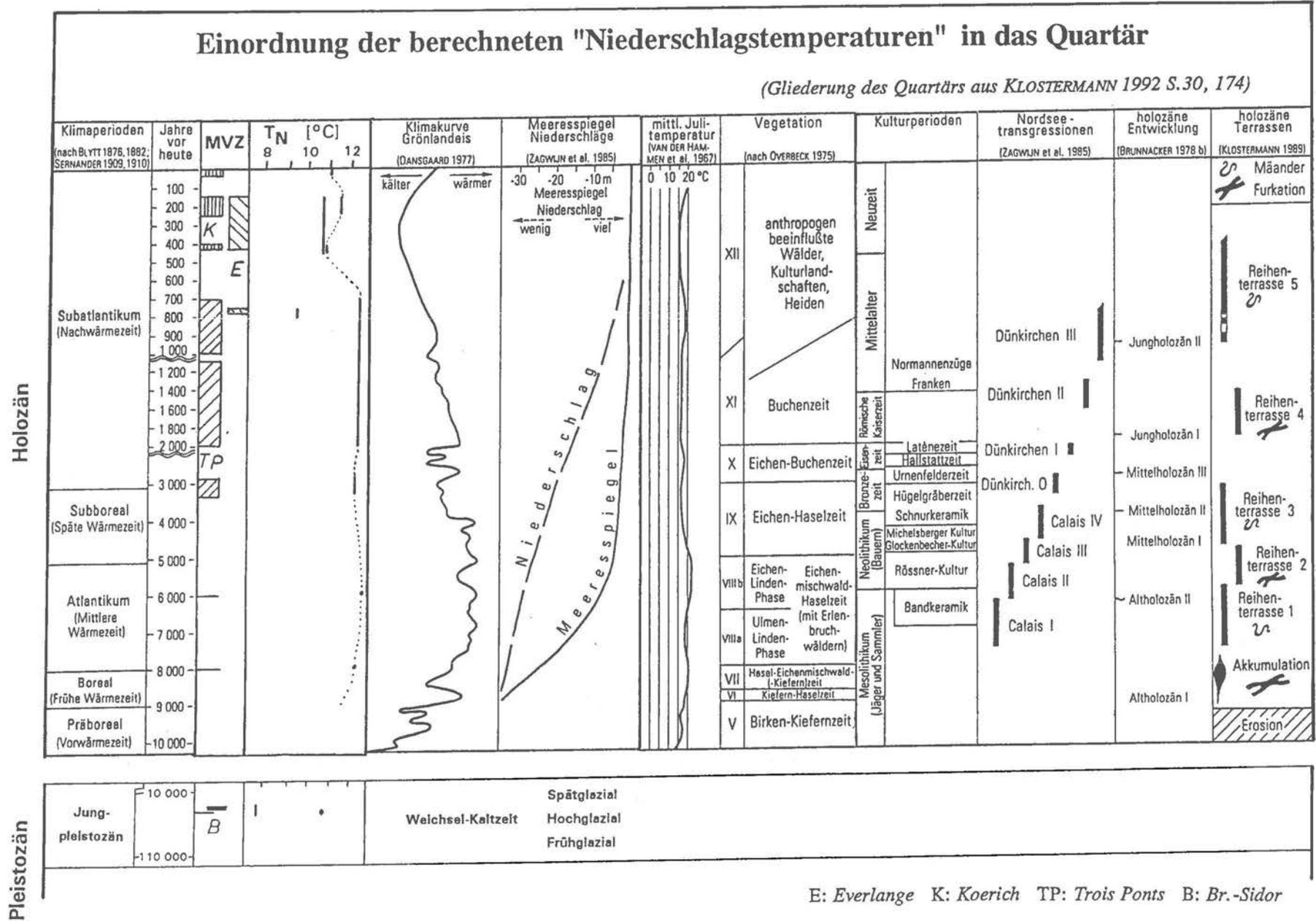
Variation der ^{18}O -Gehalte und ihrer "Niederschlagstemperaturen" als Auswirkung der Grundwasserentnahmen durch die <i>solution de recharge</i>							
	Beprobung vor*2	am Ende*3	"Niederschlagstemperaturen" *1				
Trois Pons							
TPBR1	-7,78 >	-8,16 ‰ $\delta^{18}O$	12,5 ± 1,5 >	11,4 ± 1,4 °C	kälter um 1,1 °C		
TPBR2	-7,78 >	-8,03 ‰ $\delta^{18}O$	12,5 ± 1,5 >	11,8 ± 1,5 °C	kälter um 0,7 °C		
TPBR3	-7,80 >	-7,90 ‰ $\delta^{18}O$	12,4 ± 1,5 >	12,2 ± 1,5 °C	kälter um 0,2 °C		
TPBR4	-7,89 >	-8,21 ‰ $\delta^{18}O$	12,2 ± 1,5 >	11,2 ± 1,4 °C	kälter um 1,0 °C		
TPBR5	-7,70 >	-7,82 ‰ $\delta^{18}O$	12,8 ± 1,6 >	12,4 ± 1,5 °C	kälter um 0,4 °C		
Koerich							
KBR1	-8,36 >	-8,42 ‰ $\delta^{18}O$	10,8 ± 1,4 >	10,6 ± 1,4 °C	kälter um 0,2 °C		
KBR2	-8,26 >	-8,58 ‰ $\delta^{18}O$	11,1 ± 1,4 >	10,1 ± 1,3 °C	kälter um 1,0 °C		
KBR3	-7,89 >	-8,13 ‰ $\delta^{18}O$	12,2 ± 1,5 >	11,5 ± 1,5 °C	kälter um 0,7 °C		
KBR4	-8,26 >	-8,35 ‰ $\delta^{18}O$	11,1 ± 1,4 >	10,8 ± 1,4 °C	kälter um 0,3 °C		
Qu11	-8,31 >	-8,38 ‰ $\delta^{18}O$	10,9 ± 1,4 >	10,7 ± 1,4 °C	kälter um 0,2 °C		
Qu14	-8,29 >	-8,57 ‰ $\delta^{18}O$	11,0 ± 1,4 >	10,2 ± 1,3 °C	kälter um 0,8 °C		
Lauterbur	-8,52 >	-8,58 ‰ $\delta^{18}O$	10,3 ± 1,4 >	10,1 ± 1,3 °C	kälter um 0,2 °C		
Everlange							
E15-1	6/91	9/91	-8,76 <	-8,40 ‰ $\delta^{18}O$	9,6 ± 1,3 <	10,7 ± 1,4 °C	wärmer um 1,1 °C
E15-2,-3,-4,-5	-8,41 <	-8,22 ‰ $\delta^{18}O$	10,7 ± 1,4 <	11,2 ± 1,4 °C	wärmer um 0,5 °C		

*1 berechnet nach YURTSERVER (1976)
 *2 Mittelwert der Beprobungen vor der GwFörderung der *solution de recharge*
 *3 Beprobung am Ende der GwEntnahmen der *solution de recharge*

Tab. 19: Variation der ^{18}O -Gehalte und ihrer "Niederschlagstemperaturen" als Auswirkung der Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge*

Die bereits in Kap. 5.1 angesprochene und in Abb. 36 und 44 dargestellte Variation der ^{18}O -Gehalte der Proben am Ende der Grundwasserentnahmen (*solution de recharge*) kann bei Anwendung der oben genannten Beziehung auf unterschiedliche "Niederschlagstemperaturen" (zur Zeit der Grundwasserneubildung) zurückgeführt werden (s.o. und Tab.18). Die Grundwasserentnahmen haben zwei gegenläufige Trends erzeugt. In Trois Pons und Koerich sanken die "Niederschlagstemperaturen" um $0,2-1,1\text{°C}$, während in Everlange ein "Niederschlagstemperatur"-Anstieg stattfand.

Abb. 77: Einordnung der berechneten "Niederschlagstemperaturen" in das Quartär



Wie die Grundwasserprobe ein Mischprodukt aus den am Grundwassersystem beteiligten Komponenten darstellt, ist die aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten berechnete "Niederschlagstemperatur" eine mittlere Größe über die verschiedenen "Niederschlagstemperaturen" der beteiligten Komponenten. Dieser Grundwassermischungsansatz wird auch bei der Mittleren Verweilzeit verwendet, so daß hierüber eine Einhängung dieser klimabezogenen Hinweise in die Gliederung des Quartärs und Holozäns der Niederrheinischen Bucht (KLOSTERMANN 1992) anhand einer Zeitskala möglich ist.

Mit gemittelten Verweilzeiten von ≈ 1000 bis ≈ 3000 Jahren der Grundwässer aus Trois Ponts erstreckt sich der Zeitraum ihrer Neubildung auf das jüngere und mittlere Subatlantikum (Nachwärmezeit). Der Trend in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten und den "Niederschlagstemperaturen" wird mit einem entnahmebedingten, erhöhten Zustrom an jüngeren und somit "kälteren" Niederschlagswässern des ausgehenden Subatlantikums erklärt. Bis zum ausgehenden Subatlantikum steigt das Dargebot an Niederschlägen bis in das aktuelle Niveau. In Trois Ponts sind diese Mischungsänderungen in den Brunnen TPBR1, TPBR2 und TPBR4 deutlich sichtbar. Mit "Niederschlagstemperaturen" zwischen $10,1$ und $11,5^\circ\text{C}$ liegen die Grundwässer aus Koerich um $\approx 1^\circ\text{C}$ unter denen aus Trois Ponts. Die zeitliche Einordnung in die Gliederung des Holozäns ist ebenfalls unproblematisch. Für die Zeiträume der Grundwasserneubildung lassen sich aus Abb. 77 "mittlere Juli-Temperaturen" von $\approx 10^\circ\text{C}$ für Koerich und $\approx 20^\circ\text{C}$ für Trois Ponts ablesen. Die "Klimakurve Grönlandeis" wird von den "Niederschlagstemperaturen" dieser Zeiträume bei stark abgeschwächtem Verlauf nachgezeichnet. Die Erniedrigung der "Niederschlagstemperaturen" der Koericher Grundwässer wird auf eine entnahmebedingte verbesserte Durchmischung des Aquifers zurückgeführt. Hierbei kann sowohl die zur kältesten Zeit neugebildete (200-400a VZ), als auch die aktuelle Komponenten ($9,3^\circ\text{C}$ Jahresmitteltemperatur) einen abkühlenden Einfluß ausüben.

Der Anstieg der "Niederschlagstemperaturen" der Grundwässer in Everlange kann, nach Vergleich mit der "Klimakurve Grönlandeis" (Abb.77), durch einen entnahmebedingten vermehrten Zustrom von älterem oder von jüngerem Grundwasser erklärt werden. Da aber das älteste Grundwasser aus Everlange (E15-1, VZ $\approx 7000\text{a}$) die niedrigste Ausgangstemperatur hatte, wird ein vermehrter Anstrom jüngerer Grundwassers angenommen.

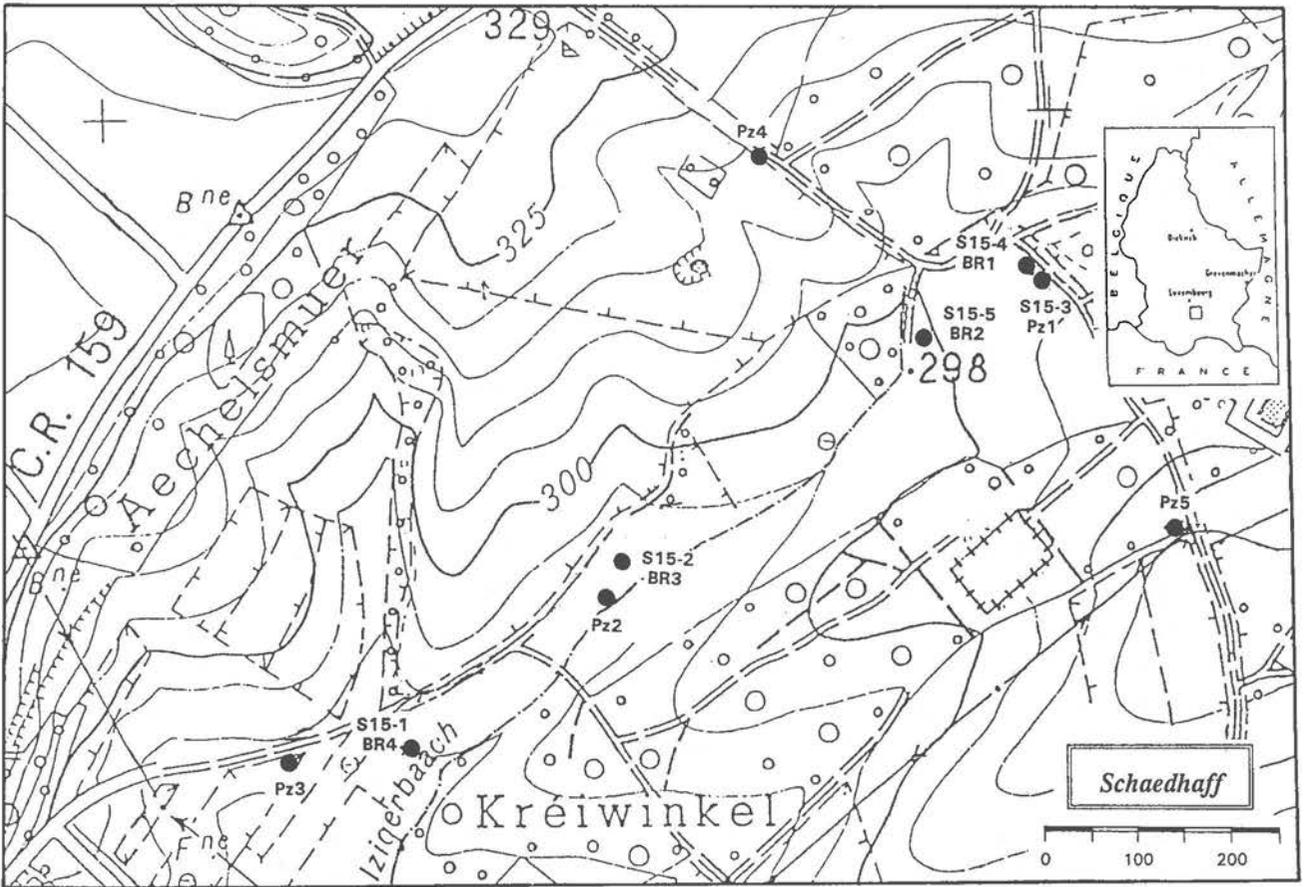


Abb. 78: Lageplan Schaedhaff

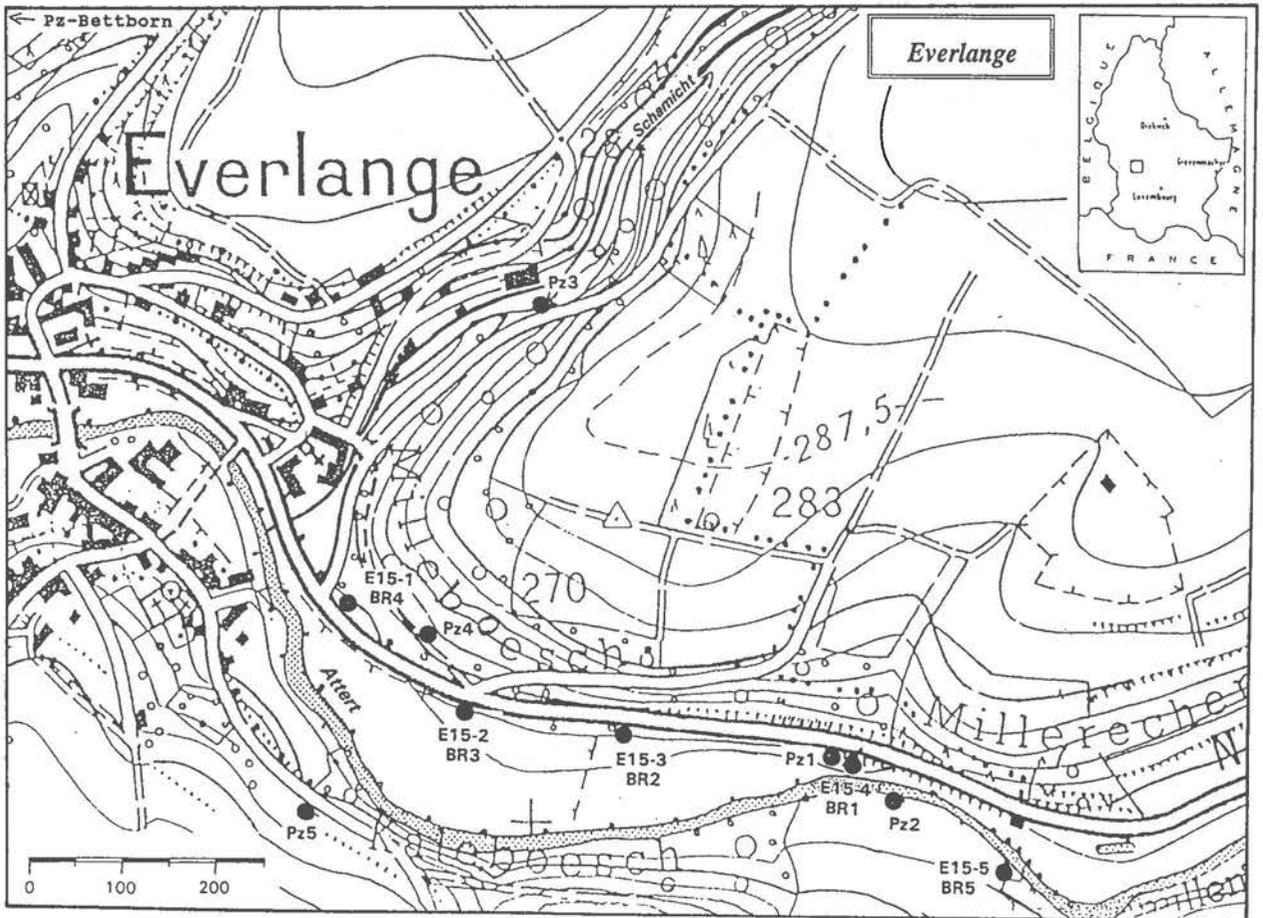


Abb. 79: Lageplan Everlange

6 Hydrochemische Untersuchungen

Während der Planung und zu Beginn des Detailuntersuchungsprogramms wurden gewisse Erwartungen an die Aussagen der hydrochemischen Untersuchungen gestellt, was nicht zu letzt durch die Literaturrecherche erzeugt wurde. Im Zuge der Auswertung der Analysenergebnisse bestätigen sich die geringen, bereits bei den Vorort-Messungen der Probenahmen angedeuteten Unterschiede. Erst die Kombination von Isotopengehalten mit hydrochemischen Daten führt zu bemerkenswerten Erkenntnissen (Kap.5.4). Im Anschluß an die Auswertung der hydraulischen Versuche und der Isotopen-Untersuchungen lassen sich erkannte Grundwassersystemmerkmale und -eigenschaften durch die Ergebnisse der hydrochemischen Untersuchungen nachvollziehen und bestätigen.

6.1 Beprobung / Analytik

Am Standort Trois Ponts, an dem die ersten Pumpversuche der vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurden, bestand anfangs die Erwartung einen Leakage-Nachweis mittels hydrochemischer Befunde führen zu können (vergl. Kap.1.3). Hierzu bot sich die genaue Betrachtung der äußerst geringen - noch natürlich geringen - Chloridgehalte des Grundwassers im Luxemburger Sandstein-Aquifer an. Mit Cl⁻-Konzentrationen < 5 mg/l wurde bei zunehmendem Leakage aus den Deckschichten (Cl⁻-Konzentration > 12 mg/l) eine Zunahme der Chloridkonzentration mit fortschreitender Dauer des Absenkungszustandes erwartet.

Synchron mit den chemischen Proben wurden die Isotopenproben genommen, um über die chemischen Befunde eine Aussage über die Qualität und die Repräsentativität der Grundwasserproben zu erhalten. Dieses Wissen war die Basis für eine schrittweise Durchführung der Isotopenbestimmungen, so daß ohne Überschreitung des Budgets eine optimale Ausbeute an isotopenfundierten Erkenntnissen erzielt werden konnte.

Die chemischen Analysen wurden durch das Labor der Administration de l'Environnement, Division des Eaux durchgeführt.

Die abgestufte Vorgehensweise einer synchronen Probenahme hat sich auch bei den Pumpversuchen an den anderen Standorten als äußerst praktikabel erwiesen, auch wenn an diesen Standorten keine speziellen Erwartungen an die hydrochemischen Befunde geknüpft waren.

Die Zeitpunkte der Probenahmen waren auf den Ablauf der Pumpversuche abgestimmt und sind für Trois Ponts in Abb. 86 abzulesen. Aus dieser Abbildung lassen sich auch die vor-Ort bei der Beprobung gemessenen sog. Milieuparameter entnehmen. Die Werte dieser Parameter (elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert, RedOx-Potential, GwTemperatur, im Grundwasser gelöster Sauerstoff), die Angaben zu den jeweiligen Probenahmebedingungen, wie auch die Analysenergebnisse werden für jede Probenahme in ein PC-gestütztes Formblatt (im wesentlichen mit dem in DVWK (1990, S.177ff) vergleichbar) eingegeben und automatisch so umgerechnet, daß - neben den verschiedenen Konzentrationsangaben - die Grundwasserhärten und eine Qualitätskontrolle über die Ionenbilanz angegeben werden. Hierbei werden automatisch Datensätze erstellt, die für die Erzeugung der Standarddiagramme benötigt werden (z.B. Abb.81, 83, 84, 88; Erläuterungen z.B. in DVWK 1990). Diese Datenverarbeitung, als auch die Erstellung der Graphiken wurde mit Hilfe von selbsterstellten Anwenderrouninen für handelsübliche PC-Programme durchgeführt und automatisiert.

Mit Tab. 20 und 21 werden für Trois Ponts und Koerich zwei typische, gemittelte, in Abb. 80 dargestellte hydrochemische Analysen angegeben.

6.2 Ergebnisse / Aussagen

6.2.1 Grund- und Oberflächenwässer Luxemburgs

In Abb.80 ist eine Auswahl repräsentativer Grund- und Oberflächenwässer Luxemburgs, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden, dargestellt.

In dieser Darstellungsform (sog. PIPER-Diagramm; siehe z.B. DVWK, 1990 S.45ff) werden die prozentualen Anteile der ausgewiesenen Ionengruppen betrachtet, so daß der absolute Lösungsinhalt sich nicht auf diese Betrachtungen auswirkt. So ist es möglich, die insgesamt gering mineralisierten Grundwässer des Luxemburger Sandsteins und die ebenfalls gering mineralisierten Wässer aus den Devon-Gebieten des Öslings mit den härteren Grundwässern aus den Verbreitungsgebieten von Buntsandstein und Muschelkalk zu vergleichen.

Die Grundwässer der *solution de recharge* sind als Mittelwerte für einen Standort anzusehen. Hierbei ist das Grundwasser aus Trois Ponts in allen Teildiagrammen von den Grundwässern der anderen Standorte eindeutig zu unterscheiden. Eine deutliche Differenzierung zwischen den Standorten ist im Kationen-Diagramm durch Unterschiede in den Ca-, Mg-Gehalten und in den Gehalten an Alkali-Ionen (Na+K) gegeben. Der äußerst geringe Chloridgehalt des Luxemburger Sandstein-Grundwassers aus Trois Ponts wird im Anionen-Diagramm verdeutlicht.

Am Rande sei hier auf die Entwicklung hingewiesen, die sich für das Wasser aus den devonischen Formationen [d], deren oberflächlichem Abfluß in der Sauer [u], Speicherung im Stausee und anschließender Aufhärtung im Zuge der Trinkwasseraufbereitung [s] an Abb. 80 ablesen läßt.

Grundwassertypen (an den Standorten der *solution de recharge*)

Die in Abb. 80 so deutlichen Unterschiede zwischen den Grundwässern der Standorte der *solution de recharge* verlieren sich bei der Betrachtung von hydrochemischen Grundwassertypen nach FURTAK & LANGGUTH (1967). Die Grundwässer sind durchweg als "normal erdalkalische" Wässer mit einem "überwiegend hydrogenkarbonatischen" Anteil anzusprechen (Ca, Mg, HCO₃-Typ).

Schaedhaff: Die Proben der Grundwässer aus Schaedhaff plotten in Abb. 81 dicht gedrängt mitten in Feld 97.

Everlange: In Abb. 81 können die Proben den jeweiligen Brunnen zugeordnet werden, wobei die Grundwässer aus E15-2 bis E15-5 über das Feld "a" verteilt sind. Die besonderen hydraulischen Verhältnisse in E15-1 (vermuteter Einfluß einer Störung; siehe Kap.5.2.3.4 und Kap.5.4) werden auch in dieser Betrachtung deutlich. So tritt in E15-1 ein "hydrogenkarbonatisch-sulfatisches" bis "überwiegend sulfatisches", "normal erdalkalisches" Grundwasser auf.

6.2.2 Trois Ponts

Die Grundwässer aus dem Luxemburger Sandstein am Standort Trois Ponts sind alle sauerstoff- und nitratfrei und vom Typ her als "normal erdalkalische" Wässer mit einem "überwiegend hydrogenkarbonatischen" Anteil anzusprechen (Ca, Mg, HCO₃-Typ). Eine, für den Standort repräsentative Analyse aus gemittelten Werten ist im Formblatt der Tab. 20 dargestellt.

Die Mehrzahl der Grundwasserproben aus den Förderbrunnen und den Piezometern plotten in Abb. 82 dicht geschart im Bereich der Felder 99, 98. Die Variation der Proben aus TPPz1 und TPPz2 werden nicht weiter aufgelöst.

Für die Deckschichten müssen drei unterschiedliche Grundwässer angenommen werden. In TPPg50 tritt, als Extremfall, ein "alkalisches" Grundwasser mit "überwiegend sulfatisch-chlori-

dischen" Anteilen auf, wobei geringe noch auf die Erstellung der Grundwassermeßstelle zurückzuführende Einflüsse nicht ausgeschlossen werden können (vergl. Kap.5.2).

Die Grundwässer des Luxemburger Sandsteins unterscheiden sich in Trois Ponts nur so geringfügig, daß sie im Härtedreieck getrennt dargestellt werden müssen (Abb.83). Hierbei zeigt sich, daß bei den insgesamt geringen Lösungsinhalten (350-450 mg/l; 470-600 $\mu\text{S/cm}[25^\circ\text{C}]$) fast die gesamte Wasserhärte aus Karbonathärte besteht (KH 11-13 $^\circ\text{dH}$; 3,9-4,6 mmol/l(eq)). Die Gesamthärte ($\text{GH} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) übersteigt nur unwesentlich die äquivalenten Hydrogenkarbonatgehalte (KH), so daß die rechnerische Größe NKH (sog. nichtkarbonatgebundene Härte, $\text{NKH} = \text{GH} - \text{KH}$) deutlich < 1 mmol/l(eq) bleibt. Dies bedeutet, daß nur geringste Teile des Lösungsinhaltes aus chloridischen oder sulfatischen Salzen bestehen (sog. bleibende Härte).

In einigen Grundwasserproben aus den Piezometern übersteigt die Hydrogenkarbonatkonzentration die Summe aus Calcium und Magnesium um wenige Äquivalentkonzentrationseinheiten. Dies wird als ein Anzeichen für das Vorhandensein von Ionenaustauschprozessen angesehen. Von typischen Ionenaustauschwässern (SCHWILLE 1956, LÖHNERT 1967, 1970, 1973) kann bei den geringen Differenzen hier nicht gesprochen werden.

Da in den zeitlich genau auf den Pumpversuchsverlauf abgestimmten Grundwasserproben der Förderbrunnen gewisse, in Abb. 84 bei entsprechender Auflösung exemplarisch für TPBR1 dargestellte, gerichtet erscheinende Variationen auftreten, wird mit Abb. 85 anhand von kombinierten Härtediagrammen nach SCHWILLE (1957) versucht, die Änderungen in den Härtebildnern weiter aufzulösen. Durch diese Form der Darstellung ist es möglich, zusätzlich zum hochaufgelösten Härtediagramm, die Äquivalentkonzentrationen von Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} vergleichend zu betrachten. Aus dem Vergleich der Cl^- -Konzentrationen der Detaildiagramme zeigt sich, daß der Ansatz, Leakageanteile aus den Deckschichten an Änderungen der Chloridkonzentration festzumachen, aufzugeben ist. Es lassen sich weder systematische Änderungen in den Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Konzentrationen, noch in denen von Cl^- und SO_4^{2-} erkennen.

Durch die Auftragung der vor-Ort gemessenen hydrochemischen Parameter gegen die Zeit (Abb.86) lassen sich Veränderungen ablesen, die durch die Pumpversuche erzeugt wurden. Anhaltende gerichtete oder systematische Unterschiede treten nicht auf. Die mit dem Beginn des ersten Pumpversuchs einsetzenden, z.T. nur kurzzeitig anhaltenden Minima in den Ganglinien werden auf die Änderung (Aktivierung) der Kluftgrundwasserströmung und die damit verbundene neue hydraulische und hydrochemische Gleichgewichtseinstellung zurückgeführt. Bei Ansatz einer Doppelporositäts-Modellvorstellung kann dieses Verhalten mit der schnellen Entleerung der Kluftbahnen und einem sukzessive einsetzenden Gleichgewicht von Kluftströmung und Anströmung aus dem Porenraum der Gesteinsmatrix erklärt werden.

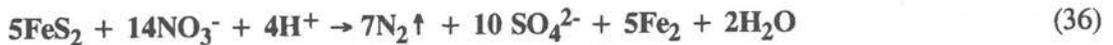
Die Grundwässer aus Trois Ponts sind chemisch stark reduziert, was sich an einem großen Sauerstoffdefizit und an den geringen, z.T. nicht mehr nachweisbaren Nitratgehalten erkennen läßt. Dies spiegelt sich auch in den vor-Ort-Messungen der RedOx-Potentiale (EH ca. 150 mV) wider. Hinweise zur RedOx-Potentialmessung, zu ggf. notwendigen Umrechnungen, zu Aussagemöglichkeiten und zum Interpretationsrahmen finden sich bei KÄSS & SEEBURGER (1989). Auf hydrochemische Details, wie z.B. Prädominanzfelder für bestimmte Ionengruppen (KÄSS & SEEBURGER 1989, STUMM & MORGAN 1981, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992) sowie auf die Zusammenhänge mit den pH-Bedingungen, die sich wiederum zusammen mit dem RedOx-Potential diskutieren lassen (z.B. BÖTTCHER et al. 1992), wird bei den geringen, nicht systematischen Variationen nicht näher eingegangen. Es werden im folgenden vielmehr die als wahrscheinlich erachteten, sich aus den hydrogeologischen Rahmendedingungen ergebenden, natürlich stattfindenden hydrochemischen und bakteriellen Prozesse (Reaktionspfade) aufgezeigt.

Die Sauerstofffreiheit wird als Folge von sauerstoffzehrenden Oxidationsreaktionen (35) verstanden (GERB 1953). Als chemische (Haupt-) Reaktion wird hierbei die Oxidation von Pyrit und Markasit (FeS_2) angenommen.



Die infiltrierenden sauerstoffreichen und nitrathaltigen Wässer oxidieren auf ihrem Weg in die überdeckten Bereiche des Grundwasserleiters den im Luxemburger Sandstein reichlich vorhandenen Pyrit auf. Dies führt zum Farbwechsel von blaugrau nach gelb-braun, der bekannten Farbe des anstehenden Sandsteins. Die Oxidationsreaktionen laufen solange ab, bis der gesamte im Wasser gelöste Sauerstoff aufgezehrt ist. Die bei diesen Oxidationsprozessen entstehenden Sulfate sind im Unterschied zu den Sulfiden sehr gut wasserlöslich (VOIGT 1990 S.74). Die freigesetzte Schwefelsäure wird durch das karbonatische Bindemittel des Luxemburger Sandsteins abgepuffert, so daß keine Erniedrigung des pH-Wertes auftritt.

Synchron mit der chemischen Oxidation wird noch in der nichtsaturierten Zone bzw. im oberen Bereich des Grundwassers eine bakterielle Nitratreduktion stattfinden (DVWK 1988 S.163ff, ROHMANN & SONTHEIMER 1985, BÖTTCHER et al. 1992 S.221), bei der Pyrit und Markasit (FeS_2) als Protonendonatoren fungieren (KÖLLE 1982).



Das hierbei freigesetzte zweiwertige Eisen kann in einer weiteren Denitrifikationsreaktion eingebunden sein (KÖLLE et al. 1985).



Im tieferen, dann bereits sauerstoff- und nitratfreien Bereich des Grundwasserleiters kann der erhöhte Sulfatgehalt durch bakterielle Sulfatreaktion zu gasförmigem (\uparrow) Schwefelwasserstoff umgewandelt werden (KÖLLE 1982).



Der für die bakterielle Aktivität benötigte organische Kohlenstoff sollte im Luxemburger Sandstein in ausreichendem Maße vorhanden sein. Mit diesem Vorgang ist wiederum eine Aufhärtung des Grundwassers verbunden.

Anzeichen dieser im oberflächennahen Bereich nach (35) schnell fortschreitenden Verwitterung sind die Gipsbestege auf Klüften und die Gipsausblühungen an der Oberfläche von größeren Gesteinseinheiten (LUCIUS 1948 S.142ff). Die aufgezeigten Variationen in der Grundwasserhärte lassen sich auf die beschriebenen Oxidations- und Reduktionsvorgänge zurückführen, doch nicht in einen direkten ursächlichen Zusammenhang mit den Grundwasserentnahmen bringen. In dem leicht basischen Milieu (pH 7-7,5) treten in Trois Ponts die angesprochenen Eh-Werte auf, die gut mit den bei SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992, S.131, dortige Tab.53) dargestellten, experimentell ermittelten RedOx-Potentialen übereinstimmen. Bei der Anwesenheit von Bakterien (z.B. *Thiobacillus ferrooxidans*) im direkten, z.T. belüfteten Bereich eines Brunnens kann sich die Aufoxidation von gelösten Eisen- und Manganverbindungen sehr schnell vollziehen, was in einigen Brunnen während der Stillstandsphase vor den Pumpversuchen beobachtet wurde.

Diesen Grundwässern des Luxemburger Sandsteins werden durch Leakage Wässer der Deckschichten beigemischt (vergl. Kap.4 und 5). Unter den geringdurchlässigen, mergelig-kalkigen Bedingungen der Deckschichten finden Ionenaustauschprozesse statt, die sich in den Grundwasserproben durch eine um max. 1,5 Härteäquivalente größere Karbonathärte (gegenüber GH) ausdrückt. Dieser nur geringe Ionenaustausch führt nicht zu typischen Ionenaustauschwässern, läßt sich aber im Grundwasser des Luxemburger Sandstein-Aquifers wiederfinden. In den

natürlich durchströmten, von den Grundwasserentnahmen zur Zeit der Probenahme noch nicht durchmischten Bereiche der Piezometer werden diese Einflüsse im Härtedreieck durch ihre Position an der Grenze oder im erweiterten Dreiecksbereich deutlich (Abb.83). An den Grundwasserproben aus den Förderbrunnen ist dies nicht erkennbar, was die Verwendung von Ionenbilanzen erfordert. Unter den gegebenen geologischen Bedingungen in Trois Ponts und bei den geringen Chloridgehalten des Luxemburger Sandstein-Grundwassers sind die NaCl-Salzgehalte als geogen anzusehen. Dies erlaubt über das Na^+/Cl^- -Ionenverhältnis eine Berechnung eines ggf. "überschüssigen", nicht aus NaCl-Salz stammenden Na-Anteiles. Dieser wird - nach den Modellvorstellungen zur Grundwasserströmung - aus den erhöhten Na-Anteilen der Leakage-Wässer stammen. Mit diesem Hinweis besteht die Möglichkeit, die in Kap. 4 und 5 nachgewiesenen Leakage-Einflüsse - wenigstens in Ansätzen - nachzuvollziehen. In Abb. 86 sind die Probenserien mit einer Punksignatur unterlegt, bei denen das Cl^-/Na^+ -Ionenverhältnis < 1 ist; also Na-Überschuß besteht. Für TPBR4 bestätigen sich die in Kap. 5 postulierten höheren Leakageanteile. In den anderen Brunnen verlieren sich die Anzeichen von Leakage mit zunehmendem Grundwasseraustausch. In TPBR3 widerspricht das nicht immer eindeutig ausgeglichene Cl^-/Na^+ -Ionenverhältnis dem Ansatz von möglichen etwas erhöhten Leakageanteilen nicht.

6.2.3 Koerich

Die Grundwässer in Koerich entsprechen dem Ca-Mg- HCO_3 -Typ. Bei elektrischen Leitfähigkeiten von 500 bis 700 $\mu\text{S}/\text{cm}[25^\circ\text{C}]$, mit einem mittleren Lösungsinhalt um 460 mg/l, mit ca. 14-18°dH (entsprechend 5-6.4 mmol/l(eq) Ca+Mg) sind diese Grundwässer nach KÄSS (1965) als "mittelhart" zu bezeichnen. Die pH-Werte liegen im leicht basischen Bereich (pH 7-7.5) und die RedOx-Potentiale (EH 200 bis < 400 mV) spiegeln die unterschiedlichen Sauerstoffgehalte wider. Je nach Position der Probenahmestelle schwanken die Gehalte an gelöstem Sauerstoff von gesättigt (im Eischtal) bis leicht reduziert (im Übergangsbereich zum überdeckten Luxemburger Sandstein).

Der Schwerpunkt der Grund- und Oberflächenwasserproben aus Koerich liegt in Abb. 87 im Feld 97, wobei von diesem Punkt ausgehend jede hydrogeologisch ausgrenzbare Gruppierung in ihrer Variation erkannt werden kann. Es lassen sich folgende, bereits in den vorangegangenen Kap. 4 und 5 aufgestellte Gruppen unterscheiden: Brunnen im Eischtal (KBR1, KBR2), Quellen, Eisch, KBR3 und KBR4. In diesem Verhalten spiegeln sich die jeweiligen hydrogeologischen Besonderheiten der Probenahmestelle wider. So läßt sich z.B. die Position der Proben aus KBR4 im Diagramm der Abb. 87 gut mit der hydrogeologischen Brunnenposition und mit dem erkennbar geringen Unterschied zu den Grundwasserproben aus Trois Ponts (Abb.82) in Einklang bringen. Das in den Quellschüttungen gewisse, nicht zu vernachlässigende Anteile an chemisch reduzierten Grundwässern des überdeckten Bereiches teilhaben, läßt sich ebenfalls aus diesem Diagramm ablesen. Tendenzielle Veränderungen, die den jeweiligen Probenahmestellen zugeordnet werden können, sind bereits in Kap. 5.4 durch die Kombination von hydrochemischen Befunden mit Isotopendaten beschrieben worden (Abb.74). Durch diese Kombination von PIPER-Diagrammen mit kombinierten Härte-Diagrammen nach SCHWILLE (1957) kann sowohl der prozentuale, als auch der absolute Gehalt an gelösten härtebildenden Hauptionen betrachtet werden. So zeigt sich aus dem Vergleich der Abb. 88 bis 90, daß die Gesamthärte (GH) von KBR4 über KBR1 und die Quellen im Eischtal nach KBR3 zunimmt. Eine vergleichbare Entwicklung ist für die Sulfatgehalte festzustellen. Die bereits angedeutete, leicht gesonderte Stellung von KBR3 wird durch diese hydrochemischen Untersuchungen bestätigt, wobei eine gewisse anthropogene Beeinflussung nicht auszuschließen ist.

Zusammenfassend zeigen die hydrochemischen Untersuchungen für die Luxemburger Sandstein-Grundwässer der Standorte Trois Ponts und Koerich einen insgesamt einheitlichen, gering mineralisierten Ca-Mg-HCO₃-Typ, der sich im überdeckten Bereich durch ein reduziertes Milieu auszeichnet. Einflüsse von Leakage können durch detaillierte Aufschlüsselung des Lösungsinhaltes nachvollzogen werden. Ein auf den außergewöhnlich geringen Chloridgehalt abgestellter Leakagenachweis konnte nicht geführt werden. Als wahrscheinlich erachtete chemische und bakterielle Oxidations- und Reduktionsprozesse können aufgezeigt werden. Aufschlußreiche Ergebnisse wurden aus der Kombination von Isotopendaten mit hydrochemischen Daten (Kap.5) erzielt.

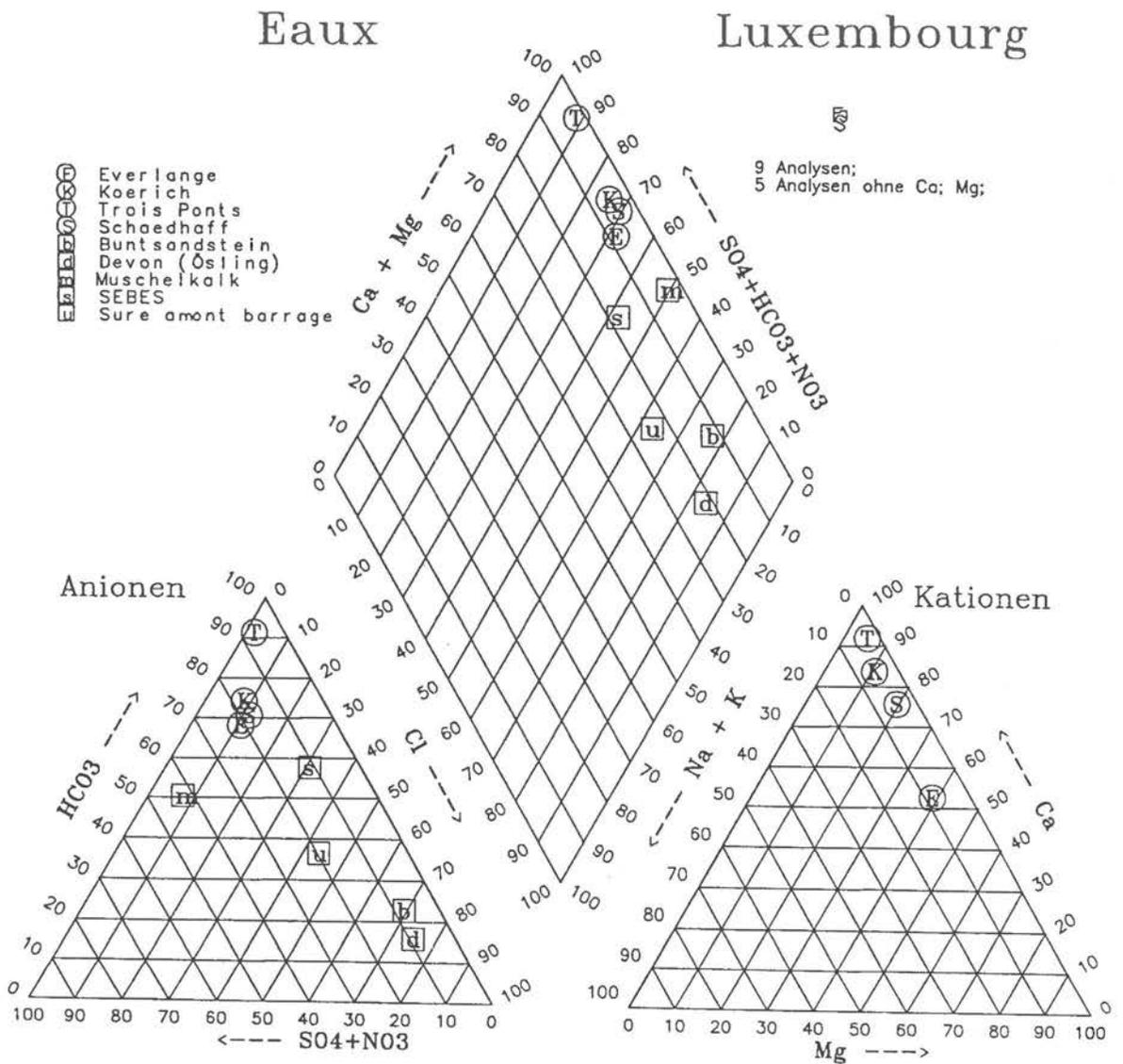


Abb. 80: In Luxemburg zur Trinkwassergewinnung genutzte Oberflächen- und Grundwässer

"Mean-K"

Entnahmestelle: Koerich , Luxembourg KBR1, KBR2, KBR3, KBR4

r: *1 h: *1 Meßpkt.: *1 müNN

BEPROBUNG:

Probenbezeichnung: Mittelwerte aus: KBR1, KBR2, KBR3, KBR4 Probennahme am: 6.11.1990

Entnahme mit: Pumpversuch

GwSpiegel vor [m]: *1 [müNN]: *1 nach [m]: *1 [müNN]: *1
 Entnahme- Tiefe [m]: *1 [müNN]: *1 -Dauer [h]: *1 -Rate: *1
 Probennahmetiefe [m]: *1 [müNN]: *1 Förderstrom[l/min]: *1

PARAMETER:

Temp. Förderstr. [°C]: 9

LF [20°C in µS/cm]: 474 [25°C]: 526

Eh-Wert [mV]: -33 - 88 pH-Wert: 7.3 EH-Wert [mV]: 184 - 305 *2

O₂-Gehalt [%]: 3 - 33 *3 [mg/l]: 0.4 - 3.9 *3

Lufttemp. [°C]: 3 Luftdruck []:

analysiert durch: ADMINISTRATION DE L'ENVIRONNEMENT: Division des Eaux

Laborproben-Nr.: 4887 - 4891

HÄRTEN:

	°dH	°fH	H.eq.
Gesamthärte:	14.84	26.5	5.30
Karbonathärte:	11.26	20.1	4.02
Nicht-Karbonathärte:	3.58	6.4	1.28

+++ KATIONEN +++

	mg/l	mmol/l	mmol/l(eq)	mmol(eq)%	°fH	H.eq.
Natrium Na ⁺ :	6.30	0.27	0.27	4.89		
Kalium K ⁺ :	0.80	0.02	0.02	0.37		
Ammonium NH ₄ ⁺ :	<0.1	0.00	0.00	0.00		
Calcium Ca ²⁺ :	94.19	2.35	4.70	83.91	23.5	4.70
Magnesium Mg ²⁺ :	7.29	0.30	0.60	10.71	3.0	0.60
Eisen Fe ²⁺ :	0.14	0.00	0.01	0.09		
Mangan Mn ²⁺ :	0.04	0.00	0.00	0.03		

	108.76	2.95	5.60	100.00	26.5	5.30

--- ANIONEN ---

	mg/l	mmol/l	mmol/l(eq)	mmol(eq)%		
Hydrogencarbonat HCO ₃ ⁻ :	245.28	4.02	4.02	74.30		
Chlorid Cl ⁻ :	10.60	0.30	0.30	5.53		
Sulfat SO ₄ ²⁻ :	45.00	0.47	0.94	17.32		
Nitrat NO ₃ ⁻ :	9.60	0.15	0.15	2.86		
Nitrit NO ₂ ⁻ :	<0.05					
Ortho-Phosphate P:					:berechnet als PO ₄ ²⁻	

	310.48	4.94	5.41	100.00		

KATIONEN + ANIONEN: 419.24 7.89 11.01 200.00

Ionenbilanzfehler: 3.45 %

IONEN-Verhältnisse:	Na/K	Ca/Mg	Na+K/Ca+MgHCO ₃ /Cl+SO ₄	Cl/SO ₄ (Na+K)/Cl	Cl/Na
mg/l:	7.87	12.92	0.07	4.41	0.24
mmol/l:	13.39	7.83	0.11	5.24	0.64
mmol/l(eq):	13.39	7.83	0.06	3.25	0.32

BEMERKUNGEN: *1 die jeweiligen Werte sind in den Formblättern des entsprechenden Brunnens abgelegt

*2 max. Wert in Koerich: EH 430 mV

*3 max. Wert in Koerich: O₂-Gehalt 53% bzw. 5.8 mg/l

"Mean-TP"

Entnahmestelle: Trois Ponts, Luxembourg

r: *1 h: *1 Meßpkt.: *1 mÜNN

BEPROBUNG: MITTELWERTE aus Analysen der fünf Brunnen

Probenbezeichnung: TPBR1-10;2-10;3-10;4-10;5-10 Probennahme am: 27.11.90

Entnahme mit: installierter Fördertechnik

GwSpiegel vor [m]: *1 [mÜNN]: *1 nach [m]: *1 [mÜNN]: *1

Entnahme-Tiefe [m]: *1 [mÜNN]: *1 -Dauer[h]: *1 -Rate: *1

Probennahmetiefe [m]: *1 [mÜNN]: *1 Förderstrom[l/min]: *1

PARAMETER:

Temp. Förderstr. [°C]: 12

LF [20°C in µS/cm]: 386 [25°C]: 430

Eh-Wert [mV]: -69 pH-Wert: 7.27 EH-Wert [mV]: 148

O₂-Gehalt [%]: nn [mg/l]: nn

Lufttemp. [°C]: 1 Luftdruck []:

analysiert durch: ADMINISTRATION DE L'ENVIRONNEMENT: Division des Eaux

Laborproben-Nr.: 5233, 5234, 5235, 5236, 5237

HÄRTEN:

	°dH	°fH	H.eq.
Gesamthärte:	12.38	22.10	4.42
Karbonathärte:	11.82	21.10	4.22
Nicht-Karbonathärte:	0.56	1.0	0.20

+++ KATIONEN +++

	mg/l	mmol/l	mmol/l(eq)	mmol(eq)%	°fH	H.eq.
Natrium Na ⁺ :	1.88	0.08	0.08	1.80		
Kalium K ⁺ :	0.86	0.02	0.02	0.48		
Ammonium NH ₄ ⁺ :	<0.1					
Calcium Ca ²⁺ :	84.01	2.10	4.19	92.06	21.0	4.19
Magnesium Mg ²⁺ :	2.82	0.12	0.23	5.10	1.2	0.23
Eisen Fe ²⁺ :	0.72	0.01	0.03	0.57		
Mangan Mn ²⁺ :	<0.05					

90.29 2.33 4.55 100.00 22.2 4.42

--- ANIONEN ---

	mg/l	mmol/l	mmol/l(eq)	mmol(eq)%
Hydrogencarbonat HCO ₃ ⁻ :	257.00	4.21	4.21	91.49
Chlorid Cl ⁻ :	3.20	0.09	0.09	1.96
Sulfat SO ₄ ²⁻ :	14.48	0.15	0.30	6.55
Nitrat NO ₃ ⁻ :	<0.1			
Nitrit NO ₂ ⁻ :	<0.05			

Ortho-Phosphate P:

: errechnet als PO₄²⁻-----
274.68 4.45 4.60 100.00

KATIONEN + ANIONEN: 364.97 6.78 9.16 200.00

Ionenbilanzfehler: 1.09 %

IONEN-Verhältnisse:

	Na/K	Ca/Mg	Na+K/Ca+Mg	HCO ₃ /Cl+SO ₄	Cl/SO ₄ (Na+K)/Cl	Cl/Na
mg/l:	2.19	29.79	0.03	14.54	0.22	0.86
mmol/l:	3.72	18.07	0.05	17.48	0.60	1.15
mmol/l(eq):	3.72	18.07	0.02	10.75	0.30	1.10

BEMERKUNGEN: *1 die jeweiligen Werte sind in den Formblättern des entsprechenden Brunnens abgelegt

Tab. 21: Formblatt mit gemittelten hydrochemischen Analyseergebnissen für den Standort Trois Ponts

Gw-Typen / -Kennzahlenintervalle

Normal erdalkalische Wässer

- a: überwiegend hydrogenkarbonatisch ($>80 // >60 / <10$)
- b: hydrogenkarbonatisch-sulfatisch ($>80 // 40-60 / <10$)
- c: überwiegend sulfatisch ($>80 // <40 / <10$)

Erdalkalische Wässer mit höherem Alkaligehalt

- d: überwiegend hydrogenkarbonatisch ($50-80 // >50 / <20$)
- e: überwiegend sulfatisch ($50-80 // <50 / <20$)
- überwiegend chloridisch ($50-80 // <50 / >50$)

Alkalische Wässer

- f: überwiegend (hydrogen-) carbonatisch ($<50 // >50 / <50$)
- g: überwiegend sulfatisch-chloridisch ($<50 // <50 / >50$)
- überwiegend chloridisch ($<50 // <20 / >70$)

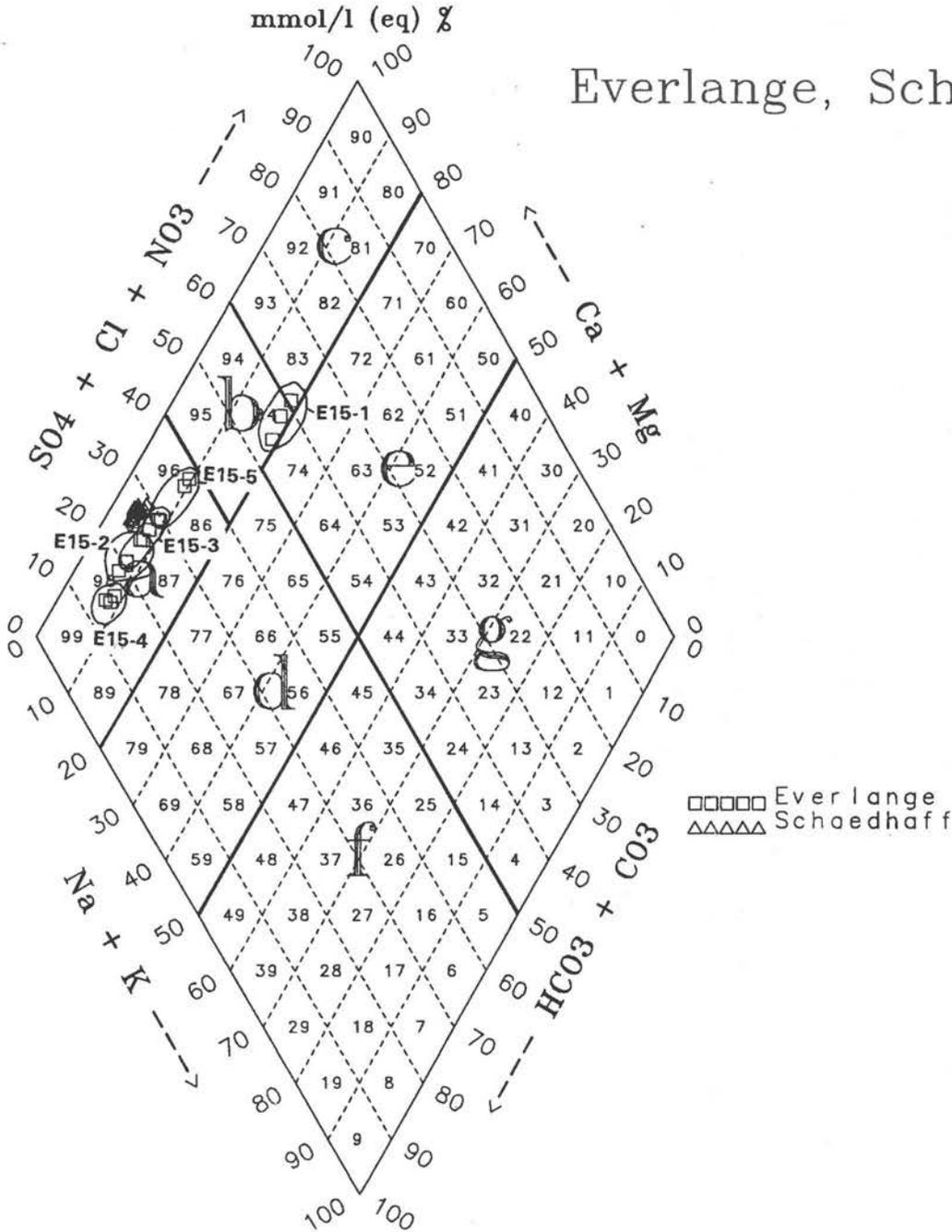


Abb. 81: Grundwassertypen-Diagramm mit Kennzahlenintervalle für die Grundwässer der Standorte Everlange und Schaedhaff

Gw-Typen / -Kennzahlenintervalle

- Normal erdalkalische Wasser**
- a: Überwiegend hydrogenkarbonatisch ($>80 // >60 / <10$)
 - b: hydrogenkarbonatisch-sulfatlich ($>80 // <40 - 60 / <10$)
 - c: Überwiegend sulfatlich ($>80 // <40 / <10$)
- Erdalkalische Wasser mit höherem Alkaligehalt**
- d: Überwiegend hydrogenkarbonatisch ($50-80 // >50 / <20$)
 - e: Überwiegend sulfatlich ($50-80 // <50 / <20$)
 - f: Überwiegend chloridisch ($50-80 // <50 / >50$)
- Alkalische Wasser**
- g: Überwiegend (hydrogen-) carbonatisch ($<50 // >50 / <50$)
 - h: Überwiegend sulfatlich-chloridisch ($<50 // <50 / >50$)
 - i: Überwiegend chloridisch ($<50 // <20 / >70$)

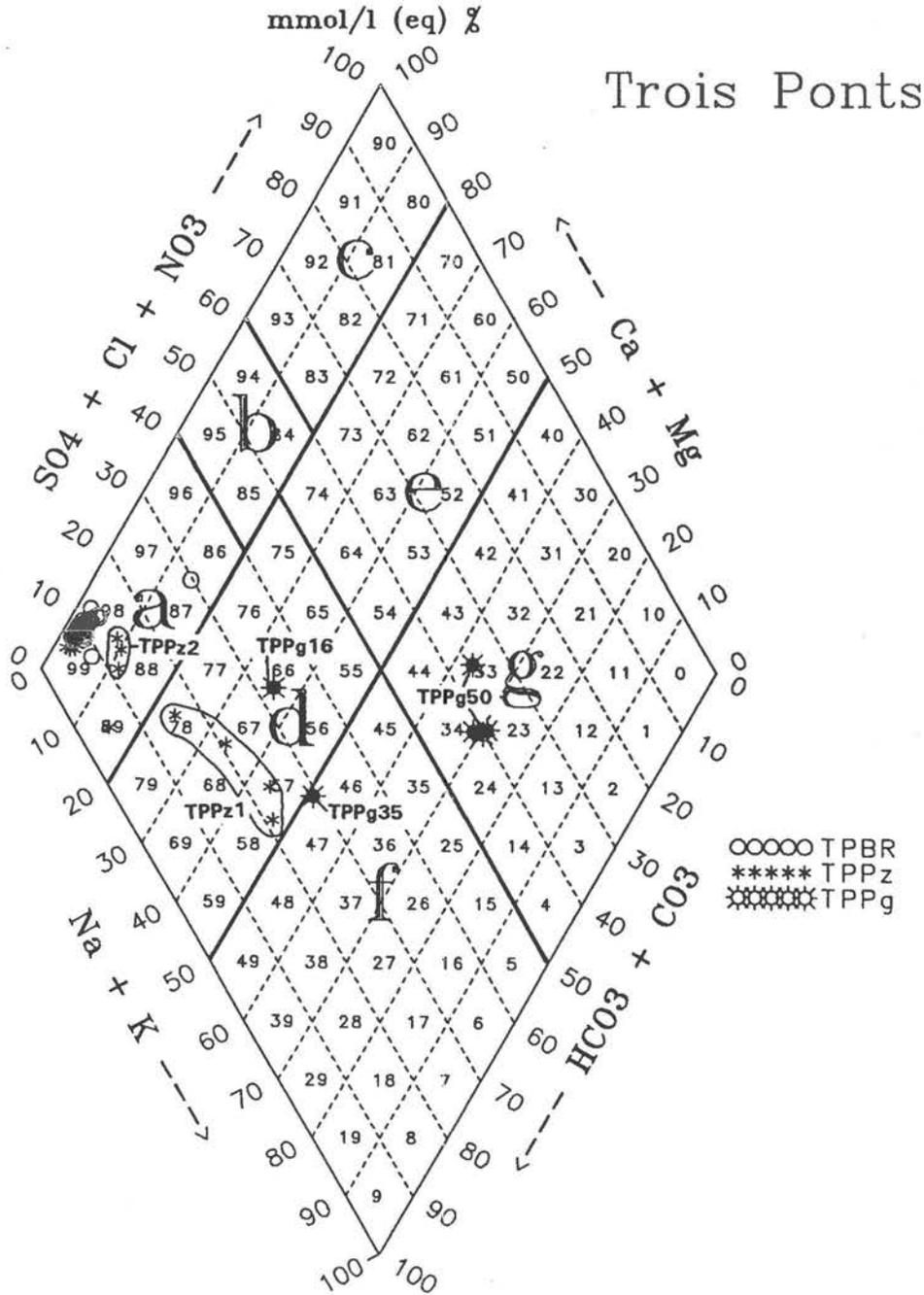


Abb. 82: Grundwassertypen-Diagramm mit Kennzahlenintervalle für die Grundwässer am Standort Trois Ponts

GwHärten – Trois Ponts

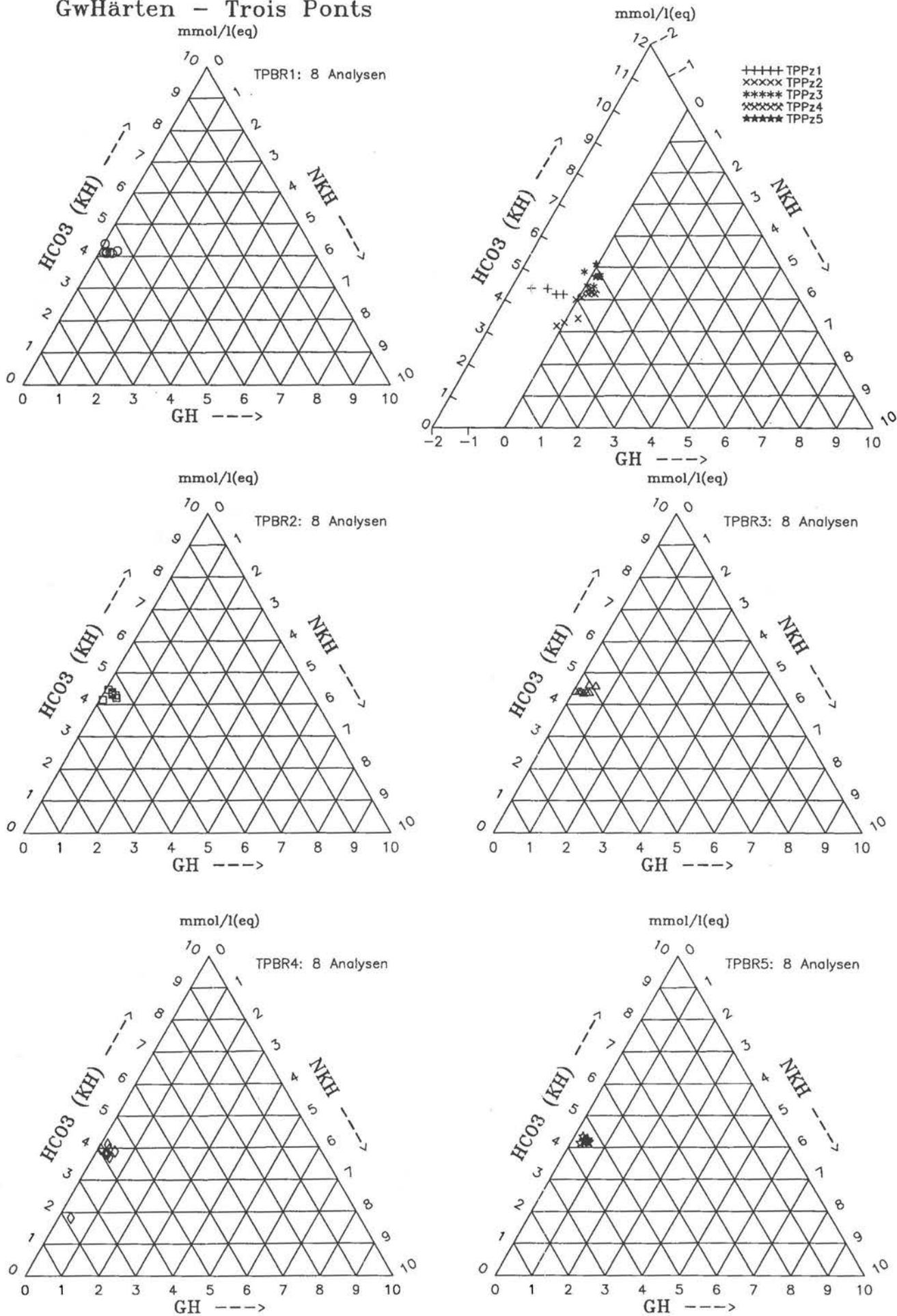
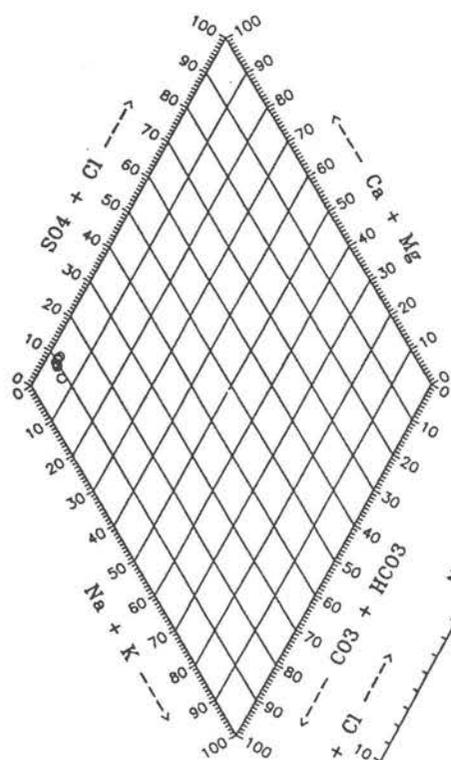
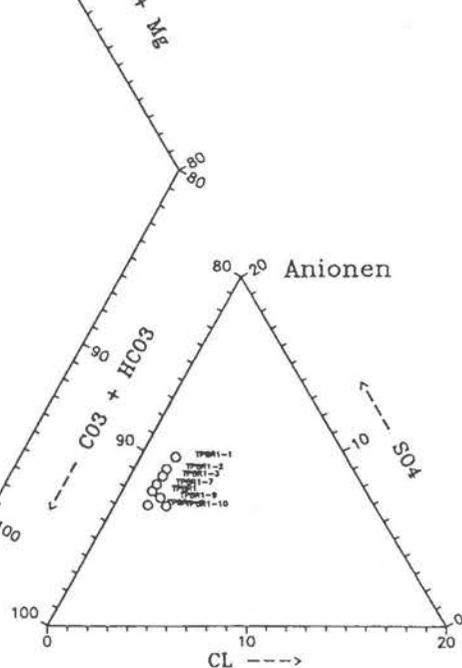
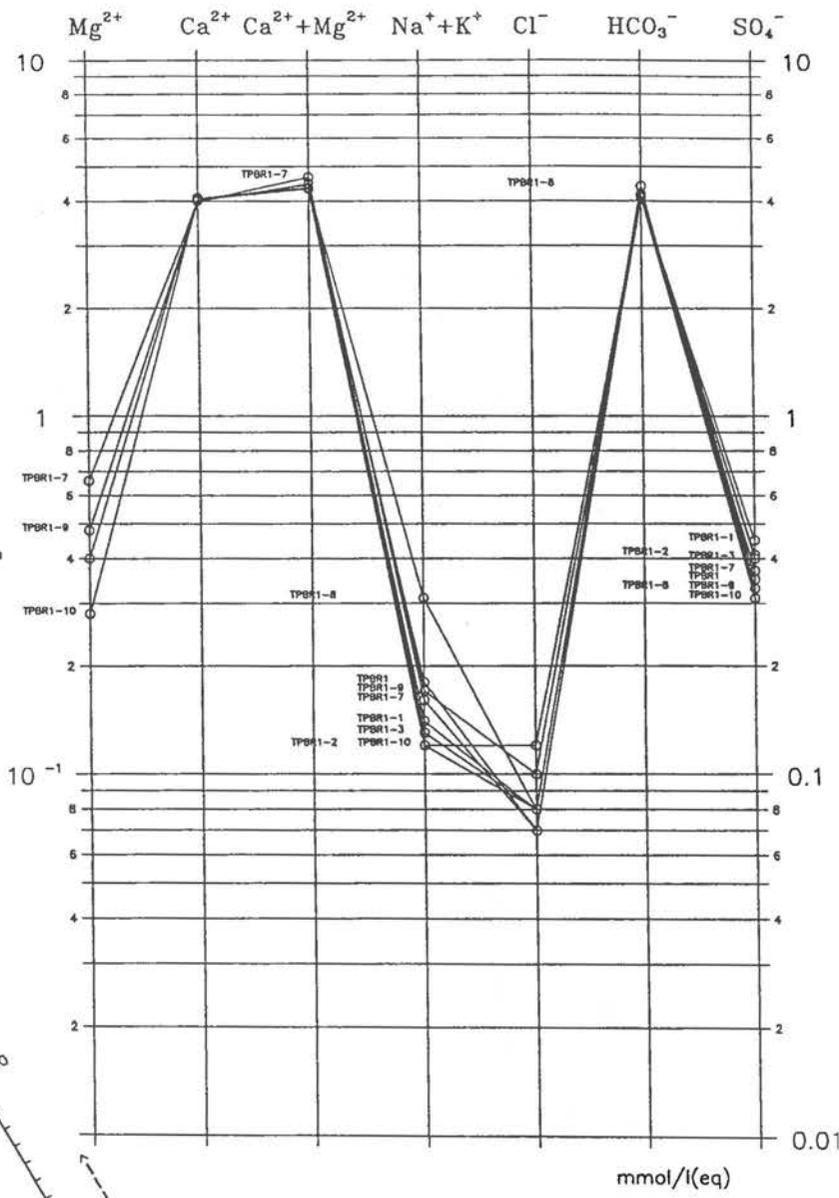
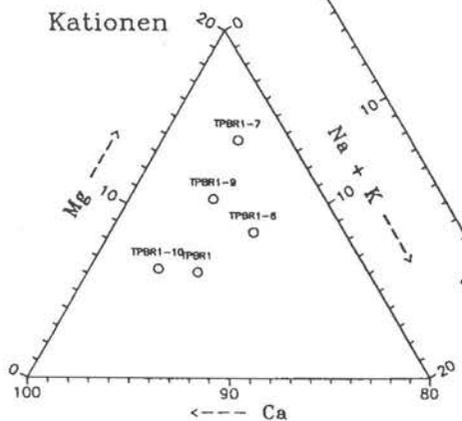


Abb. 84: Darstellung der im Grundwasser am Standort Trois Ponts aufgetretenen Variation im Lösungsinhalt am Beispiel von Brunnen TPBR1



TPBR1
 8 Analysen;
 3 Analysen ohne Ca; Mg;
 (...-1;...-2;...-3)



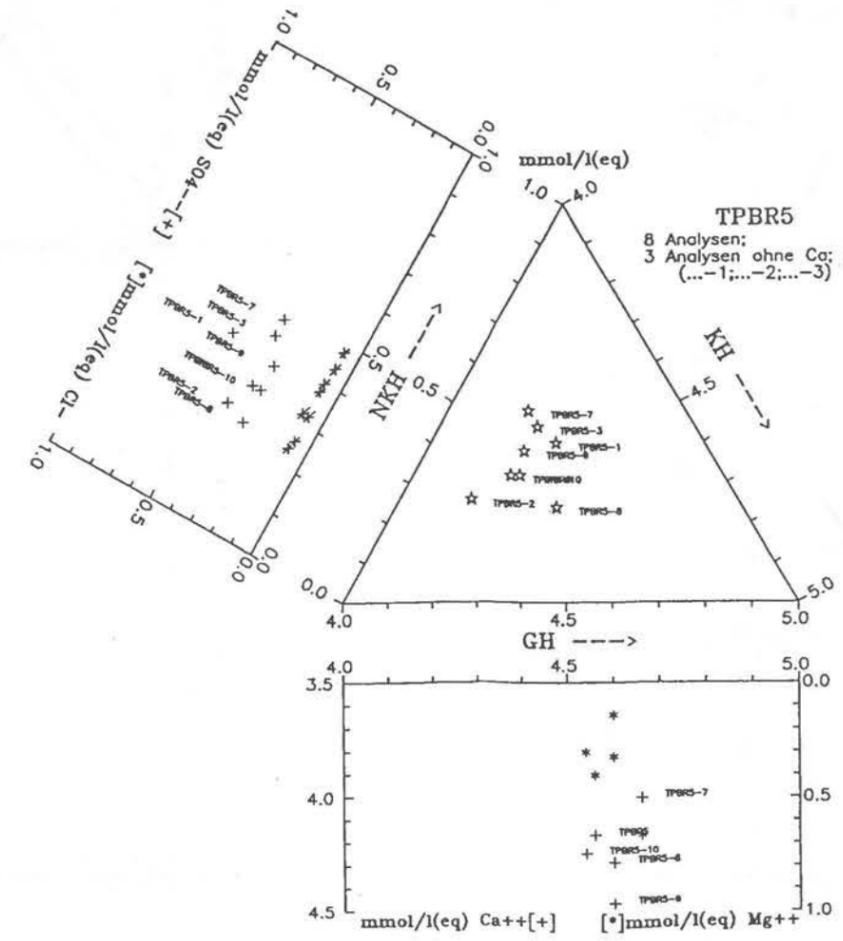
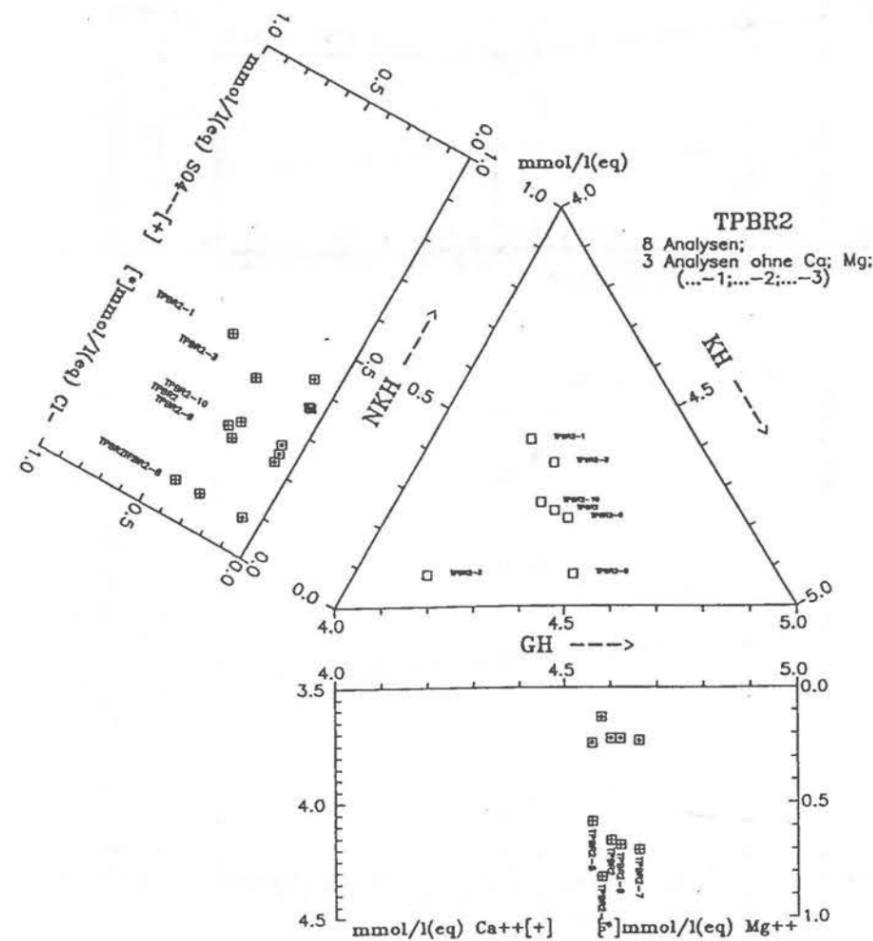
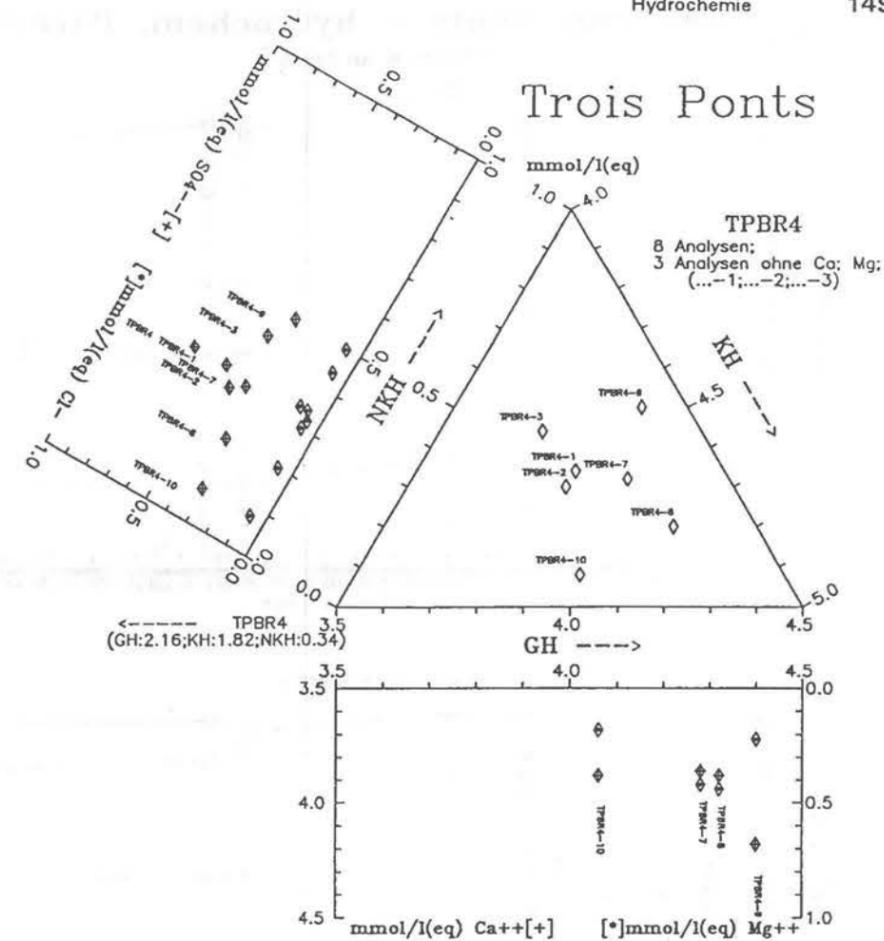
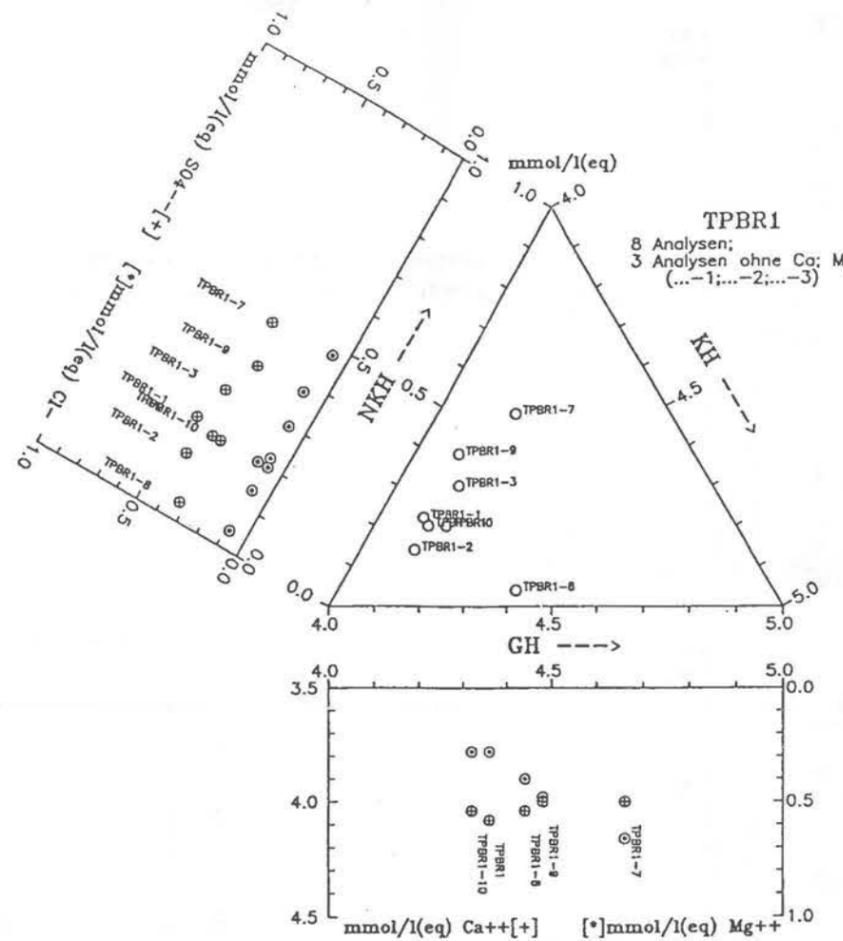
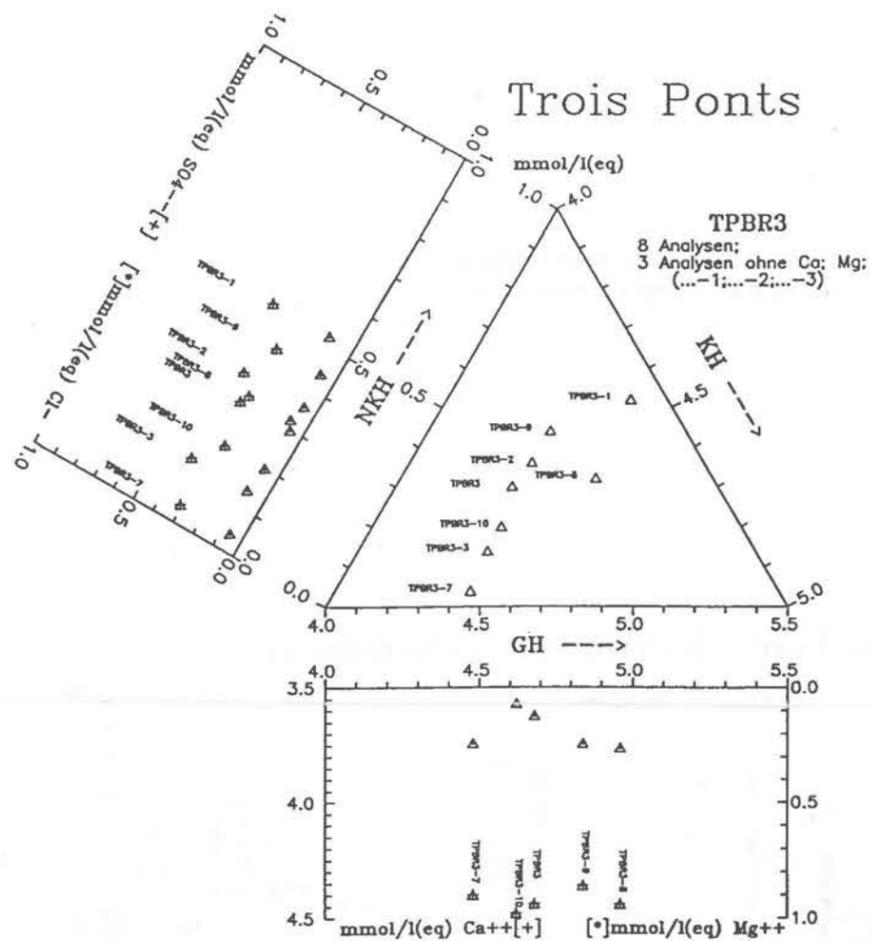


Abb. 85: Kombination von hochaufgelösten Härtedreiecksdiagrammen mit xy-Diagrammen zu Veranschaulichung der Variation der Härtebildner in den Grundwässern aus den Brunnen in Trois Ponts

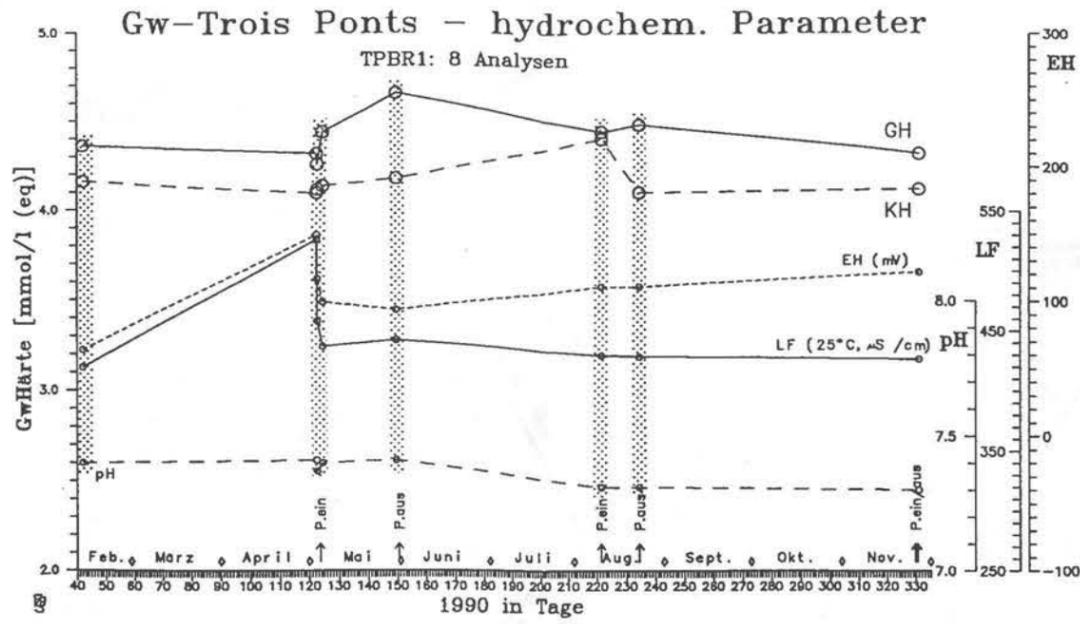
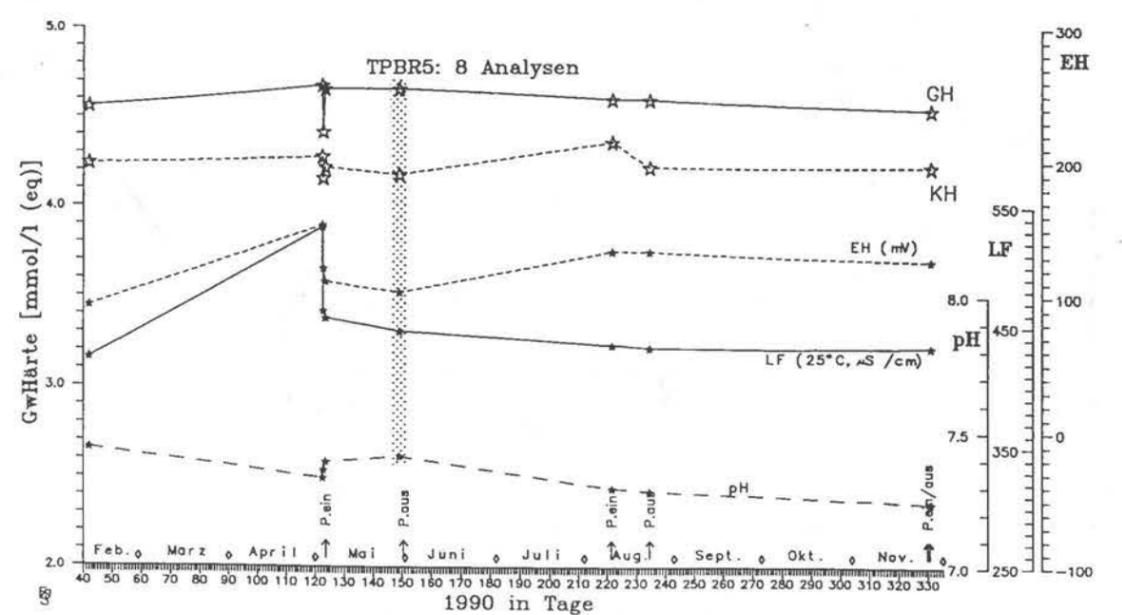
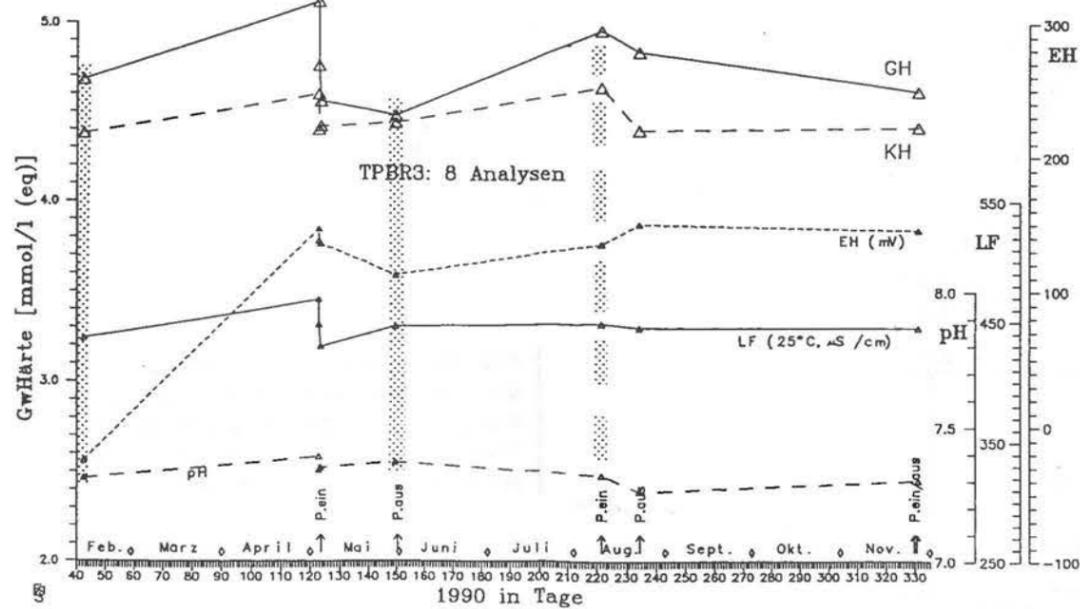
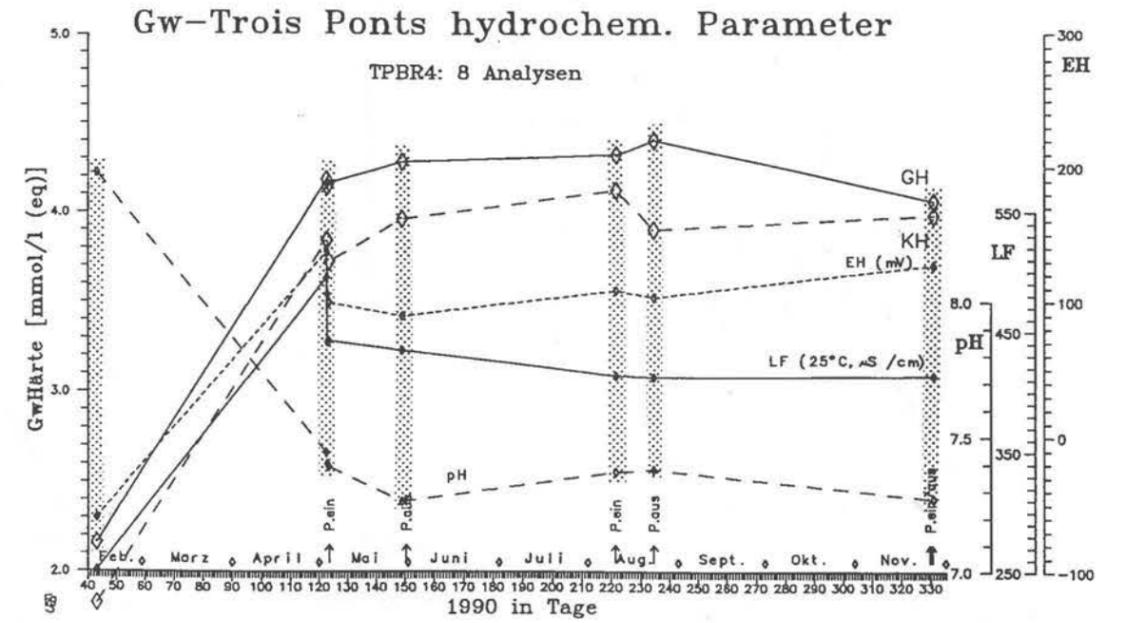
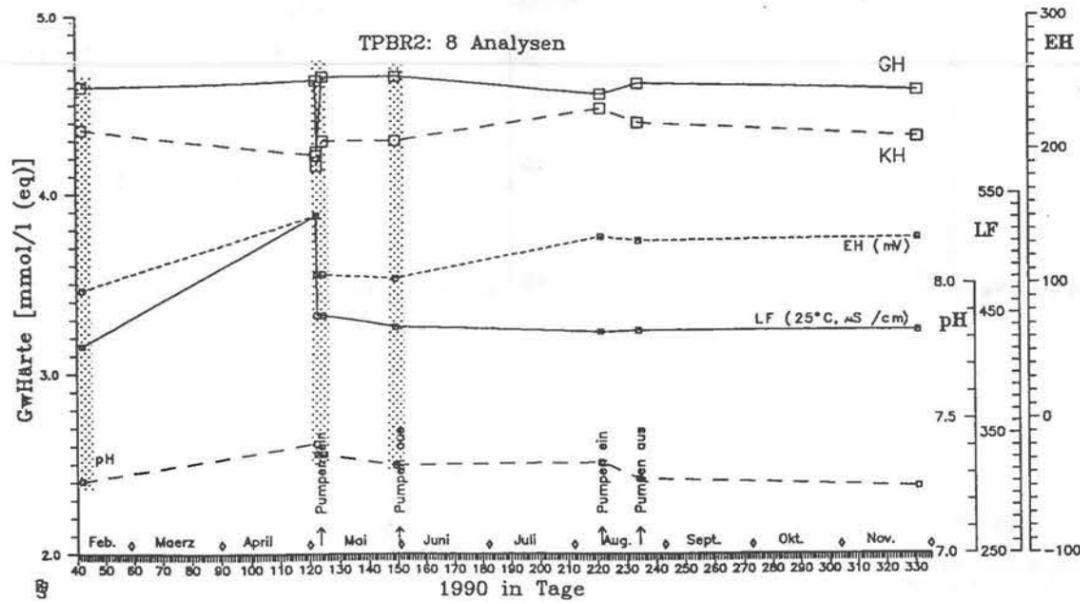


Abb. 86: Variation der vor-Ort gemessenen hydrochemischen Parameter. In den, mit einer Punktsignatur unterlegten Grundwasserproben tritt ein "Na-Überschuß" auf, der auf Leakage-Einflüsse zurückgeführt wird.



Gw-Typen / -Kennzahlenintervalle

Normal erdalkalische Wasser

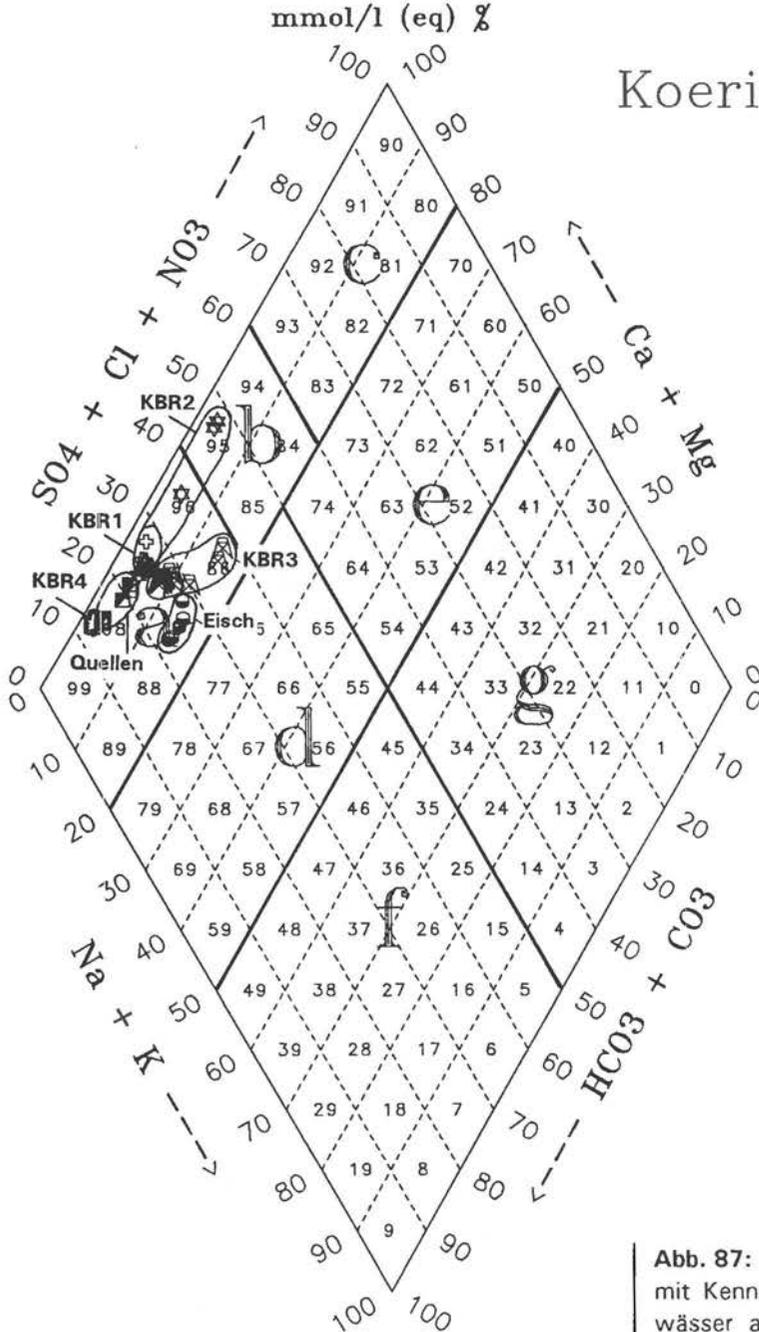
- a: überwiegend hydrogenkarbonatlich ($>80//>60/<10$)
- b: hydrogenkarbonatlich-sulfatlich ($>80//40-60/<10$)
- c: überwiegend sulfatlich ($>80//<40/<10$)

Erdalkalische Wasser mit höherem Alkaligehalt

- d: überwiegend hydrogenkarbonatlich ($50-80//>50/<20$)
- e: überwiegend sulfatlich ($50-80//<50/<20$)
- Überwiegend chloridisch ($50-80//<50/>50$)

Alkalische Wasser

- f: überwiegend (hydrogen-) carbonatlich ($<50//>50/<50$)
- g: überwiegend sulfatlich-chloridisch ($<50//<50/>50$)
- Überwiegend chloridisch ($<50//<20/>70$)



Koerich

Abb. 87: Grundwassertypen-Diagramm mit Kennzahlenintervalle für die Grundwässer am Standort Koerich. Es wird folgende Gruppierung erkannt: Quellen, Eisch, KBR3, KBR4, Brunnen im Eischtal (KBR1, KBR2).

Koerich

KBR1

5 Analysen;

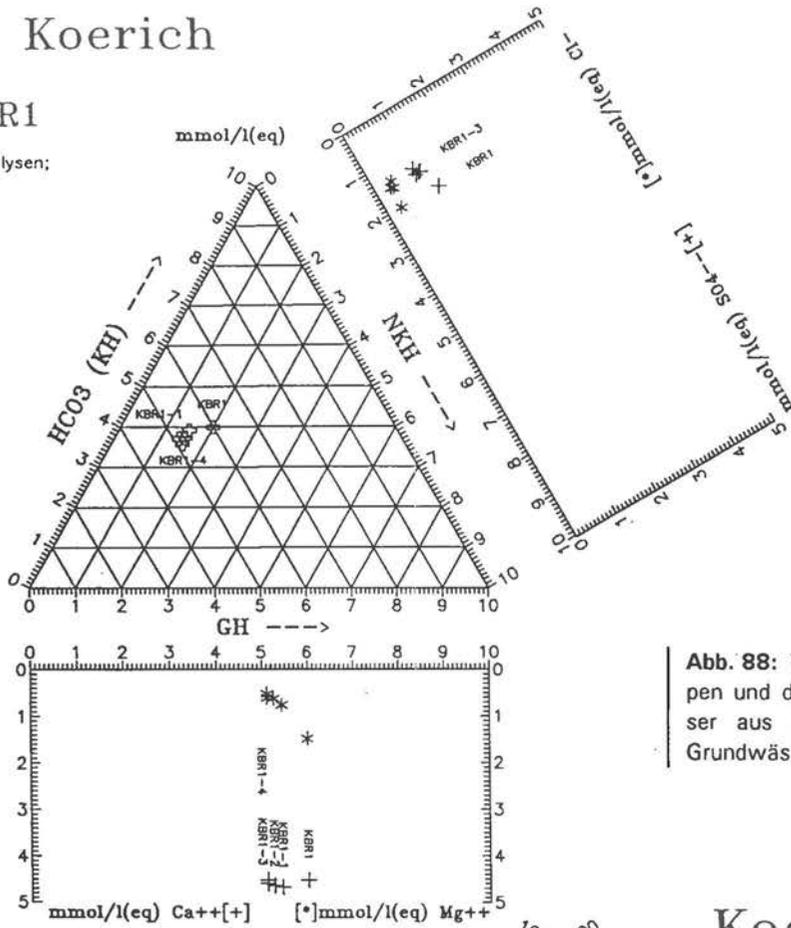
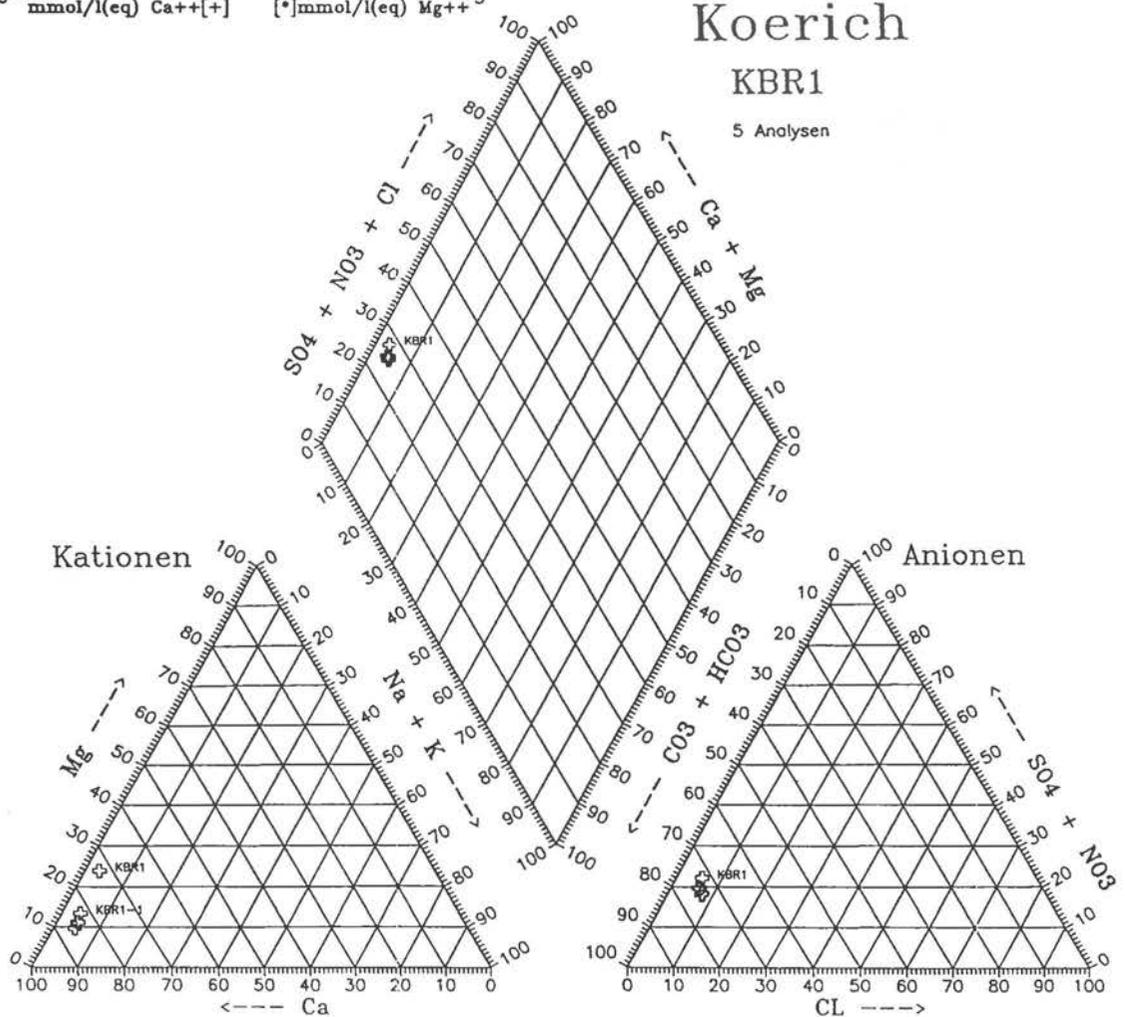


Abb. 88: Variation der Hauptionengruppen und der Härtebildner im Grundwasser aus KBR1, als Beispiel für die Grundwässer im Eischtal in Koerich

Koerich

KBR1

5 Analysen



Koerich

KBR4

6 Analysen;

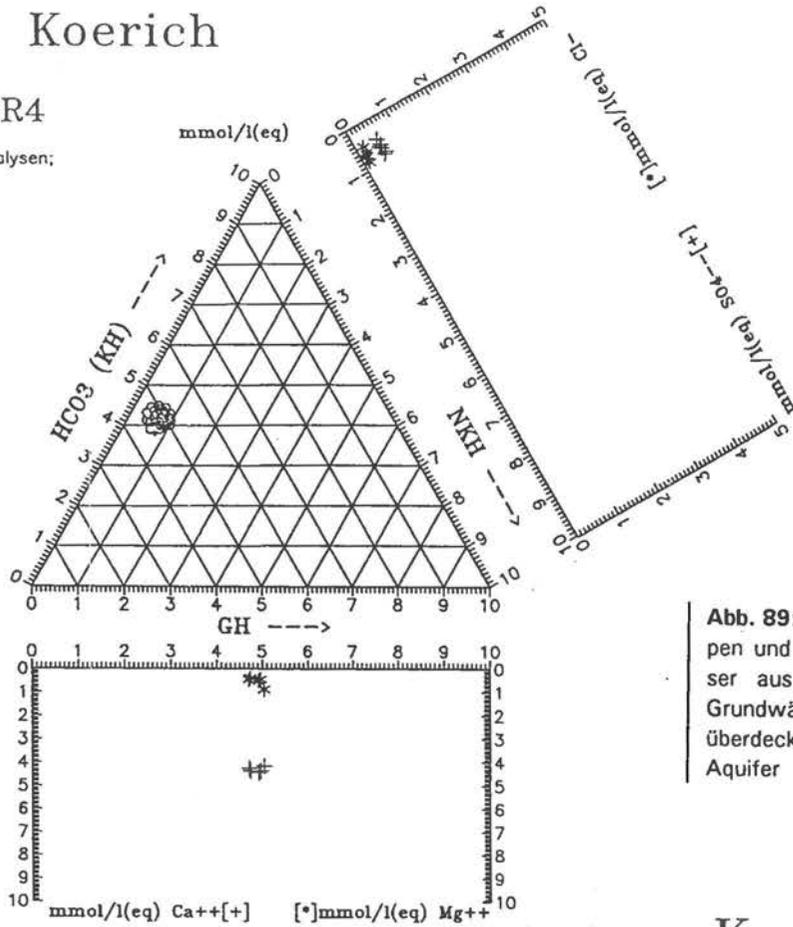
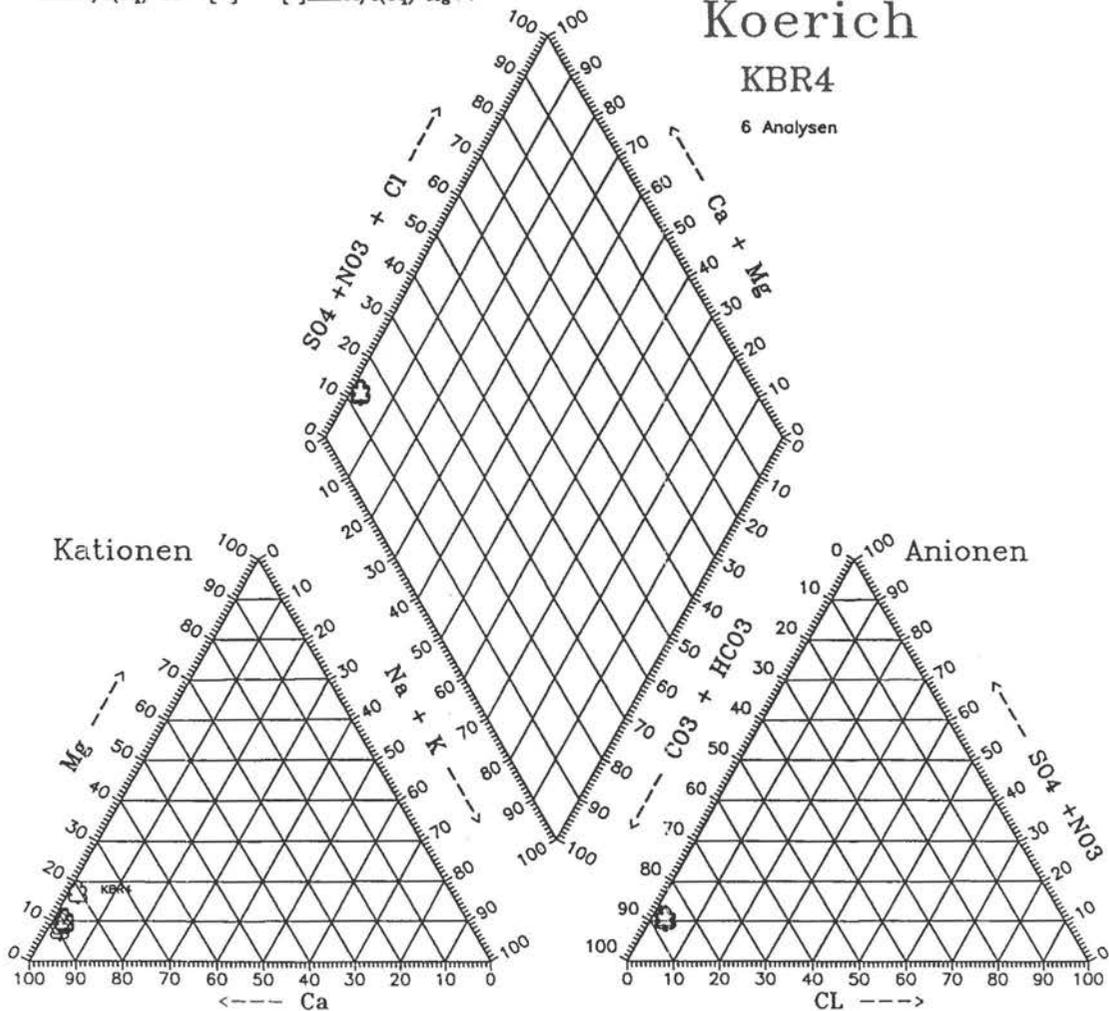


Abb. 89: Variation der Hauptionengruppen und der Härtebildner im Grundwasser aus KBR4, als Beispiel für die Grundwasser im Übergangsbereich zum überdeckten Luxemburger Sandstein-Aquifer

Koerich

KBR4

6 Analysen



Koerich

KBR3

14 Analysen;

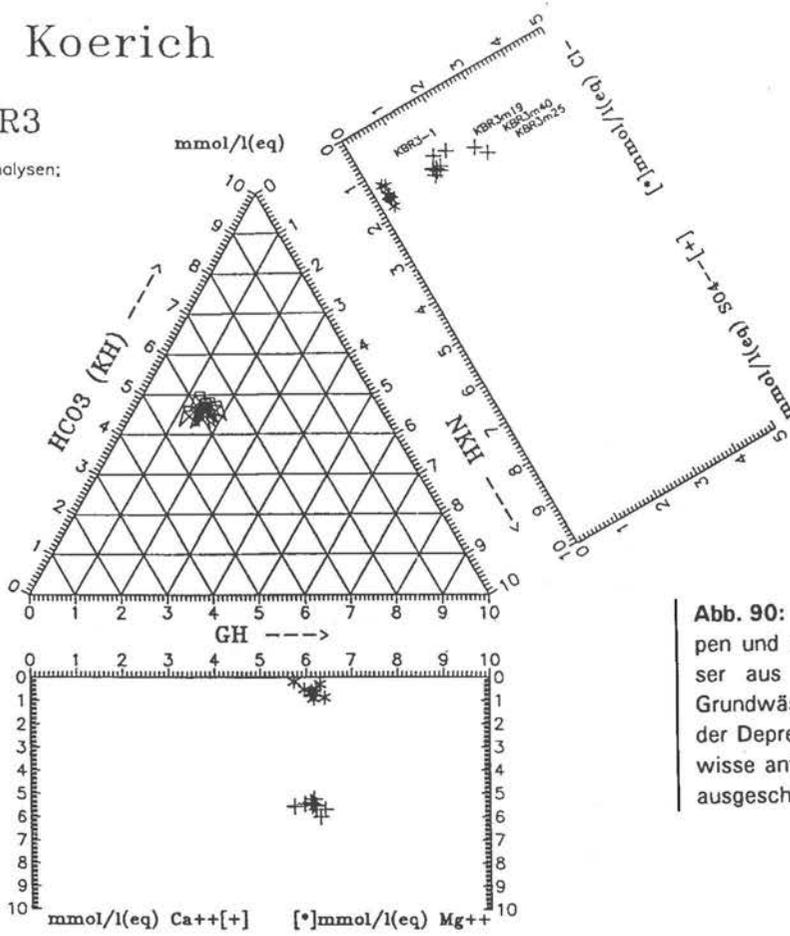
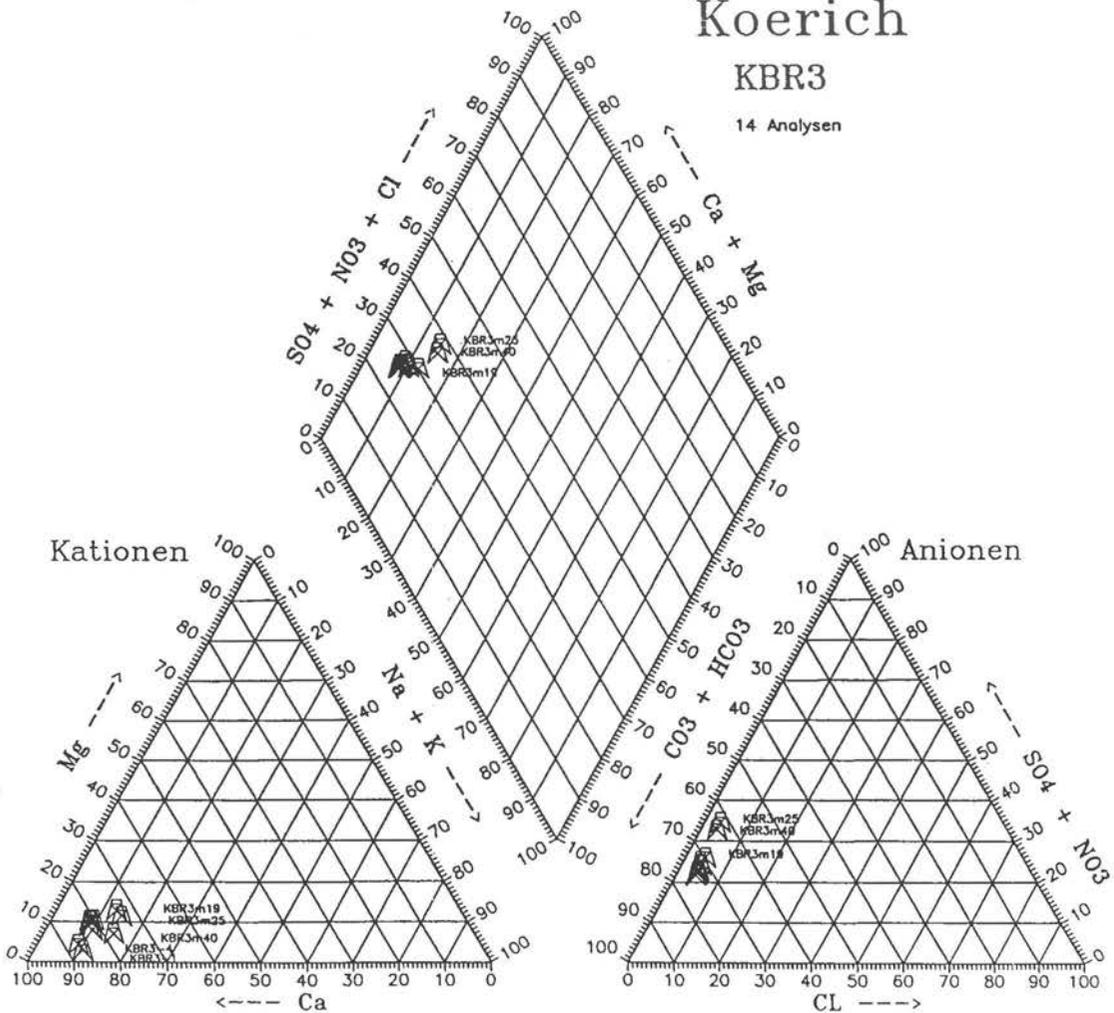


Abb. 90: Variation der Hauptionengruppen und der Härtebildner im Grundwasser aus KBR3, als Beispiel für die Grundwasser aus dem tiefsten Bereich der Depression, wobei in KBR3 eine gewisse anthropogene Beeinflussung nicht ausgeschlossen werden kann.

Koerich

KBR3

14 Analysen



7 Zusammenfassung und Diskussion

Die vorliegenden hydrogeologischen Detailuntersuchungen an zwei Standorten der *solution de recharge* werden an dieser Stelle zusammengefaßt und diskutiert. Der Aufbau dieses Kapitels folgt, losgelöst von der methodisch-orientierten Gliederung, dem "tracer-fundierte" Systemverständnis von einem Grundwasserleiter, d.h. von der Grundwasserneubildung (Input) über den unterirdischen Transport zu den Stellen, an denen das Grundwasser schließlich natürlich oder technisch gefördert zutage tritt (Output).

Die von der Spitzenbedarfs- und Notwasserversorgung, der sog. *solution de recharge*, an den Standorten Koerich und Trois Ponts genutzten Grundwasservorkommen im Luxemburger Sandstein sind an spezifische tektonische Strukturen gebunden und können als eigenständige Einzelsysteme betrachtet werden. Die hydrogeologische Verbindung beider Standorte durch die Luxemburger Sandstein-Formation wird durch eine übergreifende Hydraulik im einheitlichen Kluftsystem so bedeutend, daß schließlich mit der *Synthese* (Kap.8) eine zusätzliche, eigenständige Betrachtung des Gesamtsystems erfolgen kann.

In der nach Süden einfallenden Schichtstufenlandschaft des westlichen Gutlandes sind die hydraulisch wirksamen tektonischen Strukturen entsprechend der Position des Luxemburger Sandsteins ausgebildet. Das Tiefengrundwassersystem in Trois Ponts liegt randlich zur überregional wirksamen Störungszone, während das oberflächennahe Grundwasser in Koerich maßgeblich von regionalen, flachwelligen, flexurartigen Lagerungsverhältnissen (nach DITTRICH 1989; Mulden- und Sattelbau nach LUCIUS 1948) bestimmt wird. In den Depressionen werden größere Grundwasservorkommen gesammelt, die nach Anschnitt der Basis des Luxemburger Sandsteins durch die Erosionsformen des Eischtals als perennierende Quellen zutage treten.

Der in Abb. 91 dargestellte hydrogeologische Profilschnitt gibt diese Rahmenbedingungen schematisiert wieder.

Input: Vergleich mit aktuellen Niederschlägen

Im Großraum Trois Ponts - Koerich entwickelt sich die Eisch von einem Bach zum regionalen Vorfluter. Der Oberlauf ist vom Oberflächenabfluß der schweren Böden im Gebiet von Trois Ponts geprägt. Erst nach Eintritt des Eischtals in den basalen Teil des Luxemburger Sandsteins wird die Wasserführung durch z.T. erhebliche Grundwasserübertritte ausgeglichener. Die niedrigstwasserführung ($NNQ_{\text{Pegel Bafelt}} = 400 \text{ l/sec}$) wird durch Effluenz bestimmt. Kurzfristige Abflußspitzen führen des öfteren, vornehmlich in den Wintermonaten, zu lokalen Überschwemmungen der Talauenbereiche. Der Vergleich der gewässerkundlichen Daten der Eisch am Pegel SES in Koerich mit den Grundwasserständen der Brunnen und Piezometer im Eischtal und mit den Niederschlägen der Meßstation SES Koerich führten zur Eingrenzung der Zeiten der Grundwasserneubildung auf die vegetationslosen Wintermonate. Anhand der maßgeblich temperaturabhängigen Fraktionierung der stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18 wird eine klimatische Beziehung zwischen der stärker an schweren Isotopen abgereicherten Gruppe der Grundwässer aus Koerich und der aus Trois Ponts zum aktuellen Input diskutiert und aufgestellt. Zur Erfassung des aktuellen Isotopen-Inputs wurden die ^2H - und ^{18}O -Gehalte der Niederschläge der Stationen Trier, Karlsruhe und Weil am Rhein herangezogen. In diesen Datenreihen treten maßgebliche, charakteristische Trends in der Fraktionierung der Niederschläge der hydrologischen Winterhalbjahre auf, was wiederum - im Rückschluß - zu den Zeiträumen einer Grundwasserneubildung führt. Die aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten der Grundwasserproben berechneten Niederschlagstemperaturen führen, in Kombination mit Grundwassermodellaltern, zu einer klimatisch-

Grundwässer in Koerich und Trois Ponts *schematisiert*

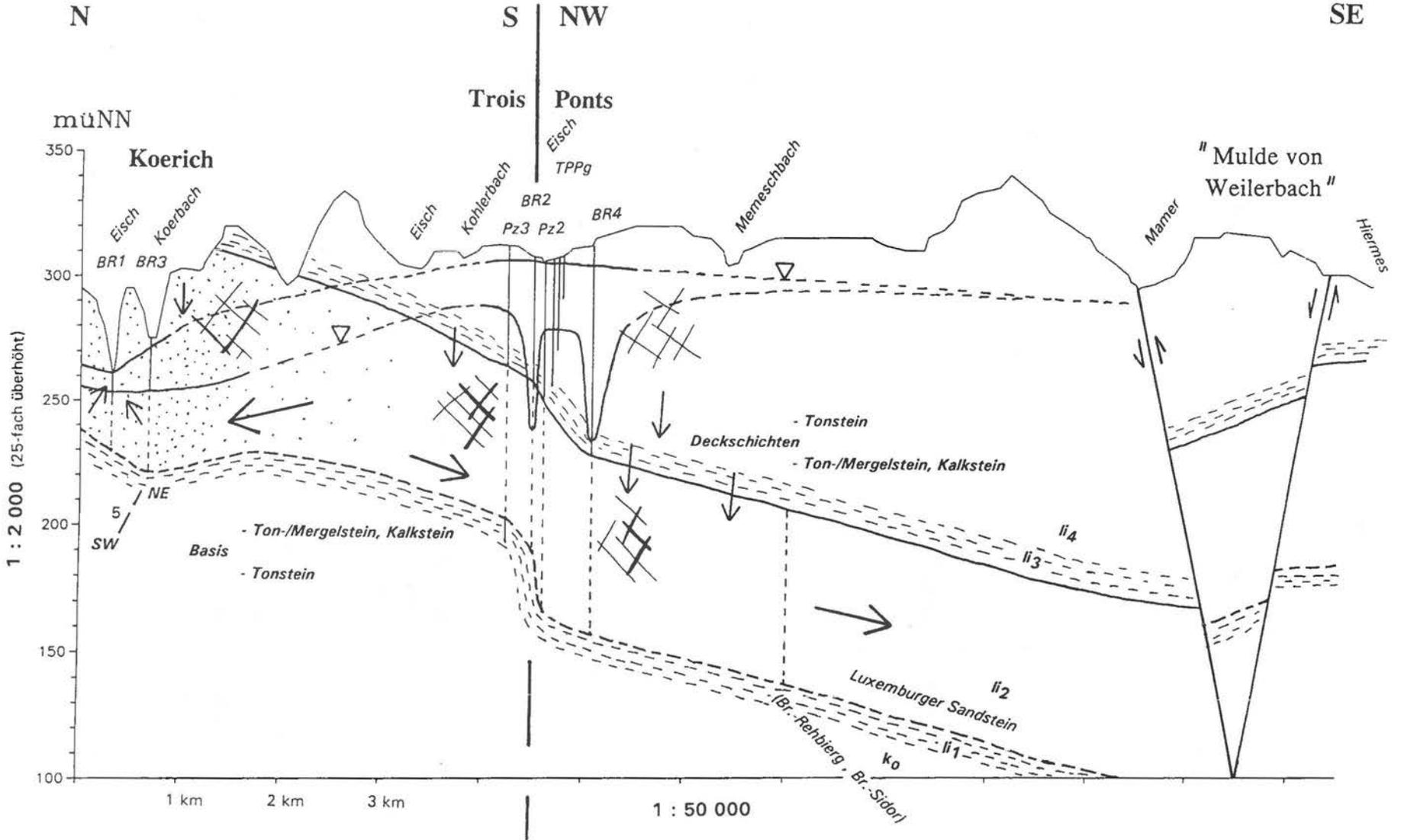


Abb. 91: Schematisierter hydrogeologischer Profilschnitt zum Grundwassersystem Koerich - Trois Ponts (Profilverlauf s. Abb. 10)

chronologischen Einordnung des Neubildungszeitraumes der beprobten Grundwässer. Demnach ist das Grundwasserreservoir in Trois Ponts wahrscheinlich während des Subatlantikums aufgefüllt worden. Für die Grundwässer aus Koerich wird eine seit dem ausgehenden Subatlantikum stattfindende Infiltration angenommen. Die in der Deuterium/Sauerstoff-18 - Relation entlang der "Meteroric Water Line" stärker abgereicherte Position der Grundwasserproben aus Koerich wird auf das im ausgehenden Subatlantikum kurzzeitig bestehende Temperaturminimum zurückgeführt. Das Grundwasser aus Br.-Sidor weist deutliche Anzeichen des ausgehenden Pleistozäns auf, so daß für dessen Infiltration das Spätglazial der Weichsel-Kaltzeit angenommen wird. Die aufgezeigten Relationen und klimatischen Aussagen besitzen eine relativ starke Aussagekraft, da sich die Deuterium- und Sauerstoff-18- Isotope wie "ideale" Tracer verhalten. Diskussionen über Austauschprozesse und Wechselwirkungen mit Leakage-Effekten, wie dies im Rahmen der auf Kohlenstoffisotope basierenden Grundwassermodellaltersbestimmung erfolgt, müssen nicht ange stellt werden.

Für den betrachteten Teil des Gutlandes beträgt die langjährige mittlere Niederschlagshöhe $792 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. Aus den Aufzeichnungen der Station SES Koerich für den Bearbeitungszeitraum ergibt sich eine insgesamt ausgeglichene jährliche Niederschlagsverteilung. Bei pH-Werten zwischen 4,5 - 6 und Abdampfrückständen von 6,5-19,5 mg/l sind aus den Untersuchungen an den Niederschlägen dieses Raumes der Jahre 1987-89 unter Beachtung der Niederschlagsverteilung jährliche feuchte Depositionen berechnet worden. Für das westliche Gutland sind die Werte aus Steinfort charakteristisch: $\text{Cl}^- 4,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{NO}_3^- 16,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{SO}_4^{2-} 27,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

Natürlicher Ruhezustand in Koerich

Die gewässerkundlichen Aufzeichnungen der Eisch und die Grundwasserstände der Brunnen und Piezometer in Koerich zeigen, daß für den Bereich des Eischtals zwei eigenständige Strömungssysteme ausgewiesen werden müssen. Die Wasserführung der Eisch steht entlang des Flußlaufes über eine Infiltrationszone mit der Grundwasserströmung des Luxemburger Sandsteins in Kontakt, wobei die Lage des Grundwasserspiegels nicht wesentlich beeinflusst wird. Im Ruhezustand sind die Grundwasserspiegel von den Seiten her auf den Brunnen KBR2 ausgerichtet, was z.T. eine Fortsetzung des Grundwasserspiegels unterhalb des Eischlaufes erfordert. Die Beachtung der Kluftverteilung verdeutlicht, daß KBR2 in einer Kluftzone positioniert ist, die wiederum in ihrem Verlauf der Depressionsachse der "Hauptmulde" *Koerich-Simmern-Ditzberg* folgt. Der Bereich dieser Kluftzone wird weiter nördlich, am Ausgang der Flußschleife an der Pumpstation der SES in Koerich, von der Eisch so angeschnitten, daß Grundwasserübertritte von $Q_{\text{Effluenz}} = 0,045 \text{ m}^3/\text{sec}$ stattfinden. In der Berechnung dieser Grundwasserströmung wurde die Breite der stärker klüftigen (Mulden-) Zone mit Grundwasserübertritten zu 250 m festgelegt. Als Grundwasserspiegelgefälle wurden die im Eischtal auftretenden Werte von $i = 0,1-0,15\%$ eingesetzt. Die Transmissivität dieser Kluftzone wurde als Durchlässigkeit der Hauptklufttrichtung zu $T_{\text{HKR}} = 0,12-0,18 \text{ m}^2/\text{sec}$ bestimmt. Die Querklufttrichtung, entlang der die Brunnen und Piezometer im Eischtal aufgereiht sind, weist mit $T_{\text{QKR}} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ bis $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$ deutlich niedrigere Durchlässigkeiten auf. Wird der integrative Gebietswert von $T_{\text{li2-K}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode der Pumpversuchsauswertung verwendet, so liegt die unterirdische Abflußrate bei $1,3-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Für KBR2 lassen sich unterirdische laterale Zuflüsse zu $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ableiten. Das in der Depressionszone abströmende Grundwasservolumen beträgt mit $8,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ etwa das 4-fache. Dies läßt erlauben, wie groß der Einfluß bzw. der Anteil der seitlichen Zuflüsse in die "Hauptmulde" *Koerich-Simmern-Ditzberg* sein muß, was die regionale Bedeutung dieser Mulde für die Grundwasserströmung ausmacht. Die Übereinstimmung dieser hydraulischen Quantifizierung des natürlichen Ruhezustandes mit bereits bestehenden Daten aus Abflußmessungen in der Eisch und

aus Tracerversuchen erhöht die Plausibilität. Das formationsspezifische Durchlässigkeitsverhalten wird als homogen charakterisiert.

Pumpversuche in Koerich

Die Basisdaten für die angeführten Rechnungen stammen aus der Auswertung der Pumpversuche. Unter Nutzung aller neu installierten Brunnen- und Piezometeranlagen wurden in Koerich zwei mehrere Wochen dauernde Pumpversuche durchgeführt. Obwohl beide Pumpversuche von Leistungsschwankungen und Pumpenausfällen beeinflusst wurden, ist es im ersten Pumpversuch, bei dem etwa die Hälfte der projektierten Förderung pro Brunnen entnommen wurde, gelungen, den stationären Strömungszustand für einige Zeit zu dokumentieren. Wechselwirkungen mit den Quellschüttungen wurden, obwohl dies - zumindest beim zweiten Pumpversuch mit technisch maximaler Grundwasserförderung - erwartet wurde, nur in der Quelle Lauterbur beobachtet. Die direkte Reaktion dieser Quelle auf die Grundwasserentnahmen aus den Brunnen im Eischtal wird mit der Position in der klüftigen Muldenzone (s.o.) erklärt. Verzögerte, geringfügige Reaktionen der anderen Quellen im Untersuchungsgebiet auf die Grundwasserentnahmen sind nicht auszuschließen, doch ließen die technischen Rahmenbedingungen der nicht auf eine so genaue Erfassung der Volumenströme eingerichteten Quelfassungen, keine genauere Datenerfassung zu. Während der Pumpversuche haben sich um jeden der vier Brunnen relativ steile Absenkungstrichter ausgebildet, wobei sich im Eischtal die Absenkungstrichter der Brunnen KBR1 und KBR2 im Kontaktbereich, bei Piezometer KPz1, geringfügig überlagern. Die Aufnahme des Absenkungsgeschehens und die Auswertung der Pumpversuche leidet unter der geringen Dichte des Grundwassermeßstellennetzes. So müssen für die Brunnen KBR3 und KBR4 die Aufzeichnungen aus der Meßeinrichtung in der Kiesschüttung des Brunnenringraumes herangezogen werden, weshalb den Isotopen-Methoden recht große Bedeutung zukommt. Die wesentlichen hydraulischen Aussagen und hydrogeologischen Kennwerte lassen sich an den Brunnen und Piezometern im Eischtal festmachen und erläutern.

Die Auswertung der Absenkungs- und Wiederanstiegsdaten wird anhand folgender Auswerteverfahren durchgeführt. Die Schwerkraftentleerung im freien Grundwasserleiter wird durch die Korrektur nach THIEM-DUPOIT (THIEM 1906) durchgeführt. Um die THEIS'sche Formel zu nutzen, wurde das Verfahren von CHOW (1952) angewendet und dabei das "Tangentenproblem" graphisch gelöst. Die Absenkungsdaten wurden zudem - soweit möglich - mit dem sog. Verfahren I nach COOPER & JACOB (1946) und die Wiederanstiegsdaten mit dem Verfahren nach THEIS (1935) ausgewertet. Der Einfluß der Eischinfiltration auf das Absenkungs- und Wiederanstiegs-geschehen wurde mit Hilfe eines Leakage-Ansatzes formuliert und mit der HANTUSH'schen Wendepunktmethode (HANTUSH 1964) berechnet.

Der gemittelte Gebietswert der Transmissivität wurde zu $T_{li2-K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ bestimmt. Mit Hilfe der DUPOIT-THIEM'schen Gleichung für freie Grundwasserspiegel unter stationären Strömungszuständen wurden die maximalen Reichweiten der Absenkungstrichter von KBR1 und KBR2 bestimmt. Mit diesen Werten wurde die Fläche berechnet, über die eine Infiltration von Eischwasser erfolgen kann. Mit dem Leakagefaktor aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode wurden schließlich unter der Annahme, daß das gesamte Eisch-Infiltrat dem Brunnen zu fließt, die Anteile von Eisch-Infiltrat an den Förderraten der Brunnen KBR1 und KBR2 während der Pumpversuche I und II zu 9,5% bzw. 4,8% berechnet. Bei ungestörter Strömung im Eischtal beträgt, nach Anwendung des DARCY'schen Gesetzes, die natürliche Infiltrationsrate der Eisch $Q_{\text{Infil.Eisch}} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Je nach Ansatz des Volumens an Grundwasser, das im Eischtal fließt oder das von den Seiten her zuströmt, beträgt der Anteil von Eisch-Infiltrat zwischen 0,6% und 9,2%.

Die Absenkungs- und Wiederanstiegsbeobachtungen sind augenscheinlich nur in KPz2 von Entnahmeschwankungen und Eisch-Einflüssen so gering beeinflusst, daß mittels der Tangenten des Verfahrens von CHOW ein Speicherkoeffizient $S_{l12(KPz2)} = 3 \cdot 10^{-3}$ berechnet wurde. Die Ermittlung des nutzbaren Hohlraumanteils zeigt die Kompliziertheit der hydraulischen Auswirkungen, die sich in Koerich aus dem Übergang des Kluftgrundwasserleiters (Luxemburger Sandstein) in seine verschiedenen Verwitterungszustände ergeben. Die auftretende Spannweite an (speicher-) nutzbarem Hohlraumanteil, von wenigen Prozentteilen (0,3%) bis hin zu 19%, überdeckt den gesamten Bereich natürlich auftretender effektiver Porositäten.

Isotopen-Methoden, Koerich

Die Heterogenität der in Koerich anzutreffenden Grundwasserströmung läßt sich anhand der Tritium-Methode als ein "3-Komponenten-Mischsystem" beschreiben. Die GwMischungskomponenten sind als "tritiumfrei" (0-3 TU) zu bezeichnen, haben Tritiumgehalte in Höhe des aktuellen Inputs (20-32 TU) oder weisen noch Anteile des anthropogenen (Bomben-) Tritiumpeaks vom Anfang der 60er Jahre auf (32-45 TU). Die räumliche Verteilung der Tritiumgehalte im Luxemburger Sandstein wird mit einem Profilschnitt im Bereich der Hauptmulde veranschaulicht. Im Bereich des Eischtals werden alle Komponenten miteinander vermischt. In Einfallrichtung des Luxemburger Sandsteins und mit Beginn der Überdeckung herrscht die tritiumfreie Komponente vor, während oberflächennah, z.B. in der Quelle Frontzenbiere bei einem kleinräumigen Einzugsgebiet, die aktuelle Input-Konzentration auftritt. Dazwischen, im Inneren größerer Sandsteinpartien, sind noch Grundwässer gespeichert, die erhöhte Tritiumkonzentrationen aufweisen. Je nach strömungsbedingtem Anteil sind diese Grundwasserkomponenten an dem charakteristischen Tritiumgehalt einer Grundwasserprobe beteiligt. Die Verwendung von sog. "lumped-parameter"-Modellen erlaubt unter Anwendung des Tracer-Ansatzes und der künstlichen Markierung der Atmosphäre und Hydrosphäre mit Tritium aus Atombombentests die Berechnung von "Mittleren Verweilzeiten". Da die Mittlere Verweilzeit aus den Verweilzeiten aller am Grundwasser und seiner Mischung beteiligten Komponenten gebildet wird, werden - entsprechend den Modellvorstellungen - Anteile von Verweilzeit-Gruppen (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) an der jeweiligen Mittleren Verweilzeit per Computerprogramm berechnet. Als Modellvorstellungen zu den Strömungsbedingungen und dem Durchgangsverhalten des Tracers werden die beiden "Extremfälle", das Piston-Flow-Modell und das Exponentialmodell, angewendet. Das Exponential-Piston-Flow-Modell wurde so angesetzt, daß bei der vorliegenden Grundwasseraltersschichtung der Anteil alten, tritiumfreien Grundwassers durch die Piston-Flow-Strömung und der jüngere Anteil durch eine exponentielle GwAltersverteilung beschrieben wird. Die Mischung der beiden, parallel strömenden Komponenten erfolgt erst im Brunnen (Aufschlußmischung). Für die Meßwerte (Output) wurde das "inverse Problem" gelöst, d.h. die Mittlere Verweilzeit berechnet und als sog. Outputfunktion graphisch dargestellt. Als ^3H -Inputdaten (1953-1993) wurden die Daten des Freiburger Raumes (Sachsen) im Abgleich mit Daten der IAEA-Meßstationen Koblenz und Wasserkuppe/Rhön verwendet. Die Doppeldeutigkeit des Tritium-Verfahrens bei ^3H -Gehalten von 12-20 TU wird an den Ergebnisse vom Standort Schaedhaff deutlich und für die Quelle Frontzenbiere, Koerich, dargestellt. Bei einem ^3H -Gehalt der Quellwasserprobe Frontzenbiere von 20 TU muß entschieden werden, welche der berechneten Mittleren Verweilzeiten (6-7 oder 62 Jahre) die plausible ist. Die Mittlere Verweilzeit von 62 Jahren (bei 20 TU) wird als eine Mischung von altem Grundwasser mit wenigen Anteilen jungen Grundwassers interpretiert (altes, vor 1953 gebildetes Grundwasser ist tritiumfrei; MVZ: > 40a). Tritiumgehalte von 20 TU entsprechen dem aktuellen Input und können somit auch ein sehr junges Grundwasser charakterisieren. In diesem Fall wird die Mittlere Verweilzeit von 6-7 Jahren durch Modellrechnungen mit ^2H - und ^{18}O -Isotopen bestätigt. Als Inputdaten wurden

hierfür die Meßreihen des GSF-Institutes für Hydrologie an den Niederschlägen der Station Trier verwendet. Mit Mittleren Verweilzeiten von 19-20 Jahren werden die Quellen und Brunnen im gut durchmischten Grundwasser des Eischtales beschrieben. In diesen Grundwasserproben findet sich eine \pm einheitliche Verteilung der berechneten Mittleren Verweilzeit-Gruppen ($< 1a \approx 5\%$; $1-10a \approx 35\%$; $10-20a \approx 24\%$; $20-40a \approx 23\%$; $> 40a \approx 13\%$). Der Übergang zu den alten Grundwässern des überdeckten Bereiches wird durch die Proben aus KBR3 und KBR4 belegt. In KBR3 verringern sich die Mittleren Verweilzeiten im Laufe der Grundwasserentnahmen von 240 auf 149 Jahre. Für das Grundwasser aus KBR4 wurde eine Mittlere Verweilzeit von 425 Jahre berechnet. Da mit Mittleren Verweilzeiten von mehr als 100 Jahren der Grenzbereich dieses Verfahrens erreicht wird - was bis zu einigen hundert Jahren Mittlerer Verweilzeit unter Gültigkeit der Modellannahmen durchaus korrekt ist -, wird die eindeutige Altersangabe: ">40a" verwendet. Der Anteil aller Grundwasserkomponenten "jünger 40a" beträgt bei den Proben aus KBR3 15% und 24%, während in KBR4 der Anteil dieser Komponenten auf 9% gesunken ist. Die Grundwässer in Trois Ponts sind alle, auch die der Deckschichten, tritiumfrei.

Durch die Kombination von Tritiumgehalten mit hydrochemischen Daten (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} -Konzentrationen) werden Grundwassermischungsreihen aufgezeigt und lokale anthropogene Einflüsse erkannt. Die aus diesen Beziehungen abgeleiteten Aussagen sind streng an die jeweiligen hydrogeologischen Rahmenbedingungen geknüpft. Die oberflächennahen Grundwässer aus Koerich und die Tiefenwässer aus Trois Ponts bilden hierbei Mischungsendglieder, zwischen denen Übergänge entlang von Mischungsgeraden in den Diagrammen deutlich werden. Die Grundwässer aus Trois Ponts vertreten in diesem Zusammenhang den natürlichen Background. Lokale Veränderungen, die durch Grundwasserentnahmen bedingt sind, werden in KBR3 und KBR4 ebenfalls erkannt. Zwischen KBR3 und der direkt benachbarten Quelle Peiffer bestätigt sich der signifikante Unterschied zwischen den Grundwässern. Das Quellwasser und das Grundwasser aus KBR3 unterscheiden sich also im Tritiumgehalt, somit in der Mittleren Verweilzeit und in den betrachteten Anionenkonzentrationen, ohne daß während der Pumpversuche eine gegenseitige Beeinflussung deutlich wird. Die hohen Nitratgehalte der Quelle Frontzenberg bestätigen, daß an dieser geringen, saisonalen Quellschüttung maßgeblich junges Grundwasser beteiligt ist.

Diese Untersuchungen in Koerich zeigen anhand von oberflächennahen jungen Grundwässern, um wieviel besser ein Grundwassersystem unter Anwendung von Isotopen-Methoden (ggf. in Kombination mit hydrochemischen Daten) verstanden werden kann - zumal dann, wenn die hydraulischen Informationen nicht genügend genau sind -. Der folgende Teil zu den Tiefen Grundwässern in Trois Ponts belegt, daß erst mit bzw. nach der Kombination der hydraulischen Ergebnisse mit denen der Isotopen-Methoden eine genügend genaue Beschreibung der komplexen (Kluft-) Grundwasserströmungsverhältnisse möglich ist.

Isotopen-Methoden, Trois Ponts

Alle in Trois Ponts angetroffenen Grundwässer, auch die der Deckschichten, sind tritiumfrei. Die Einordnung der Befunde der Gehaltsbestimmungen der stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18 sind bereits im Zusammenhang mit den Betrachtungen zum Input behandelt worden.

Die Tritiumfreiheit der Grundwässer in Trois Ponts erfordert zur Bestimmung von Grundwasser-Modellaltern und -Verweilzeiten den Einsatz der auf dem radioaktiven Zerfall des ^{14}C -Isotops beruhenden Radiokohlenstoff-Methode. Mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren erfaßt diese Methode einen Grundwasseraltersbereich zwischen tausend und wenigen zehntausend Jahren. An dieser Stelle wird deutlich, daß zwischen der Obergrenze der Tritium-Methode (einige 100 Jahre) und der Untergrenze der ^{14}C -Methode (ca. 1000 Jahre) ein Grundwasseralters-

tersbereich verbleibt, der von beiden Methoden nur unscharf erfaßt wird. Für eine möglichst genaue Erfassung der Grundwassermodellalter mit der ^{14}C -Methode - insbesondere im unteren Aussagebereich -, ist die Beachtung des hydrosphärischen Teils des Kohlenstoffkreislaufes von maßgeblicher Bedeutung. Der Anteil an im Grundwasser gelösten, primär atmosphärischen ^{14}C -Isotopen kann bei Kontakt mit kohlenstoffhaltiger (z.B. karbonatischer), ^{14}C -freier Gesteinsmatrix infolge natürlicher Kohlenstoffaustauschprozesse im Laufe der (Verweil-) Zeit geringer werden. Wird dieser Prozeß nicht erkannt, so täuschen die geringen (in diesem Fall nicht nur auf einen unterirdischen Transport zurückzuführenden) ^{14}C -Konzentrationen ein höheres Grundwasseralter vor. Das Auftreten von C-Austauschprozessen wird anhand eines Abgleiches mit den Gehalten an stabilen, einer Fraktionierung unterliegenden ^{13}C -Isotopen erkannt und dargestellt. Mit Hilfe von Modellvorstellungen zum Isotopenaustausch sind zwei Korrekturverfahren angewendet worden. Mit dem Chemiemischungsmodell wurden aus den Konzentrationen der in der Grundwasserprobe gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen und deren Verhältnis zum rezenten ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre die jeweiligen sog. ^{14}C -Anfangsgehalte ($A_{0\text{-Chem.}}$) ermittelt. Je nach Herkunft des anorganischen Kohlenstoffs weist dieser charakteristische $\delta^{13}\text{C}$ -Werte auf (Fraktionierung). Anhand dieser Werte wurde mit Hilfe des Isotopenmischungsmodells, dem sog. $\delta^{13}\text{C}$ -Korrekturmodell, Rückschlüsse auf Kohlenstoff- und Isotopengehaltsänderungen gezogen und ^{14}C -Anfangsgehalte ($A_{0\text{-Isot.}}$) berechnet. Unter Anwendung des Zerfallsgesetzes wurden aus diesen ^{14}C -Anfangsgehalten und aus den ^{14}C -Gehalten der Proben schließlich die Grundwassermodellalter bestimmt. Der Zusatz "Modellalter" wird verwendet, da die ermittelten Altersangaben streng genommen nur unter den angenommenen, stark vereinfachten Modellvorstellungen der Korrekturmodelle gültig sind. Die ^{14}C -Anfangsgehalte variieren um die Mittelwerte $A_{0\text{-Chem.}} = 56\%$ modern und $A_{0\text{-Isot.}} = 60\%$ modern. Die ermittelten Modellalter der Grundwässer aus dem Luxemburger Sandstein-Aquifer in Trois Ponts liegen im Mittel zwischen 500 und 3300 Jahren, wobei gerade bei - für diese Methode geringen - GwModellaltern von wenigen 100 Jahren z.T. erhebliche Toleranzen auftreten. Die Zusammenfassung zu Verweilzeitgruppen führt zu einer klaren Gliederung. Das jüngste Grundwasser aus dem Luxemburger Sandstein (in Trois Ponts) wurde zu Anfang der Pumpversuche aus TPBR3 entnommen, das älteste aus TPBR4. Im Laufe der Grundwasserentnahmen des Pumpversuchs I haben sich die GwModellalter, mit Ausnahme von TPBR3, um bis zu 700 Jahren verringert. In TPBR3 hat eine Zunahme des GwModellalters um 1000 Jahre stattgefunden. In den mergelig-kalkigen "leaky"-Deckschichten sind die ^{14}C -Konzentrationen durch C-Austauschprozesse so gering bzw. nicht mehr nachweisbar, daß GwModellalter "> 32000 Jahre" auftreten. Der Einfluß dieser Wässer in Form von Leakage-Anteilen auf die GwModellalter des Luxemburger Sandstein-Aquifers wird in Kombination mit hydraulischen Daten unter dem Gesichtspunkt einer scheinbaren Grundwasseralterung diskutiert. Die Entwicklung der beprobten Grundwässer zu größeren Verweilzeiten als Folge von zunehmendem C-Austausch wird in diesem Zusammenhang veranschaulicht. Das Grundwasser aus Br.-Sidor, mit einer Verweilzeit von 26400 Jahren, wird als Beispiel eines alten, isotopisch gereiften Grundwassers angesehen, bei dem bereits der größte Teil des primären ^{14}C -Gehaltes durch ^{14}C -freien Kohlenstoff des Gesteinskarbonates ausgetauscht ist, zumal in diesem Grundwasser auch ein erheblicher Ionenaustausch stattgefunden hat.

Natürliche Ruhestromung in Trois Ponts

Im natürlichen, ungestörten Ruhezustand ist in Trois Ponts eine Grundwasserscheide ausgebildet, deren Druckwasserspiegel mit einem Gefälle von $i=0,08\%$ flach nach N auf die Eisch und nach SE auf die Mulde von Weilerbach gerichtet sind. Die unter diesen Bedingungen bestehende natürliche Grundwasserströmung erreicht eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit von $2,3 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ und entspricht einem natürlichen Grundwasserabstrom (-volumen) von $1,5\text{-}1,7\cdot 10^7$

$8 \text{ m}^3 \text{sec}^{-1} \text{m}^{-2}$, was wiederum 59-67% des langfristigen mittleren Jahresniederschlages von $792 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$ ausmacht. Die hier dargestellten Größen sind auf der Basis der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung berechnet worden. Die Pumpversuche zeigen, daß der Einfluß von Leakage unbedingt berücksichtigt werden muß. Nach den Ergebnissen der Pumpversuchsauswertung tritt im Ruhezustand ein natürliches Leakage von $2,6-4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ auf, was etwa 10-18% des langjährigen mittleren Niederschlages entspricht. Diese natürliche Zusickerung aus den hangenden Mergel- und Kalksteinen in den Luxemburger Sandstein-Aquifer beträgt ca. 15-31% des natürlichen Grundwasserabstromes in Trois Ponts.

Diese weitgehend ungestörte, natürliche Grundwasserströmung wurde durch die Aufnahme von Grundwassertemperaturprofilen in den Piezometern erfaßt und graphisch dargestellt. Entsprechend dem geologischen Aufbau und dem spezifischen thermischen Leitvermögen der Gesteinsfolgen werden unterschiedliche GwTemperaturgradienten in einem Piezometer angetroffen. Hierbei zeigt sich, daß in Bereichen, denen eine bessere Durchlässigkeit zugeschrieben wird, steilere GwTemperaturkurvenverläufe zu beobachten sind als innerhalb von tonig-mergeligen Partien. In den zuletzt genannten Bereichen entspricht der Temperaturgradient dem "Geothermischen Gradienten". Die zweite Serie von GwTemperaturaufnahmen wurde unter den Strömungsbedingungen der maximalen Grundwasserförderung aus allen Brunnen durchgeführt. Diese GwTemperaturkurven zeigen, im Vergleich mit denen der ersten Serie, in einigen Bereichen des Luxemburger Sandstein-Grundwasserleiters deutliche Versteilungen. Dieses Verhalten wird mit der größeren bzw. der besseren Durchströmung dieser Partien des Aquifers in Folge der Grundwasserentnahmen erklärt. Im Rückschluß werden Zonen der aufgeschlossenen Schichtfolge halbquantitativ im Hinblick auf die in ihnen stattfindende Grundwasserströmung beschrieben. Auf Bezüge und Hinweise zur Geothermieforschung wurde in diesem Zusammenhang weitgehend verzichtet, da die Temperaturmessungen vornehmlich auf das Erkennen von Unterschieden in der kleinräumigen Grundwasserströmung und ggf. auf die Erfassung von punktuellen, größeren Kluftdurchlässigkeiten ausgerichtet sind. In Bezug auf diese Vorgehensweise sei angemerkt, daß der (geothermische) Begriff der "Konvektionsströmung" (in ausgedehnten Grundwasserleitern) den Zusammenhang von Temperaturverteilung und Grundwasserströmung beschreibt.

Pumpversuche in Trois Ponts

Bereits die graphische Bearbeitung der Pumpversuchsaufzeichnungen zeigt, daß der Einfluß von Leakage unbedingt - sowohl bei der Auswertung der Absenkungs- als auch der Wiederanstiegsdaten - berücksichtigt werden muß. Dies wird durch die Anwendung der HANTUSH'schen Wendepunktmethode (HANTUSH 1964) erreicht. Eine Einschätzung der Fehlinterpretation bei Nichtbeachtung von Leakage wird aus dem Vergleich mit den Ergebnissen der anderen angewendeten Auswerteverfahren deutlich. Dies ist das Wiederanstiegsverfahren nach THEIS (THEIS 1935) und das sog. (Geradlinien-) Verfahren I und III von COOPER & JACOB (1946). Um diese Verfahren anwenden zu können, mußten die Pumpversuchsdaten vorab einem speziell angepaßten Korrekturverfahren unterzogen werden, da die DUPUIT'schen und THEIS'schen Annahmen nicht ausreichend erfüllt sind. So hatten die Korrekturen den Einfluß der Entnahme aus fünf Brunnen zu beachten, wobei erschwerend das zeitversetzte Einschalten der Brunnen hinzukam. Der Ausfall einer Pumpe im Laufe des Pumpversuches wurde ebenfalls berücksichtigt. Die Transmissivitäten aus den Geradlinienverfahren variieren zwischen $1,4-3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$, je nach Leakage-Einfluß. Unter Vorbehalt der Gültigkeit der DUPUIT-THEIS'schen Annahmen wird ein mittlerer Speicherkoeffizient von $S=3,1 \cdot 10^{-4}$ ermittelt. Die Werte aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode können als Gebietswerte angesehen werden und liegen bei $T_{i12-TP}=1,4-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$. Aus den elastischen Eigenschaften dieses gespannten Grundwasserleiters wurde mit Hilfe des "barometrischen Koeffizienten" und des

"spezifischen Speicherkoeffizienten" für den Standort Trois Ponts ein (speicher-) wirksamer Hohlraumanteil von 22% ermittelt. Diese Betrachtung abgeleiteter geohydraulischer Größen wird im folgenden um das hydraulische Verhalten der "leaky"-Deckschichten erweitert. Die Leakage-Eigenschaften dieses Aquitarden werden durch den Leakagefaktor aus der HANTUSH'schen Wendepunktmethode von $B_{(li3)}=911$ m (Absenkung) bzw. 651 m (Wiederanstieg) beschrieben. Die Transmissivität bzw. der Durchlässigkeitsbeiwert beträgt für eine vertikal gerichtete Durchströmung $T_{(li3) \rightarrow v} = 1,2-2,1 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{sec}$ bzw. $k_{f(li3) \rightarrow v} = 1,5-2,6 \cdot 10^{-8} \text{m}/\text{sec}$. Die hydraulische Leitfähigkeit wurde zu $1,9-3,3 \cdot 10^{-9} (\text{m}^2/\text{sec})\text{m}^{-2}$ und der hydraulische Widerstand gegen eine vertikale Durchsickerung auf 78-137 Jahre festgelegt. Die Gesteinsdurchlässigkeit dieser Formation liegt mit $k_{f(li3)} = 1,4-2,0 \cdot 10^{-9} \text{m}/\text{sec}$ um eine Potenz unter dem (Gebirgs-) Durchlässigkeitsbeiwert der Pumpversuchsauswertung.

Grundwasserströmungszustände in Trois Ponts

Die Betrachtung des sich im Laufe längerfristiger Grundwasserentnahmen einstellenden, stationären Strömungszustandes führt bei Anwendung der DUPUIT-THIEM'schen Gleichung (THIEM 1906) zur Ausweisung einer sog. Reichweite. Bei einer Grundwasserförderung von ca. $200 \text{m}^3/\text{h}$ (max. $Q_{\text{Trois Pont}} = 420 \text{m}^3/\text{h}$) wird für den Pumpversuch I die Reichweite der Absenkung im Mittel auf ca. 1500 m bestimmt. Da der im Einzugs- bzw. im Absenkungsbereich eines Pumpversuches dem Grundwasserleiter tatsächlich durch Leakage zufließende Volumenstrom vom punktuellen Potentialgefälle abhängt, wurde mit Hilfe der Reichweite für den Pumpversuch I der Absenkungstrichter berechnet und über diesen die Leakagerate schrittweise integriert. Im Absenkungsbereich von PV I treten somit Leakageraten von 0,06 bis $0,106 \text{m}^3/\text{sec}$ bzw. 220 bis $380 \text{m}^3/\text{h}$ auf; womit die Bilanz ausgeglichen erscheint. Die Isotopen-Methoden belegen hingegen Änderungen in den Modellaltern der geförderten Grundwässer im Laufe des Entnahmezeitraumes von PV I um 400(100)-1000 Jahre (jünger als auch älter). Die GwModellalterszunahme um ca. 1000 Jahre in TPBR3 bestätigt zunächst den größeren Anteil alter Leakage-Wässer. Die Abnahme der GwModellalter um 400(100)-700 Jahre in den anderen vier Brunnen zeigt, daß an der Grundwassermischung neben der (scheinbar) alten Leakage-Komponente nun vermehrt andere, ggf. jüngere Grundwasserkomponenten beteiligt sind. Diese Betrachtung widerspricht einer Bilanzierung mittels stationärem Strömungsansatz, zumindest für den Zeitraum einer noch instationären Grundwasserströmung. In diesem Zusammenhang ist auch die vornehmlich während des instationären Strömungszustandes bestehende Möglichkeit eines ggf. weiträumigen Transportes von u.U. jüngeren Grundwässern über das Kluftsystem zu beachten.

Diesen Fragen wird zunächst mit der Betrachtung des Einflusses der Leakage-Wässer auf die ^{14}C -Modellalter der Luxemburger Sandstein-Grundwässer nachgegangen. Anschließend werden anhand der aufgetretenen GwModellaltersänderungen und der Strömungsbedingungen des Ruhezustandes Transportweiten berechnet, die infolge der Grundwasserentnahmen des Pumpversuchs I aufgetreten sind. Aus diesen Angaben werden Kluftdurchlässigkeiten zu unterschiedlichen hydraulischen Rahmenbedingungen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 22 zusammengestellt. Die Plausibilität wird durch den Vergleich der Ergebnisse mit denen der Pumpversuchsauswertung hergestellt.

Grundlage solcher Betrachtungen ist die Verknüpfung von Grundwasserströmung und Verweilzeit, so daß eine Grundwasseraltersverteilung im Grundwasserleiter mittels Isochronen dargestellt werden kann. So ist z.B. die absolute Verweilzeit des Grundwassers im Luxemburger Sandstein in Trois Ponts das Produkt der tatsächlich im Grundwasserleiter stattfindenden Grundwasserströmung und der Entfernung zum Infiltrationsgebiet (in diesem Beispiel: das Gebiet des anstehenden Luxemburger Sandsteins, so auch im Gebiet von Koerich). In Bezug auf die

^{14}C -Gehalte wird der Grundwassertransport (vom Infiltrationsgebiet zur Probenahmestelle) durch die Differenz vom ^{14}C -Anfangsgehalt (A_0) und dem ^{14}C -Gehalt der Grundwasserprobe (^{14}C -Probe) wiedergegeben. Die Transportzeit entspricht dem Grundwasseralter, so daß sich über die Grundwasserströmung (z.B. Abstandsgeschwindigkeit der Ruheströmung) die Transportweite ermitteln läßt. Treten in dieses System zusätzlich Wässer mit einer sehr geringen ^{14}C -Konzentration ein (im obigen Beispiel: aus den hangenden Mergeln und Kalken von Strassen), so führt diese (Leakage-) Komponente zur Berechnung höherer Modellalter und somit zu einer scheinbaren Grundwasseralterung.

Einfluß von Leakage auf die ^{14}C -Modellalter der Grundwässer im Luxemburger Sandstein am Standort Trois Ponts

Um die Leakage-Bedingungen in Trois Ponts richtig zu erfassen, muß der Einfluß der "fast ^{14}C -freien" Leakage-Wässer der Deckschichten auf die ^{14}C -Modellalter der Luxemburger Sandstein-Grundwässer quantifiziert werden. Hierbei ist neben dem Leakage-Anteil an der Grundwassermischung auch die Konzentration an ^{14}C -Isotopen in den Leakage-Wässern zu beachten. Aus Kap. 5.3 (Abb.72) ist bekannt, daß die C-Austauschwässer der "leaky"-Deckschicht " ^{14}C -frei" sein können (Probe: TPPg35-3) und daß der C-Austausch ab einer ^{14}C -Konzentrationen unter 10-15 %modern dominant wird. In den Berechnungen zur Tab. 22 wurden drei ^{14}C -Konzentrationen für die Leakage-Wässer betrachtet: 0 %mod., 5 %mod., 10 %mod.. Die Leakage-Anteile orientieren sich an dem hydraulisch bestimmten Anteil von 15-31% (Kap.4.1.3) oder an den maximal möglichen Leakage-Anteilen. Diese sind an der jeweils um die verschiedenen Leakage-Einflüsse korrigierten Differenz von Anfangsgehalt und Probenmeßwert (" $\Delta(A_0;^{14}\text{C}$ -Probe)") ablesbar. In diesem hypothetischen Fall von maximalem Leakage hätte kein Transport stattgefunden. Die Korrektur der ^{14}C -Proben(-Meßwerte) führt zu höheren, nicht mehr von Leakage beeinflussten ^{14}C -Gehalten, was wiederum zu z.T. erheblich geringeren Modellaltern führt. Zum Vergleich sind GwModellalter ohne Berücksichtigung von Leakage-Einflüssen ("kein L.") angefügt worden. Diese Werte sind mit den GwModellaltern der Tab. 17 (Kap.5.3.3) vergleichbar, wobei in Tab. 22 die auftretenden Varianzen unterdrückt sind. Die Berechnung der Modellalter mit Hilfe des Zerfallsgesetzes ist in Kap. 5.3 dargestellt. Das Korrekturverfahren der Leakage-Einflüsse auf die ^{14}C -Gehalte der Grundwässer im Grundwasserleiter läßt sich in allgemeiner Form wie folgt schreiben:

$$\{^{14}\text{C}_{\text{GwL}}\} = [\{^{14}\text{C}\text{-Probe}\} - (\{^{14}\text{C}\text{-LWässer}\} \cdot L_{\text{Anteil}})] \cdot (1 + L_{\text{Anteil}}) \quad (36)$$

mit:

{ } : Konzentration

$\{^{14}\text{C}_{\text{GwL}}\}$: ^{14}C -Konzentration im Grundwasserleiter ohne Leakage-Einflüsse

$\{^{14}\text{C}\text{-Probe}\}$: ^{14}C -Konzentration der Grundwasserprobe (Meßwert)

$\{^{14}\text{C}\text{-LWässer}\}$: ^{14}C -Konzentration der Leakage-Wässer

L_{Anteil} : Anteil von Leakage an der Grundwasserströmung.

Diese Berechnungen beruhen auf der Annahme, daß die Korrekturverfahren zur Bestimmung des ^{14}C -Anfangsgehaltes ($A_{0\text{-Chem.}}$, $A_{0\text{-Isot.}}$) die Änderungen der Isotopengehalte, die nicht auf einen unterirdischen GwTransport zurückzuführen sind, genügend genau erfassen. Sollten diese Annahme nicht oder nur teilweise erfüllt sein, so müßte an den berechneten ^{14}C -Anfangsgehalten ebenfalls Korrekturen der Leakage-Einflüsse durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise würde die anfängliche Relation von ^{14}C -Anfangsgehalt und ^{14}C -Probenmeßwert wiederherstellen und somit zum gleichen GwModellalter führen, wie eine Berechnung ohne Berücksichtigung von Leakage-Effekten. Dieser methodisch-orientierten Fragestellung wird nicht

weiter nachgegangen, da für die Ermittlung von GwTransportvorgängen die Unterschiede zwischen zwei zeitversetzten Grundwasserproben betrachtet werden.

Offen bleibt auch, ob und ggf. wie sich das GwModellalter im Verlauf lang anhaltender stationärer (GwEntnahme-) Strömung ändert und welche Veränderungen während des instationären Wiederanstiegvorganges auftreten.

An der Quellwasserprobe der Quelle Wykerslooth (K-Qu14) wird nochmals der Unterschied in den ^{14}C -Anfangsgehalten nach dem Chemie- und dem Isotopenmischungsmodell deutlich (vergl. hierzu Tab.17, Kap.5.3.3). Trotz der Verwendung des maximalen Leakage-Anteils von 15,9% verbleibt ein GwModellalter von 300 Jahren. Dieses hohe Grundwasseralter widerspricht der Mittleren Verweilzeit von 15 Jahren nach der Tritium-Methode. Die Tritiumgehalte von $32,4 \pm 3,0$ TU und $25,1 \pm 2,9$ TU in der Quelle Wykerslooth lassen, in Bezug auf eine Altersangabe zum Grundwasser, keine andere Interpretation zu, als daß die GwModellalter nicht anwendbar bzw. nicht zulässig sind. Dieses Beispiel verdeutlicht zum einen die Notwendigkeit der Kombination von ^3H - und ^{14}C -Methode, zum anderen die Forderung der "Triumpfreiheit" bei der Ausweisung von hohen GwModellaltern, was in Trois Ponts der Fall ist.

Grundwassertransport während des Pumpversuchs I in Trois Ponts

Der Pumpversuch I in Trois Ponts wird von zwei Probenahmeserien, direkt zu Beginn und gegen Ende der Grundwasserentnahmen, zur Bestimmung der ^{14}C -Gehalte eingerahmt. Für jeden Brunnen wird somit ein Ausgangs- und (für den Pumpversuch) ein End- GwModellalter festgestellt. Hierbei treten deutliche Altersunterschiede auf. In TPBR1, TPBR2, TPBR4 und TPBR5 werden die Grundwässer um ca. 860, 280, 420 und 640 Jahre jünger, während in TPBR3 eine Alterszunahme um ca. 1100 Jahre auftritt. Am Beispiel von TPBR1 soll die Änderung des GwModellalters im Bezug auf einen abzuleitenden GwTransport interpretiert werden (siehe Tab.22).

Die erste Probenserie stellt jeweils eine repräsentative Probe vom Grundwasser in der unmittelbaren Umgebung des Entnahmebrunnens dar. Dieses Grundwasser unterlag bislang ausschließlich den natürlichen Ruhestromungsbedingungen. Für die Grundwasserprobe TPBR1-3 bedeutet dies, daß dieses Grundwasser für den unterirdischen Transport vom Einzugsgebiet bis zu dieser Entnahmestelle (TPBR1) 2425 Jahre (GwModellalter) gebraucht hat. Unter der Annahme, daß während dieser gesamten Zeit die aktuellen (Ruhe-) Strömungsbedingungen geherrscht haben, läßt sich mittels der Abstandsgeschwindigkeit der Ruhestromung (v_a -Ruhestromg.=2,3 m/a) eine in dieser Zeit zurückgelegte Transportweite von 5511 m berechnen. Je nach angesetzter "Leakage-Bedingung" kann dieser Wert auf 2461 m zurückgehen. Für die Grundwasserprobe vom Ende des Pumpversuches ergibt sich eine Transportweite von 3555 m (minimal 554 m). Dieses Grundwasser befand sich somit zu Beginn des Pumpversuches in einer Entfernung von ca. 3600 m zum Infiltrationsgebiet. Infolge der Grundwasserentnahmen des Pumpversuchs und der dadurch verstärkten Grundwasserströmung ist die Entfernung zum Entnahmebrunnen (TPBR1) von ca. 1900 m im Zeitraum, der zwischen den beiden Probenahmeserien liegt, überwunden worden. Diese Feststellung stellt den Ansatz für die Berechnung von Kluftdurchlässigkeiten dar. In Tab. 22 sind die vom Pumpversuch erzeugten Transportweiten über die GwModellaltersunterschiede berechnet worden. Diese Transportweiten liegen zwischen 600 und 2600 m, was wiederum gut mit den Ergebnissen zur Berechnung der Reichweite (Kap.4.1.3) übereinstimmt. Hierbei zeigt sich, daß die GwModellaltersunterschiede (" ΔGwA " in Tab.22) von den verschiedenen "Leakage-Bedingungen" nur geringfügig verändert werden.

Kluftdurchlässigkeiten in Trois Ponts

Dieser abschließende Interpretationsschritt verknüpft, für den Standort Trois Ponts, die Daten zum Grundwassertransport mit charakteristischen Strömungsbedingungen der Pumpversuche zu durchlässigkeitsbeschreibenden Größen. Im Rückgriff auf die in Koerich bestimmten Kluftdurchlässigkeiten wird ein richtungsabhängiger Bezug zur Klüftung hergestellt.

Der Zeitraum zwischen den Grundwasserprobenahmen (" Δt_{Proben} ") und der in dieser Zeit zurückgelegte, durch den Pumpversuch erzeugte Transport ("Transportweite bei v_a -Ruhebd.") lassen sich zu einer Abstandsgeschwindigkeit zusammenfassen. Die Anwendung des DARCY'schen Gesetzes (Gleichung (16)) führt unter Verknüpfung mit ausgewählten, charakteristischen hydraulischen Bedingungen zu Durchlässigkeitswerten. Auf die Verwendung von Begriffen wie Permeabilität, Permeabilitätskapazität usw., die aus der Erdöl- und Erdgasexploration stammen, wird bei diesen hydraulisch ausgerichteten Betrachtungen verzichtet (s. Kap.4.1.1).

Mit einer effektiven Porosität von $\bar{n}_{\text{eff}}=100\%$ und einem hydraulischen Gradienten von $i=1\%$ wird eine wasserfüllte (offene) Kluft beschrieben, die im äußeren, von der Absenkung des PV I nur noch gering beeinflussten Bereich (zum Vergleich: $i_{\text{Ruhespiegel}}=0,08\%$) positioniert ist und in der unter den gegebenen Rahmenbedingungen die maximal auftretende Kluftströmung stattfindet. Obwohl die Kluftbreite oder die wirksame Breite der Kluftzone nicht bekannt ist, sind diese Werte mit den Transmissivitäten der Kluftsysteme in Koerich vergleichbar.

Der speichernutzbare Hohlraumanteil von $\bar{n}_{\text{eff}}=22\%$ ist im Rahmen der Pumpversuchsauswertung ermittelt worden (Kap.4.1.2.3) und muß als integrativer Gebietswert des Aquifersystems am Standort Trois Ponts verstanden werden. Der hydraulische Gradient von $i=10\%$ tritt im "inneren Absenkungstrichter" von Pumpversuch I auf (siehe Abb.16). Die zu diesen hydraulischen Bedingungen berechneten Werte quantifizieren die Grundwasserströmung im Nahbereich der Entnahmekunnen während der Absenkungsphase des Pumpversuchs I.

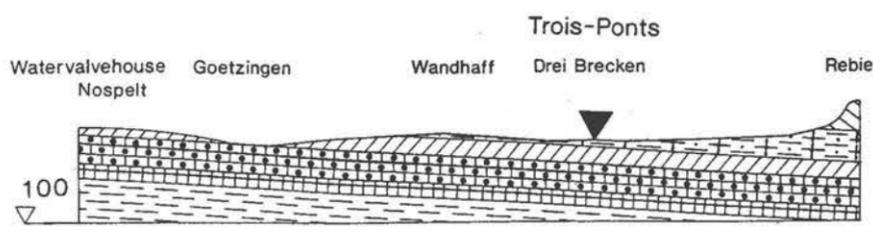
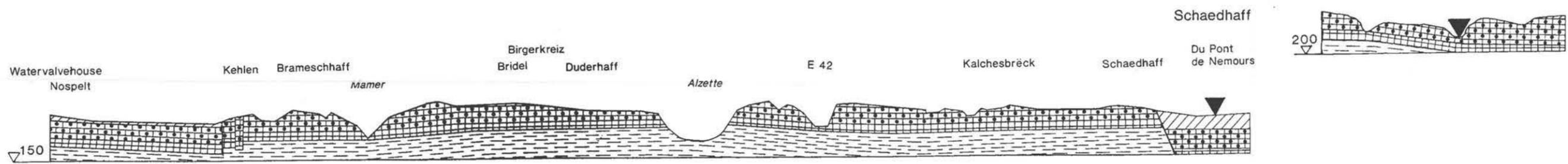
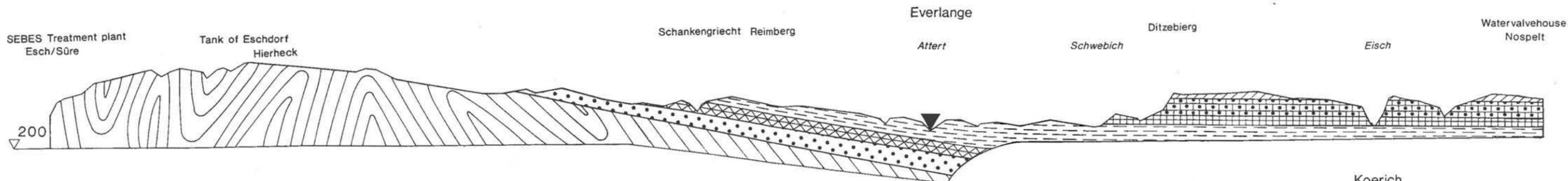
Mit dem hydraulischen Gradienten von $i=3\%$ wird der äußere Teil des Absenkungstrichters von Pumpversuch II wiedergegeben, womit die maximal aufgetretene Grundwasserströmung im weiteren Bereich der Entnahmekunnen (ggf. am Standort) erfaßt wird.

Im Vergleich mit den Kluftdurchlässigkeiten am Standort Koerich (Tab.8, Kap.4.2.1.2) lassen sich die Kluftdurchlässigkeiten von TPBR1, TPBR3 und TPBR5 denen der Hauptkluft- richtung von Koerich zuordnen. Die Kluftdurchlässigkeiten von TPBR2 und TPBR4 fügen sich eher in die Größenordnung der Querkluft- richtung in Koerich ein.

Zum überregionalen Vergleich und zum Erkennen von Trends wurden am Standort Schaedhaff ^3H - und am Standort Everlange ^{18}O -, ^2H - und ^3H -Gehaltsbestimmungen durchgeführt. Die Isotopenproben erfassen den noch \pm natürlichen Zustand zu Beginn (6/91) der Phase der maximalen Grundwasserentnahmen durch die *solution de recharge* und belegen die Grundwassersituation gegen Ende der Förderung (9/91).

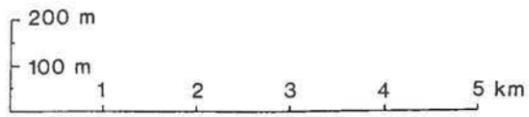
Schaedhaff

Die z.T. artesisch gespannten Grundwässer des bedeckten Luxemburger Sandstein-Aquifers weisen am Standort Schaedhaff Tritiumgehalte von 10-20 TU auf. Bei diesen ^3H -Gehalten läßt die Tritium-Methode eine Doppeldeutigkeit im Bezug auf die Ausweisung von Mittleren Verweilzeiten zu. Dies wird am Beispiel der Probenserie 6/91 mit einem mittleren ^3H -Gehalt von 19,5 TU verdeutlicht. So führt die Interpretation der 19,5 TU als den typischen ^3H -Gehalt eines jungen Grundwassers mit einer Mittleren Verweilzeit von 7 Jahren zur Ausweisung eines geringen, nur noch modellansatzbedingten Mischungsanteils der Komponente " $>40\text{a}$ ". Die Interpretation des Tritiumgehaltes von 19,5 TU als eine Grundwassermischung einer tritiumfreien Komponente mit einer stärker tritiumhaltigen, führt zur Ausweisung eines Anteils der " $>40\text{a}$ "-Komponente größer 50% und zu einer Mittleren Verweilzeit von 58 Jahren. Infolge der Grundwasserentnahmen steigt der Anteil der tritiumfreien Komponente an der Grundwassermischung,



▼ Exploitation sites

- LIAS
 - Pliensbachian
 - Sinemurian, marly
 - Sinemurian and Hettangian, sandy
 - Hettangian, marly
- Triassic
 - KEUPER
 - MUSCHELKALK
 - BUNTSANDSTEIN
- Palaeozoic
 - DEVONIAN lower

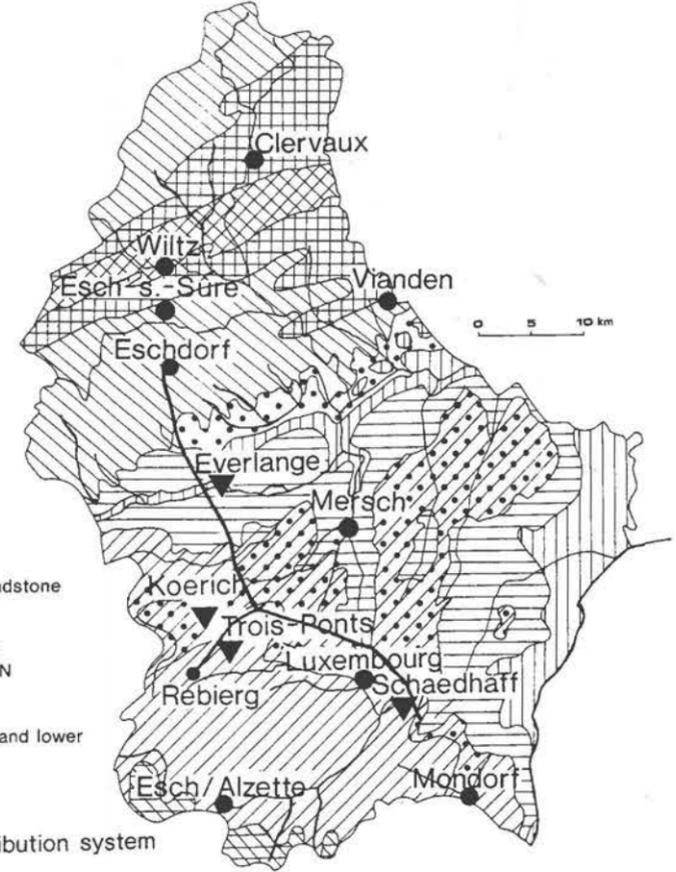


F.-J. Struffert: Hydrogeologische Detailuntersuchungen im Rahmen der "solution de recharge" (Ersatzlösung) in Luxemburg

Anlage 1: Generalisierte Darstellung regionalgeologisch bedeutender Einheiten im Hinblick auf die solution de recharge in Luxemburg nach R. Maquil, Serv. Géol. Lux.

veröffentlicht in: Western European Geological Surveys: Geology and the Environment in Western Europe, Oxford 1992

- Jurassic
 - DOGGER
 - LIAS in general
 - Luxembourg sandstone
 - Triassic
 - KEUPER
 - MUSCHELKALK
 - BUNTSANDSTEIN
 - Palaeozoic
 - EMSIAIAN upper
 - EMSIAIAN middle and lower
 - SIEGIANIAN
- SEBES Distribution system



was zur Berechnung einer Mittleren Verweilzeit von 109 Jahren führt. Die Kombination dieser ^3H -Daten mit den Konzentrationen an Cl^- , NO_3^- und SO_4^{2-} unterstützt durch das Auftreten von Trends den Nachweis von entnahmebedingten Veränderungen. Dies wird durch das Heranziehen von älteren, tritiumfreien und weniger belasteten Grundwässern erklärt.

Everlange

Am Standort Everlange erschließen fünf Förderbrunnen eine Abfolge von grundwasserführenden Horizonten der sog. sandigen Randfazies der Trias. Unter den artesischen Strömungsbedingungen lassen die Pumpversuche keine Differenzierung zwischen den Brunnen zu. Erst im Zuge der Auswertung der Isotopen-Methoden konnten die hydrochemischen Unterschiede zwischen E15-1 und den anderen Brunnen erklärt werden. So ist das Grundwasser aus E15-1 als tritiumfrei zu bezeichnen, während die ^3H -Gehalte der Grundwässer aus den anderen Brunnen in die Klasse "3 bis 10 TU" einzuordnen sind. Dieser Unterschied tritt auch bei der Betrachtung der Mittleren Verweilzeiten und der Grundwassermischungskomponenten auf. Die Mittleren Verweilzeiten der Entnahmebrunnen E15-2, -3, -4, -5 variieren zwischen 160 und 430 Jahren. Für das Grundwasser aus E15-1 wird eine MVZ von 770 Jahren berechnet, wobei die Komponenten "jünger 40a" zusammen nur noch mit 5% am Grundwasser beteiligt sind. In diesem Fall ist die äußerste Grenze der Tritium-Methode - auch bei modellmäßiger Auswertung bzw. Interpretation - erreicht. Die Kombination der ^3H -Gehalte mit hydrochemischen Daten (Cl^- -, NO_3^- -, SO_4^{2-} -Konzentrationen) unterstreicht durch hohe Anionenkonzentrationen bei geringen ^3H -gehalten die besondere Stellung von Brunnen E15-1. Dieser deutliche Unterschied zwischen E15-1 und, vor allem, dem direkt benachbarten Brunnen E15-2 wird auf eine den Grundwasseraustausch behindernde Wirkung einer zwischen diesen Brunnen verlaufenden Störung zurückgeführt. In den LUCIUS'schen Geländeaufnahmen von 1940 und 1946 (Blatt Redange) wird der Verlauf dieser Störung ausgewiesen. Anhand der Bohrergergebnisse vom Abteufen der Brunnen läßt sich kein direkter Nachweis führen. Die aufgezeigte versiegelnde Wirkung der Störung läßt einen rechtsinnigen aufschiebenden Charakter vermuten. Das Grundwasser aus Brunnen E15-1 ist als ein altes, dem permo-triadischen Basalkonglomerat entstammendes Tiefenwasser anzusprechen.

Zwischen den Probenahmeserien 6/91 und 9/91 wird, nach der Berechnung sog. Niederschlagstemperaturen aus den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten, ein entnahmebedingter Anstieg in diesen Temperaturen um 0,5-1,1°C deutlich. Dies steht im Gegensatz zu den Beobachtungen in Trois Ponts - Koerich; dort nehmen diese (Infiltrations-) Niederschlagstemperaturen im Laufe der Grundwasserentnahmen um 0,2-1,1°C ab. Die zeitlich-klimatische Einordnung der Grundwässer aus Everlange in die Gliederung des Quartärs zeigt nur im Bereich des alten Grundwassers aus Koerich eine Übereinstimmung mit der aufgestellten Temperaturkurve.

Zusammenfassend betrachtet zeigen die Isotopen-Untersuchungen an den Standorten Schaedhaff und Everlange, daß neben dem überregionalen Vergleich mit den anderen Standorten Trois Ponts und Koerich sowohl das Erkennen von langfristigen Trends (Schaedhaff), als auch der Nachweis von lokal wirksamen hydraulischen Barrieren (Everlange) möglich ist. Die Kombination der Isotopen-Methoden mit Daten anderer Verfahren führt zu einem deutlichen Informationsgewinn.

Einfluß von Leakage auf die ^{14}C -GwModellalter und Kluftdurchlässigkeiten in Trois Ponts												
A_0 -Iso.	^{14}C -Probe	$\Delta(A_0 ; ^{14}\text{C}\text{-Probe})$			Korrektur: ^{14}C -Probe			kein L.	Grundwasser-Modellalter			
		(0%mod.)	(5%mod.)	(10%mod.)	(0%mod.)	(5%mod.)	(10%mod.)		(0%mod.)	(5%mod.)	(10%mod.)	(10%mod.)
[%mod.]	[%mod.]	[%]	[%]	[%]	[%mod.]	[%mod.]	[%mod.]	[a]	[a]	[a]	[a]	
K-Qu14												
8.9% - 15.9%-Leakageanteil												
A_0 -chem: 56	50	11	10	9	50.0	50.0	50.0	937	937	937	937	
A_0 -iso : 62	50	19	18	16	58.0	58.9	59.8	1778	558	428	300	
14 %-Leakageanteil												
TPBR1-3	59	44	25.4	23.3	21.1	50.2	51.0	51.8	2425	1342	1211	1083
TPBR1-6	58	48	17.2	15.8	14.3	54.7	55.5	56.3	1564	481	362	244
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								5511	3050	2753	2461	
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								3555	1094	822	554	
Δt_{Proben} : 22 Tage								ΔGwA [a]:	861	861	850	839
Transportweite in ΔGwA unter v_a -Ruhebdg. [m]:								1956	1956	1931	1908	
Kluftdurchlässigkeiten im Pumpversuch I [m/sec]								$n_{\text{eff}}=100\%$ $i=1\%$:	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=10\%$:	2.3E-03	2.3E-03	2.2E-03	2.2E-03
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=3\%$:	7.5E-03	7.5E-03	7.5E-03	7.4E-03
8 %-Leakageanteil												
TPBR2-3	61	53	13.1	12.0	11.0	57.2	57.7	58.1	1162	526	464	402
TPBR2-6	59	53	10.2	9.3	8.4	57.2	57.7	58.1	887	250	188	127
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								2641	1195	1054	914	
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								2015	569	428	288	
Δt_{Proben} : 22 Tage								ΔGwA [a]:	276	276	276	276
Transportweite in ΔGwA unter v_a -Ruhebdg. [m]:								626	626	626	626	
Kluftdurchlässigkeiten im Pumpversuch I [m/sec]								$n_{\text{eff}}=100\%$ $i=1\%$:	3.3E-02	3.3E-02	3.3E-02	3.3E-02
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=10\%$:	7.2E-04	7.2E-04	7.2E-04	7.2E-04
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=3\%$:	2.4E-03	2.4E-03	2.4E-03	2.4E-03
12 %-Leakageanteil												
TPBR3-3	62	53	14.5	13.3	12.2	59.4	60.0	60.7	1297	360	267	175
TPBR3-7	63	47	25.4	23.4	21.4	52.6	53.3	54.0	2422	1485	1380	1277
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								2947	818	606	397	
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								5505	3375	3137	2902	
Δt_{Proben} : 25 Tage								ΔGwA [a]:	-1125	-1125	-1114	-1102
Transportweite in ΔGwA unter v_a -Ruhebdg. [m]:								2558	2558	2531	2505	
Kluftdurchlässigkeiten im Pumpversuch I [m/sec]								$n_{\text{eff}}=100\%$ $i=1\%$:	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=10\%$:	2.6E-03	2.6E-03	2.6E-03	2.6E-03
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=3\%$:	8.7E-03	8.7E-03	8.6E-03	8.5E-03
15 %-Leakageanteil												
TPBR4-3	57	38	33.3	30.4	27.5	43.7	44.6	45.4	3352	2196	2035	1876
TPBR4-6	57	40	29.8	27.2	24.6	46.0	46.9	47.7	2928	1772	1619	1468
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								7618	4992	4625	4265	
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								6654	4028	3679	3337	
Δt_{Proben} : 24 Tage								ΔGwA [a]:	424	424	416	408
Transportweite in ΔGwA unter v_a -Ruhebdg. [m]:								964	964	945	928	
Kluftdurchlässigkeiten im Pumpversuch I [m/sec]								$n_{\text{eff}}=100\%$ $i=1\%$:	4.6E-02	4.6E-02	4.6E-02	4.5E-02
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=10\%$:	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	9.8E-04
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=3\%$:	3.4E-03	3.4E-03	3.3E-03	3.3E-03
12 %-Leakageanteil												
TPBR5-3	61	48	21.3	19.6	17.8	53.8	54.4	55.1	1981	1044	942	840
TPBR5-6	60	51	15.0	13.8	12.5	57.1	57.8	58.5	1343	407	310	214
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								4503	2374	2140	1910	
Transportweite bei v_a -Ruhebedingungen [m]:								3053	924	704	487	
Δt_{Proben} : 25 Tage								ΔGwA [a]:	638	638	632	626
Transportweite in ΔGwA unter v_a -Ruhebdg. [m]:								1450	1450	1436	1423	
Kluftdurchlässigkeiten im Pumpversuch I [m/sec]								$n_{\text{eff}}=100\%$ $i=1\%$:	6.7E-02	6.7E-02	6.6E-02	6.6E-02
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=10\%$:	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.4E-03
								$n_{\text{eff}}=22\%$ $i=3\%$:	4.9E-03	4.9E-03	4.9E-03	4.8E-03

(0%mod.)(5%mod.)(10%mod.): ^{14}C -Konzentration der Leakage-Wässer a: Jahr(e) GwA: GwModellalter (ohne Varianz)
 n_{eff} : effektiver Hohlraumanteil der Kluft i: wirksamer hydraul. Gradient v_a -Ruhebdg.=2,3 m/a (Abstandsgeschwindigkeit)

Tab. 22: Einfluß von Leakage auf die ^{14}C -Grundwasser-Modellalter und Kluftdurchlässigkeiten in Trois Ponts

8 Synthese

Die Grundwasservorkommen an den Standorten Koerich und Trois Ponts sind jeweils an spezifische tektonische Strukturen gebunden und können als eigenständige Einzelsysteme betrachtet werden. Die hydrogeologische Verbindung beider Standorte durch die Luxemburger Sandstein-Formation und die übergreifende Hydraulik im einheitlichen Kluftsystem erfordert eine gesamt-systematische Betrachtung. Diese beiden in ihren Einzelkomponenten z.T. sehr differenziert untersuchten Standorte stehen z.Z. - auch in der Betrachtung als Gesamtsystem - ohne die Möglichkeit der Einbindung in regionale bzw. überregionale Rahmendaten.

In Koerich sind das (Fluß-) Tal der Eisch und der Verlauf der Depressionen (Sattel- und Muldenbau nach LUCIUS 1948) im anstehenden verwitterten Luxemburger Sandstein für das Auftreten von Quellen und für die Grundwasserhöflichkeit bestimmend. Der Vergleich der Niederschläge mit den gewässerkundlichen Daten der Eisch und die Bestimmung der Gehalte der stabilen Isotope Deuterium und Sauerstoff-18 an den aktuellen Niederschlägen des letzten Jahrzehnts zeigen eine saisonale Grundwasserneubildung während der vegetationslosen Wintermonate an. Die aktuellen Niederschläge der Stationen Trier, Karlsruhe und Weil am Rhein zeigen aktuelle Trends in den Gehalten an stabilen Isotopen der Winterniederschläge. Die Zeiten der Neubildung der beprobten Grundwässer werden anhand der Isotopenfraktionierung von Deuterium und Sauerstoff-18, aus der Berechnung sog. Niederschlagstemperaturen und aus der Kombination dieser Daten mit Grundwassermodellaltern diskutiert. Das Grundwasserreservoir in Trois Ponts kann hiernach während des Subatlantikums aufgefüllt worden sein. Für die Grundwässer in Koerich ist eine Infiltration seit dem ausgehenden Subatlantikum anzunehmen. Die Grundwässer der Standorte Schaedhaff (überdeckter Luxemburger Sandstein) und Everlange (Aquifere der sandigen, sog. Randfazies der Trias) lassen sich in diesen zeitlich-klimatischen Rahmen einordnen. Das Grundwasser aus dem zum Vergleich herangezogenen Br.-Sidor (Luxemburger Sandstein-Aquifer in 196-274 m Teufe) nimmt, den Annahmen nach, am unterirdischen Abfluß seit dem ausgehenden Pleistozän teil.

Im betrachteten Abschnitt des Eisch-Tales bei Koerich wird der Niedrigwasserabfluß (NNQ) der Eisch von den Grundwasserübertritten bestimmt (Effluenz). Der oberirdische und der unterirdische Abfluß sind in diesem Bereich als getrennte Strömungssysteme ausgebildet und stehen über eine Infiltrationszone entlang des Flußlaufes miteinander in Kontakt, so daß je nach (Leakage-) Ansatz zwischen ca. 1% und 10% des NNQ das Grundwasser anreichern. Die Grundwasserströmung findet entgegen anfänglicher, aus der Verwitterungsform des Luxemburger Sandsteins abgeleiteter Vorstellung hauptsächlich auf den Kluftbahnen statt. Einflüsse einer heterogenen Gesteinsdurchlässigkeit bzw. einer Doppelporosität werden nicht deutlich. Im Bereich der "Hauptmulde" *Koerich-Simmern-Ditzebierg* wird in einer Kluftzone die Kluftdurchlässigkeit der vorherrschenden Haupt- und Querkluftsysteme zu $T_{HKR-K} = 0,12-0,18 \text{ m}^2/\text{sec}$ bzw. $T_{QKR-K} = 4,5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$ bestimmt. Lokal auftretende, z.T. erheblich abweichende Werte werden durch sekundäre Verfüllungen der Kluftbahnen mit sandig-kalkigen Verwitterungsresiduen bis hin zur vollständigen mergelig-kalkigen Versiegelung verursacht. Mit dem integrativen Gebietswert von $T_{li2-K} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ wird die Anisotropie ausgeglichen und eine mittlere unterirdische Abflußrate von $1,3-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ errechnet. Die Grundwasserspiegel sind von drei Seiten auf die Kluftzone ausgerichtet. In Längsrichtung der Depression findet etwa der 4-fache Grundwasserumsatz statt, als von den Seiten anströmt. Hieran ist die Bedeutung dieser Depressionszone für die regionale Grundwasserströmung zu ermessen.

Mit Hilfe des Tritiums wird die Grundwasserströmung in Koerich als ein "3-Komponenten-Mischsystem" beschrieben. Die Mischungskomponenten sind "tritiumfrei", haben Tritiumgehalte in Höhe des aktuellen Inputs oder weisen noch Anteile des anthropogenen (Bomben-

) Tritiumpeaks vom Anfang der 60er Jahre auf. Die Verwendung von sog. "lumped-parameter"-Modellen erlaubt unter Anwendung des Tracer-Ansatzes und der künstlichen Markierung der Atmosphäre und Hydrosphäre mit Tritium aus Atombombentests die Berechnung von "Mittleren Verweilzeiten". Die Quellwässer und die gut durchmischten Grundwässer des Eishtaales haben Mittlere Verweilzeiten von 14 bis 20 Jahren. Da die Mittlere Verweilzeit aus den Verweilzeiten aller am Grundwasser und seiner Mischung beteiligten Komponenten gebildet wird, werden - entsprechend den Modellvorstellungen - Anteile von Verweilzeit-Gruppen (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) an der jeweiligen Mittleren Verweilzeit per Computerprogramm berechnet. Die Grundwässer aus dem "Muldentiefsten", im Übergang zu den Grundwässern des überdeckten Bereichs, leiten mit geringen Tritiumkonzentrationen und modellmäßig berechneten Mittleren Verweilzeiten von 150 bis 425 Jahren zu den tritiumfreien Grundwässern aus Trois Ponts über. Durch die Kombination von Tritiumgehalten mit hydrochemischen Daten (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} -Konzentrationen) werden in Koerich Grundwassermischungsreihen aufgezeigt und lokale anthropogene Einflüsse erkannt. Die oberflächennahen Grundwässer aus Koerich und die Tiefenwässer aus Trois Ponts bilden hierbei (Mischungs-) Endglieder, zwischen denen Übergänge entlang von Mischungsgeraden in den Diagrammen deutlich werden. Lokale Veränderungen, die durch Grundwasserentnahmen bedingt sind, werden ebenfalls erkannt.

In Trois Ponts ist das Grundwasser des Luxemburger Sandsteins chemisch reduziert und tritiumfrei, so daß Grundwasser-Modellalter und -Verweilzeiten im Untergrund durch die Anwendung der Radiokohlenstoff-Methode (^{14}C -Methode) ermittelt wurden. Maßgebend für die Aussagekraft dieser Methode bei hydrogeologischen Aufgabenstellungen ist die Beachtung des hydrosphärischen Teils im Kohlenstoffkreislauf. Die natürlichen C-Austauschprozesse erfordern die Anwendung von Korrekturverfahren, die - zum einen - auf hydrochemischem Weg mit dem sog. Chemiemischungsmodell und - zum anderen - mit dem sog. Isotopenmischungsmodell anhand der ^{13}C -Gehalte vorgenommen wurden. Die ermittelten Modellalter der Grundwässer aus dem Luxemburger Sandstein-Aquifer in Trois Ponts liegen im Mittel zwischen 500 und 3300 Jahren, wobei gerade bei - für diese Methode geringen - GwModellaltern von wenigen 100 Jahren z.T. erhebliche Toleranzen in Kauf genommen werden müssen. In den mergelig-kalkigen "leaky-" Deckschichten sind die ^{14}C -Konzentrationen durch C-Austauschprozesse so gering bzw. nicht mehr nachweisbar, daß GwModellalter "> 32000 Jahre" auftreten. Der Einfluß dieser Wässer in Form von Leakage-Anteilen auf die GwModellalter des Luxemburger Sandstein-Aquifers wird in Kombination mit hydraulischen Daten unter dem Gesichtspunkt einer scheinbaren Grundwasseralterung diskutiert. Die Entwicklung der beprobten Grundwässer zu größeren Verweilzeiten als Folge von zunehmendem C-Austausch wird in diesem Zusammenhang veranschaulicht. Das Grundwasser aus Br.-Sidor, mit einer Verweilzeit von 26400 Jahren, wird als Beispiel eines alten, isotopisch gereiften Grundwassers angesehen, bei dem bereits der größte Teil des primären ^{14}C -Gehaltes durch ^{14}C -freien Kohlenstoff der Gesteinsmatrix ausgetauscht ist, zumal in diesem Grundwasser auch ein erheblicher Ionenaustausch stattgefunden hat.

Die hydraulischen Untersuchungen beschreiben den natürlichen, ungestörten Ruhezustand in Trois Ponts mit einer Grundwasserscheide, deren flach geneigte Druckwasserspiegel ($i=0,08\%$) nach N auf die Eisch und nach SE auf eine überregionale Störungszone gerichtet sind. Die unter diesen Bedingungen bestehende natürliche Grundwasserströmung erreicht eine mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 2,3 m/a und entspricht einem natürlichen Grundwasserabstrom (-volumen) von $1,5-1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$, was wiederum 59-67% des langfristigen mittleren Jahresniederschlages von 792 mm/m^2 ausmacht. Die Pumpversuchsauswertung zeigt, daß der Einfluß von Leakage unbedingt - sowohl bei der Auswertung der Absenkungs- als auch der Wiederanstiegsdaten - berücksichtigt werden muß. Anhand dieser Daten tritt im Ruhezustand ein natürliches Leakage von $2,6-4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ auf, was etwa 10-18% des langjährigen mittleren

Niederschlag entspricht. Diese natürliche Zusickerung aus den hangenden Mergel- und Kalksteinen in den Luxemburger Sandstein-Aquifer beträgt ca. 15-31% des natürlichen Grundwasserabstromes. Die Betrachtung des sich im Laufe längerfristiger Grundwasserentnahmen einstellenden stationären Strömungszustandes führt im Fall des Pumpversuch I bei einer Grundwasserförderung von ca. 200 m³/h (max. $Q_{\text{Trois Pont}} = 420 \text{ m}^3/\text{h}$) zur Ausweisung einer gemittelten sog. Reichweite von ca. 1500 m. In diesem Absenkungsbereich treten dann Leakageraten von 0,06 bis 0,106 m³/sec bzw. 220 bis 380 m³/h auf, womit die Bilanz ausgeglichen erscheint. Die Isotopen-Methoden belegen Änderungen in den Modellaltern der geförderten Grundwässer im Laufe des Entnahmezeitraumes um 400-1000 Jahre (sowohl jünger als auch älter). Für die Dauer des Pumpversuches lassen sich mit Hilfe von Kluftdurchlässigkeiten auf der Basis der Ruheströmungsbedingungen Transportweiten von 600 bis 2600 m berechnen, die wiederum innerhalb der Varianz der berechneten Reichweiten der Absenkung liegen. Die abgeleiteten wirksamen Kluftdurchlässigkeiten stimmen, bei entsprechender Beachtung der Genauigkeit, gut mit der Durchlässigkeit der Hauptklufttrichtung in Koerich überein. Aus den Grundwasserstandsaufzeichnungen der Pumpversuche und aus den speziell ausgerichteten Grundwasser-Temperaturprofilen lassen sich keine Hinweise auf anisotrope Kluftdurchlässigkeiten erkennen. Die Gw-Temperaturprofile zeigen verschiedene teufen- und materialspezifische Gw-Temperaturgradienten, die je nach erreichter bzw. stattfindender (wirksamer) Durchströmung mit Grundwasser charakteristisch verändert sind und somit eine zonale halbquantitative Beschreibung des Grundwasserströmung zulassen. Die den Kluftdurchlässigkeitsberechnungen zugrundeliegenden hydrogeologischen Kennwerte stammen aus der Pumpversuchsauswertung, bei der spezielle Korrekturverfahren eingeführt wurden. Sie können deshalb als Gebietswerte und als Gebirgsdurchlässigkeit aufgefaßt werden. Die Transmissivität des Luxemburger Sandsteins in Trois Ponts beträgt $T_{i2-TP} = 1,4-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ und der Speicherkoefizient $S = 3,1 \cdot 10^{-4}$. Mit Hilfe des barometrischen Koeffizienten wurde aus den elastischen Eigenschaften dieses gespannten Grundwasserleiters ein (speicher-) wirksamer Hohlraumanteil von 22% ermittelt. Die Transmissivität bzw. der Durchlässigkeitsbeiwert der hangenden "leaky-"Deckschicht beträgt für eine vertikal gerichtete Durchströmung $T_{(i3) \rightarrow v} = 1,2-2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ bzw. $k_{f(i3) \rightarrow v} = 1,5-2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}/\text{sec}$. Die Leakage-Eigenschaften werden durch einem sog. Leakagefaktor von 911 m bzw. 651 m beschrieben. Die hydraulische Leitfähigkeit des Aquitarden wurde zu $1,9-3,3 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{sec)m}^{-2}$ und der hydraulische Widerstand gegen eine vertikale Durchsickerung auf 78-137 Jahre festgelegt. Die Gesteinsdurchlässigkeit des Aquitarden liegt mit $k_{f(i3)} = 1,4-2,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}/\text{sec}$ um eine Potenz unter dem (Gebirgs-) Durchlässigkeitsbeiwert aus dem Pumpversuch.

Die Betrachtung der beiden Standorte aus einem regionalen Blickwinkel zeigt klar gegliederte, insgesamt einheitliche geologische Gebiete, deren hydrologische und hydrogeologische Elemente mit den geologisch-morphologischen Einheiten des westlichen Gutlandes in Einklang stehen.

Die Ergebnisse der vorliegenden hydrogeologischen Detailuntersuchungen zeigen, daß trotz der speziell durchgeführten, intensiven und akribischen Datenerhebung und speziell angepaßter Korrekturverfahren die detaillierte Erfassung und Aufschlüsselung der (einzelnen) Grundwassersysteme und ihrer Komponenten nur bis zu einem gewissen Grad gelingt. Die eingesetzten Verfahren wurden dabei bis an die Grenze ihrer Einsetzbarkeit bzw. Aussagemöglichkeit genutzt und wechselseitig kontrolliert.

Gegebenenfalls später nachfolgende, auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungen speziell angesetzte Versuche und Datenerhebungen versprechen eine Festigung der aufgestellten Synthese. Hierbei erscheint die Einpassung in regionale und überregionale Rahmendaten unerläßlich.

Synthesis

The groundwater occurrences at the Koerich and Trois Ponts sites are bound in each case to specific tectonic structures and can be considered as independent individual systems. The hydrogeological connection of both sites by the Luxembourg sandstone formation and the overlapping hydraulics in the uniform fracture system renders it necessary to examine the system as a whole. These two sites, which were partly examined with regard to their individual components in a very differentiated fashion, have at present no possibility for being incorporated into regional or supra-regional framework data - even when considered as a whole system.

In Koerich, the (river) valley of the Eisch and the course of the depressions (anticline and syncline formation according to LUCIUS 1948) in the in situ weathered Luxembourg sandstone are determining factors for the occurrence of springs and for the perennial yield of groundwater. If the precipitations are compared with the hydrology data of the Eisch and if the contents of the stable isotope deuterium and oxygen-18 are determined in the current precipitations for the last decade, it is shown that there is a seasonal formation of new groundwater during the vegetationless winter months. The current precipitations for the stations Trier, Karlsruhe and Weil am Rhein show current trends in the concentration of stable isotopes in the winter precipitations. The times of recharge of the sampled groundwaters are discussed with reference to the isotope fractioning of deuterium and oxygen-18, from the calculation of so-called precipitation temperatures and from the combination of this data with groundwater model ages. The groundwater reservoir in Trois Ponts may accordingly have been filled during the Subatlantikum. For the groundwater in Koerich, it can be assumed that there has been infiltration since the late Subatlantikum. The groundwaters of the sites Schaedhaff (overlaid Luxembourg sandstone) and Everlange (aquifers of the sandy, so-called boundary facies of the Trias) can be classified within this chronological-climatological framework. The groundwater from Br.-Sidor (Luxembourg sandstone aquifer at a depth of 196-274 m), taken for comparison purposes, has been involved, according to the assumptions, in the underground flow since the late pleistocene period.

In the section of the Eisch valley under examination, near Koerich, the minimal runoff drainage (NNQ) of the Eisch is determined by the effluence of groundwater. The overground and underground flow are separate flow systems in this area and are in contact with one another through an infiltration zone along the course of the river, and so between approximately 1% and 10% of the NNQ enriches the groundwater, according to the leakage rate. The groundwater flow mainly proceeds on the fracture paths, contrary to the initial notion developed from the form of weathering of the Luxembourg sandstone. There is no clear evidence of influences from a heterogeneous rock permeability or, as the case may be, double porosity resp. double permeability. In the area of the "main syncline" *Koerich-Simmern-Ditzebierng* the fracture permeability of the predominant main and transverse fracture systems in a fracture zone are determined as $T_{HKR-K}=0,12-0,18 \text{ m}^2/\text{sec}$ and $T_{QKR-K}=4,5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$ respectively. Local, partly highly deviant values are caused by secondary filling of the fracture paths with sandy-limey weathering residues through to complete marly-limey sealing. With the integrative value of $T_{II2-K}=4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ the anisotropy is equalled out and a mean underground flow rate of $1,3-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ is calculated. The groundwater tables are aligned on three sides to the fracture zone. In longitudinal direction of the depression the groundwater turnover rate is

about 4 times that flowing from the sides. The importance of this depression zone for the regional groundwater flow can be judged by this.

With the help of tritium the groundwater flow in Koerich is described as a "3-component mixing system". The mixture components are "tritium-free", have tritium contents on the level of the current input or still display fractions of the man-made (bomb-related) tritium peak from the early sixties. The use of so-called "lumped parameter" models makes it possible to calculate "mean residence times" by applying the tracer formula and by the artificial marking of the atmosphere and hydrosphere by tritium from atom bomb tests. The spring waters and the thoroughly mixed groundwaters of the Eisch valley have mean residence times of 14 to 20 years. Since the mean residence time is formed from the residence times of all components involved in the groundwater and its mixing, portions of residence time groups (< 1a; 1-10a; 10-20a; 20-40a; > 40a) in relation to the respective mean residence time are calculated with a computer program - in accordance with the model notions. The groundwaters from the "syncline low-point", in the transition to the groundwaters of the overlaid area, pass, with low tritium concentrations and mean residence times calculated on a model basis of 150 to 425 years, over to the tritium-free groundwaters from Trois Ponts. With the combination of tritium contents with hydrochemical data (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} concentrations), groundwater mixing series in Koerich are highlighted and local man-made influences recognised. The near-surface groundwaters from Koerich and the deep ground waters from Trois Ponts form last links (in the mixing), between which transitions along mixing lines in the diagrams become evident. Local changes caused by the groundwater discharge are also found.

In Trois Ponts the groundwater of the Luxembourg sandstone is chemically reduced and tritium-free, and so the groundwater model age and residence times in the subsoil was determined by the radiocarbon method (^{14}C -method). Crucial for the informativeness of this method when used for hydrogeological purposes is consideration of the hydrospherical part in the carbon cycle. The natural C-exchange processes necessitate the application of correction procedures. These are applied - on the one hand - hydrochemically with the so-called chemical model and - on the other - with the so-called isotope mixing model on the basis of the ^{13}C contents. The model age determined for the groundwaters from the Luxembourg sandstone aquifer in Trois Ponts are on average between 500 and 3300 years, although with groundwatermodel ages of a few 100 years in particular - low for this method - considerable tolerances sometimes have to be reckoned with. In the marly-limey "leaky" overlying strata the ^{14}C concentrations are so low or no longer detectable because of the C-exchange process, that groundwatermodel ages of "> 32000 years" arise. The influence of these waters in the form of leakage fractions on the groundwatermodel ages of the Luxembourg sandstone aquifer is discussed in combination with hydraulic data from the point of view of an apparent groundwater ageing. The development of the sampled groundwaters towards longer residence times as a result of increasing C-exchange is highlighted in this context. The groundwater from Br.-Sidor, with a residence time of 26400 years, is regarded as an example of an old, isotopically matured groundwater, with which the major portion of the primary ^{14}C content has already been replaced by ^{14}C -free carbon of the rock matrix, especially since in this groundwater a considerable ion exchange has also taken place.

The hydraulic investigations describe the natural, undisturbed rest state in Trois Ponts with a groundwater divide whose shallow inclined piezometric surface ($i=0,08\%$) is oriented to the north to the Eisch and to the south-east, to a supra-regional fault zone. The natural groundwater flow prevailing under these conditions reaches a mean distance speed of 2,3 m/a

evaluation of the pumping tests shows that the influence of the leakage must be considered - both in the analysis of the drawdown data and the subsequent rising data. On the basis of this data natural leakage of $2,6-4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ occurs in rest state, which corresponds to 10-18% of the long-term mean precipitation. This natural in-seepage from the suspended marl and lime rocks in the Luxembourg sandstone aquifer is approximately 15-31% of the natural groundwater flow. Consideration of the steady-state flow condition setting in in the course of long-term groundwater discharge leads in the case of pumping test I, with a pumping rate of approximately $200 \text{ m}^3/\text{h}$ (max. $Q_{\text{Trois Ponts}}=420 \text{ m}^3/\text{h}$), to the demonstration of a mean so-called range of drawdown approximately 1500 m. In this drawdown area leakage rates of $0,06$ to $0,106 \text{ m}^3/\text{sec}$ or 200 to $380 \text{ m}^3/\text{h}$ arise, which means that the balance appears to be equalled out. The isotope methods verify changes in the model ages of the groundwaters transported over the removal period of 400-1000 years (both younger and older). For the duration of the pumping test it is possible, with the help of fracture permeabilities and on the basis of the rest state conditions, to calculate transport distances of 600 to 2600 m, which in turn are within the variance of the calculated ranges of the drawdown. The effective fracture permeabilities derived show a high level of agreement with the permeability of the main fracture direction in Koerich, giving due consideration to the accuracy involved. From the groundwater records for the pumping tests and from the specifically oriented groundwater temperature profiles it is not possible to find any indications of anisotropic fracture permeabilities. The groundwater temperature profiles display different depth-specific and material-specific groundwater temperature gradients, which are changed in a characteristic fashion according to the (effective) flow-through of groundwater achieved or occurring, and thus make possible a zonal, semi-quantitative description of the groundwater flow. The hydrogeological characteristics providing the basis for the fracture permeability calculations are obtained from the analysis of the pumping tests, where special correction procedures have been introduced. They can therefore be regarded as area values and as rock mass permeability. The transmissivity of the Luxembourg sandstone in Trois Ponts is $T_{\text{li2-TP}}=1,4-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ and the storage coefficient $S=3,1 \cdot 10^{-4}$. With the help of the barometric coefficient an (storage-) effective void ratio fraction of 22% was determined from the elastic properties of this confined aquifer. The transmissivity respectively the permeability of the "leaky" overlying stratum is, for a vertically oriented flow, $T_{(\text{li3}) \rightarrow \text{v}}=1,2-2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ or $k_{f(\text{li3}) \rightarrow \text{v}}=1,5-2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}/\text{sec}$. The leakage properties are described by a so-called leakage factor of 911 m resp. 651 m. The hydraulic conductivity of the aquitard was fixed at $1,9-3,3 \cdot 10^{-9} (\text{m}^2/\text{sec})\text{m}^{-2}$ and the hydraulic resistance against vertical seepage at 78-137 years. The rock permeability of the aquitard is, at $k_{f(\text{li3})}=1,4-2,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}/\text{sec}$, one power below the rock mass permeability from the pumping test.

Examination of the two sites from a regional point of view shows clearly structured, overall uniform geological areas, whose hydrological and hydrogeological elements are in harmony with the geological-morphological units of the western Gutland.

The results of the present detailed hydrogeological investigations show that, in spite of the specifically conducted, intensive and meticulous data collection and specifically adapted correction procedures, the detailed recording and disintegration of the (individual) groundwater systems and their components is only successful to a limited extent. The relevant procedures were employed to the limit of their usability or informativeness and checked against one another.

Any subsequent tests and data collections specifically conducted on the basis of the present investigations promise to strengthen the synthesis set up. It would appear essential to set them in the context of regional and supra-regional framework data.

Synthèse

Les disponibilités en eaux souterraines des sites Koerich et Trois Ponts sont liées à des structures tectoniques spécifiques; elles peuvent être considérées en première approche comme liées à des systèmes indépendants. Des communications hydrogéologiques s'opèrent entre les deux sites à travers la formation du Grès de Luxembourg, le transfert se fait essentiellement par un réseau de fracturation commun rendant nécessaires des considérations systématiques parallèles. Les deux sites ont été étudiés du point de vue de leurs composantes singulières de manière très différenciée. Ils restent pour le moment, même en les considérant en tant que système global, isolés, sans possibilités de les comparer ou de les inclure dans le cadre de données régionales ou sur-régionales.

La situation de la vallée de l'Eisch et la présence du Grès de Luxembourg qui y affleure en faciès altéré ainsi que la disposition des dépressions (fonction de la structure en anticlinal et synclinal d'après LUCIUS 1948), déterminent à Koerich la localisation des sources et les disponibilités en eaux souterraines. La comparaison des précipitations avec les données hydrauliques de l'Eisch et la détermination des teneurs en isotopes stables deutérium et oxygène-18 sur les précipitations actuelles de la dernière décennie indiquent une réalimentation des nappes d'eaux souterraines pendant les mois hivernaux pauvres en végétation et donc en évapotranspiration. Les précipitations actuelles des stations Trèves, Karlsruhe et Weil/Rhin montrent dans les précipitations hivernales des tendances actuelles pour les teneurs en isotopes stables. Les périodes de réalimentation des eaux souterraines analysées sont discutées sur la base du fractionnement isotopique du deutérium et de l'oxygène-18, en fonction des températures des précipitations et de la combinaison de ces dernières données avec des âges évalués d'après modélisation. Le réservoir d'eau souterraine de Trois Ponts a pu être rempli, suivant ces considérations, au cours du Subatlantique. On peut admettre, pour les eaux souterraines du site Koerich, qu'une infiltration a eu lieu dès la fin du Subatlantique. Les eaux souterraines des sites Schaedhaff (Grès de Luxembourg sous couverture) et Everlange (aquifère du faciès gréseux, appelé faciès de bordure du Trias) peuvent également être affectées dans ce cadre temporel et climatique. Les eaux souterraines du puits Sidor (aquifère du Grès de Luxembourg sous couverture, profondeur 196-276 mètres) analysées à des fins de référence, participent à l'écoulement souterrain, suivant les hypothèses admises, dès la fin du Pléistocène.

L'écoulement d'étiage (NNQ) de l'Eisch est, dans le secteur considéré, déterminé par des transferts d'eaux souterraines (effluents). L'écoulement superficiel et l'écoulement souterrain constituent dans ce domaine des systèmes indépendants, en contact à travers une zone d'infiltration située dans la vallée de ce cours d'eau. Entre 1% et 10% du NNQ peuvent par un début de "leakage" alimenter les eaux souterraines. L'écoulement de l'eau souterraine se fait principalement, et contrairement à ce qu'on a pu déduire initialement des structures d'altération du Grès de Luxembourg, à travers le réseau de diaclases. Des influences d'une porosité en petit, hétérogène, ou d'une double porosité ne se remarquent pas. Les perméabilités de fissuration, déterminées dans le domaine de l'anticlinal principal *Koerich-Simmern-Ditzebierg* sont pour les réseaux de fissuration prédominants, réseau de fissuration principal (HKR) et le réseau de fissuration transversal (QKR), $T_{HKR-K}=0,12-0,18 \text{ m}^2/\text{sec}$ respectivement $T_{QKR-K}=4,5 \cdot 10^{-3} - 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$. Des écarts locaux, parfois importants par rapport aux valeurs moyennes, sont dus à des remplissages secondaires des systèmes de diaclases par des résidus d'altération sablo-calcaireux ou mêmes à des colmatages constitués par du matériau marno-calcaireux. L'anisotropie est compensée par la valeur régionale intégrée de $T_{i2-K}=4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$

et un coefficient d'écoulement moyen souterrain de $1,3-1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Les niveaux des nappes d'eaux souterraines sont déterminés et alignés de trois côtés par et vers la zone de fissuration. L'échange et le mouvement de transfert d'eau souterraine est en direction de l'allongement de la dépression environ 4 fois plus grand que l'apport latéral. Ceci permet d'estimer l'importance de cette zone de dépression pour le régime d'écoulement souterrain régional.

L'écoulement souterrain du site de Koerich est décrit à l'aide du tritium comme un "système de mélange à 3 composantes". Les composantes du mélange ne contiennent pas de tritium soit des teneurs en tritium fonction de l'input actuel, dans ce dernier cas elles montrent encore, suivant les conditions de réalimentation, des influences de la pointe de tritium anthropogénique (bombes) du début des années 60. L'utilisation des modèles dits à "lumped parameter" permet, en utilisant la technique de traçage et le marquage artificiel de l'atmosphère et de l'hydrosphère par du tritium provenant des tests atomiques, de calculer des temps de séjour moyen. Les eaux de source et les eaux souterraines bien mélangées de la vallée de l'Eisch présentent des temps de séjour moyen, variant entre 14 et 20 ans. Le temps de séjour moyen est fonction du temps de séjour de toutes les fractions qui constituent l'eau souterraine et ses mélanges. Ainsi ont été calculées par programme d'ordinateur, suivant les présentations du modèle, les proportions de groupes de séjour ($< 1a$; $1-10a$; $10-20a$; $20-40a$ $> 40a$) constituant le temps moyen de séjour. Les eaux souterraines des parties les plus profondes de la structure synclinale montrent, avec des faibles teneurs en tritium et des temps de séjour moyens calculés par modèle et variant entre 150 et 425 ans, des transitions vers les eaux exemptes de tritium de Trois Ponts. La combinaison des teneurs en tritium avec des données hydrochimiques (teneurs en Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) permettent de définir à Koerich des lignées de mélange d'eaux souterraines et de montrer des influences anthropogènes. Les eaux souterraines superficielles à Koerich et les eaux profondes de Trois Ponts forment les termes extrêmes des mélanges, des passages entre ses deux termes sont visualisés clairement sur les diagrammes long de droites de mélanges. Des modifications locales induites par les prises d'eaux souterraines sont également reconnues.

Les eaux souterraines du Grès de Luxembourg de Trois Ponts sont réduites (chimique) et libres en tritium; ainsi les âges des modèles et les temps de séjour dans le sous-sol sont évalués par l'application de la méthode de carbone radioactif (méthode ^{14}C). La prise en considération de la partie hydrosphère du cycle du carbone est déterminante pour l'application de cette méthode pour la résolution de problèmes hydrogéologiques. Les processus d'échange naturel de carbone demandent l'application de procédés de correction qui ont été réalisés soit par chemin hydrochimique à l'aide du modèle de mélange chimique, soit à partir du modèle de mélange isotopique à l'aide des teneurs en ^{13}C . Les âges des eaux souterraines établis suivant le modèle utilisé varient pour les eaux de l'aquifère du Grès de Luxembourg à Trois Ponts en moyenne entre 500 et 3300 ans, il est à noter que des tolérances importantes doivent être considérées pour âges jeunes de quelques centaines d'années déterminées par cette méthode. Les teneurs en ^{14}C sont dans la couverture à caractère "leaky" et de nature marno-calcaireuse, suite aux processus d'échange, si faibles ou même plus déterminables, que des âges de modèles d'eau souterraine de plus de 32000 ans en découlent. L'influence de ces eaux sous forme de contribution de drainage descendante (leakage) sur l'âge de l'eau souterraine du Grès de Luxembourg est discutée du point de vue d'un vieillissement apparent et ce en combinaison avec des données hydrauliques. L'évolution des eaux souterraines échantillonnées vers des temps de séjour plus longs suite à un échange augmentant est visualisée dans ce contexte. Les eaux souterraines du puits Sidor présentent des temps de séjour de 24000 ans. Elles sont présentées comme vieilles et

isotopiquement bien maturées, la plus large partie des teneurs en ^{14}C primaire sont déjà échangées par du carbone de la matrice rocheuse exempte de ^{14}C . En plus un important échange ionique s'y est opéré également.

Les études hydrauliques décrivent l'état naturel et non dérangé de la nappe souterraine à Trois Ponts; la nappe présente une limite de bassin versant souterrain, dont la surface piézométrique accuse une faible pente ($i=0,08\%$) dirigée vers le N vers la vallée de l'Eisch et vers le SE vers une zone de fracturation sur-régionale. L'écoulement naturel de l'eau souterraine présente sous ces conditions une vitesse moyenne d'écoulement de 2,3 m/an ce qui correspond à un volume d'écoulement de $1,5-1,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$, représentant 59-67% de la précipitation moyenne et long terme de 792 mm/m². L'exploitation des essais de pompage montre que l'influence du leakage doit être considérée obligatoirement et ceci tant lors de l'interprétation des données de rabattement que de remontée. A l'aide de ces données on peut évaluer, dans des conditions de repos de la nappe un leakage naturel de $2,6-4,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ correspondant à environ 10-18% de la précipitation moyenne à long terme. Cette infiltration à partir des marnes et calcaires sus-jacentes à l'aquifère du Grès de Luxembourg présente environ 13-31% de l'écoulement naturel. La prise en considération d'un état stationnaire de la nappe, qui s'établit après des pompages d'eaux souterraines prolongés, a conduit, dans le cas de l'essai de pompage I d'environ 200 m³/h ($Q_{(\text{Trois Ponts})\text{max.}}=420 \text{ m}^3/\text{h}$) à la définition d'un rayon d'influence moyen d'environ 1500 mètres. Il apparaît dans ce cône de rabattement des apports par percolation de 0,06 à 0,106 m³/sec, soit 220 à 380 m³/h conduisant apparemment à une équilibration du bilan. Les méthodes isotopiques montrent des variations, tant de rajeunissement que de vieillissement, dans les âges modèles des eaux pompées sur la période de prélèvement allant de 400 à 1000 ans. On peut calculer pour la durée des essais de pompage à l'aide de la perméabilité par fissuration sur la base des conditions d'écoulement stationnaires des distances de transport de 600 à 2600 mètres, lesquelles se situent de nouveau dans les limites de variance des cônes de rabattement évalués. Les perméabilités de fissuration efficaces déduites, correspondent bien, en considérant les précisions possibles, avec les perméabilités de la direction de fissuration principale de Koerich. Les relevés de variations piézométriques lors des essais de pompages, les profils de températures d'eaux spécialement adaptés ne montrent pas d'indication de perméabilités de fissuration anisotropiques. Les profils de température de l'eau souterraine montrent des gradients différents, fonction de la profondeur et de la lithologie des couches traversées. Ils se modifient avec le flux d'eau et caractérisent les conditions d'écoulement stationnaires et permettent donc une description zonaire semi-quantitative de l'écoulement. Les constantes hydrogéologiques utilisées lors du calcul des perméabilités de fissures ont été évaluées par l'exploitation des données des essais de pompages, des méthodes de correction spéciales y ont été introduites. Elles peuvent ainsi être considérées comme constantes régionales et caractériser la perméabilité en grand des massifs rocheux (Gebirgsdurchlässigkeit). La transmissivité du Grès de Luxembourg à Trois Ponts est évaluée à $T_{\text{li2-TP}}=1,4-1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ et le coefficient d'emmagasinement $S=3,1 \cdot 10^{-4}$. Les coefficients barométriques ont permis de calculer à partir des propriétés élastiques de l'aquifère sous pression une porosité efficace de 22%. La transmissivité et le coefficient de perméabilité des couches à caractère "leaky" sus-jacentes sont, pour un transfert vertical $T_{(\text{li3}) \rightarrow \text{v}}=1,2-2,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ respectivement $k_{f(\text{li3}) \rightarrow \text{v}}=1,5-2,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}/\text{sec}$. Les conditions de leakage sont décrites par un facteur de leakage de 911 respectivement 651 mètres. La conductivité hydraulique de l'aquitard est évaluée à $1,9-3,6 \cdot 10^{-9} (\text{m}^2/\text{sec})\text{m}^{-2}$ tandis que la résistance hydraulique au transfert vertical est déterminée à 78-137 ans. La perméabilité en petit (Gesteinsdurchlässigkeit) de l'aquitard se présente avec

$k_{f(li3)} = 1,4-2,0 \cdot 10^{-9}$ m/sec, en valeur elle se situe une potence inférieure au coefficient de perméabilité en grand évalué par les essais de pompage.

L'observation des deux sites d'un point de vue régional, montre des unités géologiques globalement homogènes. Les éléments hydrauliques et hydrogéologiques sont en concordance avec les entités géologiques et géomorphologiques de l'ouest du Gutland.

Les résultats des présentes études hydrogéologiques de détail montrent qu'on ne peut pas, malgré une collecte de données spécifiques, réalisée de manière intensive et avec soin, et malgré l'application de méthodes de corrections spécifiques, augmenter au-delà d'un certain degré la précision, la description et les renseignements relatifs aux différents systèmes d'eaux souterraines et de leurs composantes. Les procédés mis en oeuvre ont été utilisés jusqu'au limites de leurs domaines d'application et d'affirmation et ont été contrôlés réciproquement.

De futurs essais et collectes de données qui seront réalisés, le cas échéant, ultérieurement et sur la base de la présente étude promettent une consolidation de la synthèse émise. L'ajustement par des données régionales et sur-régionales semble alors indispensable.

traduit en français par R. Maquil

Literaturverzeichnis

- BALL, J.W. & NORDSTROM, D.K. (1992): User's manual for WATEQ4F with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major trace and redox elements in natural waters; U.S. Geol. Survey.
- BAUMEISTER, G. (1979): Geologische Untersuchungen im Gebiet von Saeul (Luxemburg).- Dipl.-Arbeit Univ. Bonn; 85 S., 33 Abb., 16 Tab., 4 Anl.; Bonn.
- BERG, D. (1965): Die Klüfte im Paläozoikum und Mesozoikum von Luxemburg und der westlichen Eifel. Ihre Beziehung zur allgemeinen Tektonik und ihr Einfluß auf das Gewässernetz.- Publ. Serv. Géol. Lux.; XVI: 89 S., 9 Taf.; Luxemburg.
- BERNERS, H.-P., BOCK, H., COUREL, L., DEMONFAUCON, A., HARY, A., HENDRIKS, J.F., MÜLLER, E., MULLER, Ad., SCHRADER, E., WAGNER, J.F. (1984): Vom Westrand des Germanischen Triasbeckens zum Ostrand des Pariser Lias-Beckens: Aspekte der Sedimentationsgeschichte.- Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver.; N.F.66: 357-395, 14 Abb., 1 Tab., 3 Taf.; Stuttgart.
- BINTZ, J. (1965): Les possibilités de renforcement de notre alimentation en eau par forages-captages d'eau souterraines.- Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois; No. 70; Luxembourg.
- & MULLER, Ad. (1966): Sur la représentation du «Grès de Luxembourg» sur la nouvelle carte géologique général du Grand-Duché.- Arch. Inst. Gr.-Duc. Lux., Sect. Sci. nat. phys. et math.; 31: 241-258 ; Luxembourg.
- , MULLER, Ad., et al. (1970): Contribution à la Connaissance du Lias inférieur au Grand-Duché de Luxembourg.- Publ. Serv. Géol. Lux.; XX: 128 p.; Luxembourg.
- , GUERIN-FRANIATTE, S., MOUTERDE, R., MULLER, Ad. (1970): Résultats des recherches géologiques faites sur la tranchée du S.E.B.E.S. Tronçon Eschdorf - Nospelt, Nospelt - Rébierg, Nospelt - Bridel.- in BINTZ, J. & MULLER, Ad. et al. (1970): Contributions a la Connaissance du Lias inférieur au Grand-Duché de Luxembourg.- Publ. Serv. Géol. Lux.; XX: 1-83, 8 fig., 5 planches; Luxembourg.
- , HARY, A., MULLER, Ad. (1973): Luxembourg.- in: Guides géologiques régionaleaux: Ardenne/Luxembourg: 135-202, 42 fig.; Paris (Masson).
- , MULLER, Ad., HARY, A. (1976): Exkursion in Luxemburg am 23./24. April 1976 (Exkursion D, 2. Teil).- Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver.; N.F.58, 45-58, 6 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- & MAQUIL, R. (1984): Hydrogeologie in Luxemburg (Exkursion J am 28. April 1984).- Jber. u. Mitt. oberrhein. geol. Ver.; N.F.66: 129-135, 2 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- BÖTTCHER, J., STREBEL, O. & KÖLLE, W. (1992): RedOx Conditions and Microbial Sulfur Reactions in the Fuhrberger Feld Sandy Aquifer.- in: MATTHESS et al.: Progress in Hydrogeochemistry- Organics-Carbonate Systems - Silicate Systems - Microbiology-Models.- (83 Autoren): S. 219-226; (Springer-Verlag) London, Paris.
- BOULTON, N.S. (1963): Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage.- Proc. Inst. Civ. Eng.; vol. 26: 469-482.
- (1964): Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage: a discussion.- Proc. Inst. Civ. Eng.; vol. 28: 603-610.

- BRAUNS, J. & GOTTHEIL, K.-M. (1989): Anmerkungen zur Absenkungswirkung von Mehrbrunnenanlagen.- *Wasserwirtschaft*; **79** (1989)9: S. 464-469, 7 Abb..
- CHOW, V.T. (1952): On the determination of transmissivity and storage coefficients from pumping test data.- *Am. Geophys. Union Trans.*; **vol. 33**: 397-404; Washington.
- CLARK, W.E. (1967): Computing the barometric efficiency of a well.- *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*; **HY 4**: 92-98, 3 Abb., 1 Tab.; (Ann Arbor) New York.
- COOPER, H.H. & JACOB, C.E. (1946): A generalised graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history.- *Am. Geophys. Union Trans.*; **vol. 27**: 526-534, 5 Abb., 1 Tab.; Richmond.
- DARCY, H. (1856): *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*.- 592 p.; Paris (Victor Dalmont).
- DÉSIRÉ-MARCHAND, J. (1985): Notice de la Carte Géomorphologique du Grand-Duché de Luxembourg.- *Publ. Serv. Géol. Lux.*; **Bull. No 13/1985**: 45 p., 10 fig.; Luxembourg .
- de WIEST, R.J.M. (1966): On the Storage Coefficient and the Equations of Groundwater Flow.- *Journ. Geophys. Res.*; **vol. 71**: 1117-1123; Washington D.C..
- DIETZ, D.N. (1943): De toepassing van infloedsfuncties bij het berekenen van de verlaging van het groundwater tengevolge van wateronttrekking.- *Water*; **vol. 27, no. 6**: 51-54.
- DIN (4049 Teil 1 (1979)): Hydrologie - Begriffe, quantitativ; (Entwurf Dez. 1989: Teil 5 unterirdisches Wasser).- Normenausschuß Wasserwesen NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Teil 1: (Beuth) Berlin, Köln; Entwurf Teil 5: DIN, Berlin.
- DITTRICH, D. (1984): Erläuterungen zur geologischen Karte von Luxemburg 1:25000 Blatt Nr. 8 Mersch.- *Publ. Serv. Géol. Lux.*; **XXV**: 96 S., 29 Abb., 1 Tab., 3 Taf.; Luxemburg.
- (1989): Beckenanalyse der Oberen Trias der Trier-Luxemburger Bucht - Revision der stratigraphischen Gliederung und Rekonstruktion der Paläogeographie.- *Publ. Serv. Géol. Lux.*; **XXVI**: 223 S., 39 Abb., 6 Tab., 11 Taf.; Luxemburg.
- DÜRBAUM, H.-J. (1967): Zur Bestimmung der Transmissivität von Lockergesteins-Grundwasserleitern aus Pumpversuchen.- *Mémoires I.A.H. Congress 1965*; **Vol. VII**, S. 65-68; Hannover
- (1968): Auswertung hydrologischer Pumpversuche.- *bbr*; **19**: 427-433.
- (1969): Durchlässigkeitsbeiwert von Lockergesteinen und seine Bestimmung.- Kap.6.11 in: W. RICHTER & R. WAGER: *Hydrogeologie* in: BINTZ & MARTINI: *Lehrbuch der Angewandten Geologie*: **Bd. II/2**, S. 1474-1514; Stuttgart, Enke.
- (1973): kf-Wert-Bestimmungen aus Pumpversuchen unter nichtstationären Bedingungen.- in : SCHNEIDER, H.: *Die Wassererschließung*.- 693-711, 19 Abb.; (Vulkan-Verlag) Essen, Neuauflage (1988).
- , MATTHESS, G., RAMBOW, D. (1969): Untersuchungen der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit des Buntsandsteins in Nordhessen.- *Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch.*; **97**: 258-274, 10 Abb., 4 Tab.; Wiesbaden.
- DVWK, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V..- DVWK-Schriftenreihe, **Heft 80** (1988): Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers; 322 S.; (Parey) Hamburg, Berlin.

- , Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.- DVWK-Schriftenreihe, **Heft 84** (1989): Grundwasser - Redoxpotentialmessung und Probenahmegeräte; 172 S.; (Parey) Hamburg, Berlin.
- , Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.- DVWK-Schriftenreihe, **Heft 89** (1990): Methodensammlung zur Auswertung und Darstellung von Grundwasserbeschaffenheitsdaten; 216 S.; (Parey) Hamburg, Berlin.
- , Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1992): Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben; DK 556.32001.5 Grundwasseruntersuchung, DK 543.3.053 Probenahme.- **DVWK Regeln 128/1992**, 36 S., 5 Abb., 6 Tab.; Hamburg, Berlin, (Parey).
- EICHINGER, L. (1982): Bestimmung des Alters von Grundwässern mit Kohlenstoff-14: Messung und Interpretation der Grundwässer des Fränkischen Albvorlandes.- **GSF-Bericht R 291** (Dissertation): 194 S.; München.
- & MERKEL, B. (1992): Variation of Inorganic Carbon in the Unsaturated Zone of a Carbonate Gravel System.- in: MATTHESS et al.: Progress in Hydrogeochemistry-Organics-Carbonate Systems - Silicate Systems - Microbiology-Models.- (83 Autoren): S. 139-148; (Springer-Verlag) London, Paris.
- FABER, R. (1971): Climatologie du Grand-Duché de Luxembourg.- Pub. du Musée d'Histoire Naturelle et de la Société des Naturalistes Luxembourgeois; 22 S.; Luxembourg.
- FAUTH, H. (1969): Feldmethoden der Untersuchungen.- in: A. Bentz: Lehrbuch der Angewandten Geologie: **Bd. 2.**: 1421-1426; (Enke) Stuttgart.
- FERRIS, J.G. et al. (1962): Theory of aquifer tests.- U.S. Geol. Survey; Water-Supply Paper; **1536-E**: 174 p.; Washigton.
- FONTES, J.C. & GARNIER, J.M. (1979): Determination of the initial ¹⁴C-activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach.- Water Resources Res.; **15**: 399-413.
- FRITZ, P. & FONTES, J.Ch. (1980): Handbook of Environmental Isotope Geochemistry.- **Vol. 1: The Terrestrial Environment, A**: 543 S.; Amsterdam-Oxford-NewYork (Elsevier).
- FURTAK, H. & LANGGUTH, H.R. (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen.- Intern. Assoc. Hydrogeol.; **7**: S.89-96; Hannover.
- GAT, J.R. (1980): Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Hydrology.- IAEA-Monograph.; Wien.
- GERB, L. (1953): "Reduzierte" Wässer, Beitrag zu einer Typologie bayerischer Grundwässer.- Das Gas und Wasserfach; **94**: S. 87-92 und 157-161; München.
- GEYH, M.A., ANDRES, G., BACKHAUS, G. (1986): Flächenhafte Neubildung des Grundwassers im Sandsteinkeuper durch die "leaky" Trennschicht des Feuerletten im Gebiet nördlich von Nürnberg - Isotopen-Fallstudie zum zweidimensionalen Hydraulik-Modell.- Geol. Jb.; **E42**: 3-55, 13 Abb., 8 Tab.; Hannover.
- GRINGARTEN, A.C. (1984): Interpretation of tests in fissured and multilayered reservoirs with double-porosity behavior: theory and practice.- JPT; **4**, 549-564.
- (1986): Computer-Aided Well Test Analysis.- Soc. Petrol Engineers of AIME; **SPE 14099**; Dallas, Texas.

- , BOURDET, D.P., LANDEL, P.A., KNIAZEFF, V.J. (1979): A comparison between different skin and wellbore storage type curves for early time transient analysis.- Soc. Petrol Engineers of AIME; **SPE 8205**: 16 S.; Dallas, Texas.
- GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Institut für Hydrologie (ab 1978 bis lfd.): Jahresberichte Inst. für Hydrologie (Kap. "²H-, ¹⁸O- Gehalte in Niederschlägen".- München.
- HANTUSH, M.S. (1959): Analysis of data from pumping wells near a river.- Journal of Geophysical Research; **Vol.64**: 1921-1932.
- (1964): Hydraulics of Wells.- in: V.T. CHOW (editor): Advances in Hydrosience: **Vol.1**: 281-432; (Academic Press) New York, London.
- (1966): Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers.- Journ. Geophys. Res.; **vol. 71**: 421-426, 2 Abb.
- HARY, A. & MULLER, Ad. (1967): Zur stratigraphischen Stellung des Bonebeds von Medernach (Luxemburg).- N. Jb. Geol. Paläont.; **Mh.**: 333-341, 6 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- HEBERT, D., SZYMCZAK, P., BEDNORZ, F., BRINSCHWITZ, D., JORDAN, H. (Hrsg.) (1991): Anwenderrichtlinie zur Geschützteitsbewertung von Grundwasserressourcen auf der Grundlage von Tritiumanalysen.- Bergakademie Freiberg, Inst. f. Geologie u. Angew. Physik; 30 S.; Freiberg.
- , GELLERMANN, R., JORDAN, H. (1992): Tritium als Indikator der Geschützteits von Grundwasserlagerstätten.- Neue Bergbautechnik; **22 Jg., Heft 6**: 228-231, 6 Abb..
- HÖLTING, B. (1984): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.- 370 S., 104 Abb., 27 Tab.; (Ferdinand Enke Verlag) Stuttgart, Neuauflage (1992).
- HOFEDANK, R. (1974): Untersuchungen zum Fließverhalten von Grundwasser in Lockergesteinen und klüftigem Basalt.- Gießener geol. Schriften, **6**: 173 S.; Gießen (Lenz).
- HOFFMANN, M. (1986): Hydrogeochemische Vorgänge im Aquifersystem der Dorstener Kreidemulde unter Berücksichtigung des Leakage-Phänomens.- VI+118 S.; Diss. R.W.T.H. Aachen; oder: Mitt. Ing.- u. Hydrogeol.; **25**: 112-236, 29 Abb., 4 Tab.; Aachen.
- , LANGGUTH, H.R., LARUE, J. (1986): Das Leakage - Phänomen in der Dorstener Mulde, beobachtet mit Hilfe von Multi-Level-Pegeln.- in: LANG, P.: Hommage à André Burger; compte rendu des journées de printemps du groupe suisse des hydrogéologues, mai 1986: Bulletin du centre d'hydrogéologie; **no 7 (tiré à part)**: 49-63, 5 Abb., 1 Tab.; Université de Neuchâtel, Centre d'Hydroéologie.
- HUBER, B. (1992): Der Einfluß des Trennflächengefüges auf die Grundwasserströmung in Kluffgrundwasserleitern.- Forschungsergeb. aus dem Bereich Hydrogeol. und Umwelt, Uni Würzburg; 293 S., 78 Abb., 21 Tab.; Würzburg.
- INGERSON, E. & PEARSON, F.J.jr. (1964): Estimation of age and rate of motion of groundwater by the ¹⁴C method.- Recent Researches in Fileds of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry; S. 263-283; Maruzen, Tokyo.
- IAEA (ab 1969): Environmental Isotope Data: World Survey of Isotope Concentration in Precipitation.- IAEA Sec. of Isotope Hydrology.- Techn. Rep. Ser.: Auszüge aus Meßreihen der Stationen Koblenz und Wasserkuppe/Rhön, 1974 bis 1991; Wien.

- IAEA - Publikationen mit Bezug auf Isotopenuntersuchungen zur Hydrologie in folgenden Reihen: Bibliograph. Ser.; Panel Proc. Ser.; Techn. Doc.; Techn. Rep. Ser.; Safety Ser.; Wien.
- JACOB, C.E. (1940): On the Flow of Water in an elastic Artesian Aquifer.- Trans. A. Geophys. Union; vol. 21: 574-586.
- JORDAN, H., FRÖHLICH, K., GELLERMANN, R., HEBERT, D., HEEG, W. MEINERT, N. (1988): Kosmogene Radionuklide und Grundwasserschutz.- in JORDAN, H. (Hrsg.): Freiburger Forschungshefte, C 442: Isotope und ihre Anwendung in den Geowissenschaften, in der Bergbausicherheit und im Umweltschutz - Vorträge des internat. Isotopenkolloquiums 1988 Freiberg; Freiberg.
- KÄSS, W. (1965): Sind Härtegrade entbehrlich?- Eine Anregung - Dtsch. gewässerk. Mitt.; 9,3: S. 63-64; Koblenz/Rhein.
- & SEEBURGER, I. (1989): Grundwasser - Redoxpotentialmessung und Probennahmegeräte.- DVWK, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.- Schriftenreihe DVWK, Heft 84: 172 S.; (Parey) Hamburg, Berlin.
- KLOSTERMANN, J. (1992): Das Quartär der Niederrheinischen Bucht - Ablagerungen der letzten Eiszeit am Niederrhein -.- 200 S., 30 Abb., 8 Tab., 2 Taf.; Geol. Landesamt NW, Krefeld.
- KÖLLE, W. (1982): Redoxprozesse im Grundwasserleiter.- Veröff. Lehrstuhl Wassrechemie u. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Inst./Univ. Karlsruhe; 20: S. 301-315; Karlsruhe.
- , STREBEL, O., BÖTTCHER, J. (1985): Formation of sulfate by microbial denitrification in a reducing aquifer.- Water-Supply Paper; 3, Berlin "B": S. 35-40; Washington.
- KÖNIG, C. & SCHUBERT, J. (Hrsg.) (1992): Grundwassermodelle für die Uferfiltration - Vorträge zum Kolloquium am 29. Sept. 1992 an der Ruhr-Universität Bochum.- 170 S.; Bochum.
- KRÜGER, U. (1989): Untersuchungen zur Tritium - Inputfunktion.- Dipl.-Arb. Bergakademie Freiberg.
- KRUSEMAN, G.P. & de RIDDER, N.A. (1973): Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten.- 187 S.; (Verlagsges. R. Müller) Köln, Neuauflage der engl. Ausgabe (1990).
- LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden.- 486 S., 156 Abb., 72 Tab.; (Springer-Verlag) Berlin, Heidelberg, New York.
- LANGGUTH, H.-R. & TRESKATIS, C. (1987): Umgekehrte Wasserspiegelreaktionen bei hydrologischen Pumpversuchen - der Nachweis von "NOORDBERGUM-Effekt" und einer entsprechenden Druckabnahme ("RHADER-Effekt") beim Wiederanstieg in halbgespannten Aquiferen.- bbr; 38/10: 369-376, 10 Abb., 1 Tab..
- LEGUY, C., RINDSBERGER, M., ZANGWIL, A., GAT, J.R., ISSAR, A. (1983): The relationship between the ^{18}O and Deuterium contents of rain water in the Negev Desert and air-mass trajectories.- Isotope Geoscience; vol. 1: 205-218; (Elsevier) Amsterdam.
- LÖHNERT, E.P. (1967) Grundwasser-Typen tieferer Stockwerke in Hamburg.- N. Jb. Geol. Paläont., Abh.; 129 (2): S. 113-136; Stuttgart.

- (1970) Grundwasserchemismus und Kationentausch im norddeutschen Flachland.- Z. dtsh. geol. Ges.; Sonderh. Hydrogeol., Hydrochem.; S. 129-159, Hannover.
 - (1973): Kap.: Austauschwässer.- in: SCHNEIDER, H.: Die Wassererschließung: S. 138-144, 9 Abb.; (Vulkan-Verlag) Essen, Neuauflage (1988).
- LOGAN, J. (1964): Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells.- Groundwater, vol. 2, nr. 1: 35-37.
- LUCIUS, M. (1937): Die Geologie Luxemburgs in ihren Beziehungen zu den benachbarten Gebieten.- Publ. Serv. Géol. Lux.; I: 176 S., 34 Fig.; Luxemburg.
- (1940, 1946): Carte géologique du Luxembourg.- Feuille N° 5 Redange 1:25000; Serv. Géol. Lux., Luxemburg.
 - (1948): Das Gutland. Erläuterungen zu der geologischen Spezialkarte Luxemburgs.- Publ. Serv. Géol. Lux.; V: 405 S., 30 Figuren und Photos, 4 Taf., 10 Tab.; Luxemburg.
 - (1950): Das Ösling. Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte Luxemburgs.- Publ. Serv. Géol. Lux.; VI: 176 S., 32 Fig., 50 Photos, 1 Taf., 1 Übersichtskarte, 2 Tab.; Luxemburg.
 - (1955): Beiträge zur Geologie von Luxemburg.
 - I. Die Geischichte der geologischen Erforschung Luxemburgs, 1-257; 3 Taf., 2 Fig.;
 - II. Verzeichnis der Veröffentlichungen zur Geologie von Luxemburg; 258-289;
 - III. Der Werdegang des Luxemburger mesozoischen Sedimentationsraumes und dessen Beziehung zu den hercynischen Bauelementen; 290-371, 4 Taf., 1 Fig.-
 Publ. Serv. Géol. Lux.; II: zweite umgearbeitete Auflage, 415 S., 7 Taf., 4 Fig.; Luxemburg.
 - (1959): Les faciès gréseux et conglomératique du Trias dans l'aire de sédimentation du pays de Luxembourg.- Inst. Gr. D. Luxbg. Sect. Sci. nat. phys. math. Arch.; n. Sér. 26: 246-256; Luxemburg.
- MAJEWSKI, M.S. (1990): Sources, Movement and Fate of Airborne Pesticides.- in: H. FREHSE : Pesticide Chemistry - Proceedings of the Seventh Intern. Congress of Pesticide Chemistry (IUPAC), Hamburg 1990: 307-317; VCH-Verlag.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. (1982): Determining the Turnover Time of Groundwater Systems with the Aid of Environmental Tracers.- Journal of Hydrology; 57 (1982): 207-231, 7 fig., 1 tab.; (Elsevier) Amsterdam.
- MATTHESS, G. (1970): Beziehung zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen.- Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch.; 58: 105 S., 20 Abb., 18 Tab., 4 Taf.; Wiesbaden.
- (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers.- Bd.2 aus: RICHTER, W. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie.- 324 S., 89 Abb., 86 Tab.; (Gebr. Bornträger) Berlin Stuttgart, Neuauflage (1990).
 - & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie -Grundwasserhaushalt.- Bd.1 aus: MATTHESS, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie.- 438 S., 214 Abb., 75 Tab.; (Gebr. Bornträger) Berlin Stuttgart.
 - , FRIMMEL, F., HIRSCH, P., SCHULZ, H.D., USDOWSKI, H.-E. (Eds.) (1992): Progress in Hydrogeochemistry- Organics-Carbonate Systems - Silicate Systems - Microbiology-Models.- (83 Autoren).- 544 S., 285 Fig., 108 Tab.; (Springer-Verlag) London, Paris.

- MEINERS, H.-G. (1986): Hydrogeologie und Grundwasserhaushalt im westlichen Bereich der Haltener Sande unter besonderer Berücksichtigung von Leakage.- Diss. R.W.T.H. Aachen.
- MERTENS, G. (1982): Geologische Untersuchungen im Gebiet Schoenfels - Lorentzweiler (Luxemburg).- Dipl.-Arbeit Univ. Bonn.
- Ministre de l'Amenagement du Territoire et de l'Environnement, Grand-Duché de Luxembourg (1990): Rapport d'activité 1989.- 221 S.; Service Central des Imprimés de l'État, Luxembourg.
- MOOK, W.G. (1972): On the reconstruction of the initial ^{14}C -content of groundwater from the chemical and isotopic composition.- in: T.A. RAFTER, GRANT-TAYLOR (Eds.): Proc. 8th intern. Conf. Radiocarbon Dating, Wellington, New-Zealand: 342-352.
- (1976): The dissolution-exchange model of dating groundwater with carbon-14.- in: Interpretation of Environmental and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology: 213-225; IAEA, Wien.
- MOSER, H. & RAUERT, W., mit Beiträgen von: BEHRENS, H., DROST, W., GEYH, M.A., KLOTZ, D., LORCH, S., PAHLKE, H., SEILER, K.-P., STICHLER, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.- Bd.8 aus: MATTHESS, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie.- 400 S., 227 Abb., 32 Tab.; (Gebr. Bornträger) Berlin Stuttgart.
- MÜNNICH, K.O. (1957): Messung des ^{14}C -Gehaltes von hartem Grundwasser.- Naturwiss; **Bd. 44**: 32-39.
- MULLER, Ad. & RASCHE, P. (1971): Der Luxemburger Sandstein (Hettangien) im Gebiet Syren, Munsbach, Sandweiler, Itzig, Hassel (Luxemburg).- Publ. Serv. Géol. Lux.; **Bull. No 4/1971**: 28 S., 8 Abb.; Luxemburg.
- NCRP (1979): Tritium in the environment.- NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements); **Report 62**; Washigton, D.C..
- NEUMANN-REDLIN, Ch. (1971): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Oberen Muschelkalk und Keuper Luxemburgs.- Publ. Serv. Géol. Lux.; **XXII**: 87 S., 31. Abb.; Luxemburg.
- PEARSON, F.J. jr. (1965): Use of $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -ratios to correct radiocarbon ages of materials initially diluted by limestone.- in: Proc. 6th Int. Conf. Radiocarbon Dating: 357-366; Pullmann, USA.
- PUSCH, G., ENACHESCU, C., MIEHE, R. & OSTROWSKI, L. (1991): Drill stem test analysis in the KTB-V-Well - Part 2: results of the drill stem test analyses.- Scientific Drilling; **2**: 306-318; Springer-Verlag.
- REARDON, E. & FRITZ, P. (1978): Computer modelling of groundwater ^{13}C and ^{14}C isotope composition.- Journ. Hydrology; **36**: 201-224.
- RICHTER, J. & SZYMCZAK, P. (1992): MULTIS, Ein Computerprogramm zur Auswertung isotopehydrogeologischer Daten auf der Grundlage gekoppelter konzeptioneller Boxmodelle.- Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- ROHMANN, U. & SONTHEIMER, H. (1985): Nitrat im Grundwasser - Ursachen, Bedeutung, Lösungswege.- 469 S.; DVWK-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe.

- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde.- 491 S., 220 Abb., 102 Tab.; (Enke) Stuttgart.
- SCHILDKNECHT, F. & SCHNEIDER, W. (1987): Über die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes in bindigen Sedimenten bei kleinen hydraulischen Gradienten - Stand der wissenschaftlichen Diskussion -. - Geol. Jb.; C48, 21 S., 1 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- SCHRECK, H. (1976): Ein Schüttungsmodell des Luxemburger Sandsteins in der Mulde von Weilerbach (Luxemburg). Untersuchungen der Schwermineralführung, der Schrägschichtung, des Geröllspektrums und der durch die Faktorenanalyse aufgeschlüsselten Granulometrie des Sandsteins.- Diss. R.W.T.H. Aachen: 167 S., 41 Abb., 18 Tab., 3 Taf.; Aachen.
- SCHWILLE, F. (1956): Ionenaustausch und Chemismus von Grund- und Mineralwässern.- Z. dt. geol. Ges.; 106 Teil 1: 16-22, 2 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- SCHWILLE, F. (1957): Das Härtedreieck.- Gas Wasserfach; 98 (12): 280-282, 7 Abb.; München.
- SIGG, L. & STUMM, W. (1991): Aquatische Chemie - Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und in die Chemie natürlicher Gewässer.- 388 S.; (Teubner) Stuttgart, (Verlag der Fachvereine) Zürich.
- SPIES, E.D. (1982): Geologische Untersuchungen im Raum Mersch - Lintgen (Luxemburg.- Dipl.-Arbeit Univ. Bonn; Bonn.
- STEININGER, J. (1828): Essai d'une description géognostique du Grand-Duché de Luxembourg.- Mém. Acad. roy. des Sciences et belles-lettres; t. 7; Bruxelles.
- STOBER, I. (1984): Hydrogeologische Untersuchungen in Festgesteinen Südwestdeutschlands mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- XXVII+119 S., 57 Abb., 8 Tab., Anhang mit 108 Abb., 19 Tab.; Karlsruhe.
- (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen.- Geol. Jb.; C42: 57 Abb., 8 Tab. und 38 Abb. im Anhang; Hannover.
- STRAYLE, G. (1983): Pumpversuche in Festgestein.- DVGW-Schriften; Wasser 34: 305-325, 8 Abb., 1 Tab.; Frankfurt/Main (ZfGW).
- STRUFFERT, F.-J. (1989): Diplomkartierung des Gebietes von Septfontaines (Simmern) in Luxemburg.- Dipl.-Kart. Geol.-Pal. Inst. Westf. Wilhelms-Univ. Münster: 116 S., 29 Abb., 4 Tab., 2 Karten, 1 Tafel; Münster/Westf..
- (1990): Anmerkungen zur Piezometergruppe am Standort "Trois Ponts".- (intern. Dossier zu Brunnen und Piezometer der "solution de recharge"; Serv. Géol. Lux.): 6 S., div. Anlagen; Luxemburg.
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1981): Aquatic Chemistry - An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.- 780 S.; (Wiley & Sons) New York.
- TAMERS, M.A. (1967): Surface-water infiltration and groundwater movement in arid zones of Venezuela.- Isotopes in Hydrology 1967, S.339-351; IAEA, Wien.
- (1975): Validity of radiocarbon dates of groundwater.- Geophys. Survey; 2, S.217-239.
- TAMERS, M.A. & SCHARPENSEEL, H.W. (1970): Sequential sampling of radiocarbon in groundwater.- Isotopes Hydrology 1970, S.241-256; IAEA, Wien.

- THEIS, C.V. (1935): The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.- Am. Geophys. Union Trans.; vol. 16: 519-524, 3 Abb.; Washington.
- THIEM, J. (1906): Hydrologische Methoden.- 56 S., 8 Abb.; Leipzig.
- VOIGT, H.-J. (1990): Hydrogeochemie - Eine Einführung in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers.- 310 S., 107 Abb., 115 Tab.; (Springer) Berlin, Heidelberg.
- von HOYER, M. (1971a): Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Luxemburger Sandstein.- Publ. Serv. Géol. Lux.; XXI: 61 S., 15 Abb., 7 Tab.; Luxemburg.
- (1971b): Die hydrogeologischen Untersuchungen im Wasserschutzgebiet des Syndicat des Eaux du Sud, Koerich (Endbericht Apr.1971).- Serv. Géol. Lux. und Syndicat des Eaux du Sud, Koerich: 36 S., 3 Abb.; Luxemburg.
- von WERVEKE, L. (1901): Profile zur Gliederung des reichsländischen Lias und Doggers und Anleitung zu einigen geologischen Ausflügen in den lothringer-luxemburger Jura.- Mitt. der geolog. L.A. von Els.-Loth.; Bd. 7 H. 3: 166-296; Straßburg.
- WAGNER, F.J. (1982): Stratigraphische und sedimentpetrographische Untersuchungen in der Randfazies der Trias Luxemburgs.- Diss. Univ. Innsbruck: 182 S., 58 Abb., 3 Beil.; Innsbruck.
- WESTERN EUROPEAN GEOLOGICAL SURVEYS (1992): Geology and the Environment in Western Europe.- Edited by G.I. LUMSDEN et al.; Oxford.
- WIEBEL, M. (1968): Über die Trias am Südrande der Luxemburger Ardennen.- Oberrhein. geol. Abh.; 17 (2): 165-192, 11 Abb.; Karlsruhe.
- WIGLEY, T.M.L., PLUMMER, L.N., PEARSON, F.J.jr (1978): Mass transfer and carbon isotope evolution in natural water systems.- Geochim. Cosmochim. Acta; 42: 1117-1139.
- YURTSEVER, Y. (1976): Worldwide survey of stable isotopes in precipitation. - Open File Report IAEA, Sec. of Isotope Hydrology.- Chapter proposed for IAEA-Monograph, Stable Isotopes in Hydrology (Ed.: J.R. GAT): Wien.
- ZUBER, A. (1986): Mathematical Models for the Interpretation of Environmental Radioisotopes in Groundwater Systems.- in FRITZ, R. & FONTES, J.Ch.: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2 B; 1-59, 20 fig., 3 tab.; (Elsevier) Amsterdam, Oxford, New York.

Anhang: ISOTOPEN - Daten Luxemburg

Trois Ponts / Koerich / Quellen / Eisch
Schaedhaff / Brunnen-SIDOR
Everlange / Attert / Schamicht

1., 2. und 3. Analysenschritt

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ± 0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ± 1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ± 0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
--------------	----------------	---------------------	--	--	----------------------	---	---

TPBR1		Trois Ponts					
	TPBR1	Aug.	88	-7.62		< 2.2	12.1 46.9± 0.7
Pumpversuch TP-I							
25518	TPBR1-1	03.05.90		-7.81	-54.2	< 1.0	
25519	TPBR1-3	05.05.90		-7.84			-13.63 44 ± 1
25520	TPBR1-6	27.05.90					-13.40 48 ± 3
25521	TPBR1-7	29.05.90		-7.83	-52.7	< 1.0	
Pumpversuch TP-II							
25522	TPBR1-8	10.08.90		-7.48			
25523	TPBR1-9	23.08.90		-7.85			
Betrieb							
25524	TPBR1-10	27.11.90		-7.84			
Ende solution de rechange							
30725	TPBR1-11	23.09.91		-8.16	-52.6	< 0.5	

TPBR2

Pumpversuch TP-I							
25525	TPBR2-1	03.05.90		-7.78	-51.9	< 1.2	
25526	TPBR2-3	05.05.90					-13.99 53 ± 3
25527	TPBR2-6	27.05.90					-13.65 53 ± 2
25528	TPBR2-7	29.05.90		-7.74		0.4 ± 1.2	
Pumpversuch TP-II							
25529	TPBR2-8	10.08.90		-7.79			
25530	TPBR2-9	23.08.90		-7.78			
Betrieb							
25531	TPBR2-10	27.11.90		-7.78			
Ende solution de rechange							
30727	TPBR2-11	23.09.91		-8.03	-50.7	< 0.9	

TPBR3

Pumpversuch TP-I							
25532	TPBR3-1	03.05.90		-7.84	-51.0	< 1.2	
25533	TPBR3-3	04.05.90		-7.76			-14.32 53 ± 3
25534	TPBR3-7	29.05.90		-7.80		< 0.5	-14.48 47 ± 2

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ±0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ±1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ±0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
Pumpversuch TP-II							
25535	TPBR3-8	10.08.90	-7.82				
25536	TPBR3-9	23.08.90	-7.77				
Betrieb							
25537	TPBR3-10	27.11.90	-7.83				
Ende solution de rechange							
30704	TPBR3-11	23.09.91	-8.00	-44.6	< 0.7		

TPBR4

Pumpversuch TP-I							
25538	TPBR4-1	03.05.90	-7.91	-52.0	< 1.5		
25539	TPBR4-3	04.05.90	-7.90			-13.09	38 ± 2
25540	TPBR4-6	28.05.90				-13.18	40 ± 2
25541	TPBR4-7	29.05.90	-7.88		< 1.3		
Pumpversuch TP-II							
25542	TPBR4-8	10.08.90	-7.92				
25543	TPBR4-9	23.08.90	-7.84				
Betrieb							
25544	TPBR4-10	27.11.90	-7.91				
Ende solution de rechange							
30705	TPBR4-11	23.09.91	-8.12	-51.3	< 1.0		

TPBR5

	TPBR5	Aug. 88	-7.47			-12.2	53.6 ± 0.8
Pumpversuch TP-I							
25545	TPBR5-1	03.05.90	-7.81	-52.2	< 1.7		
25546	TPBR5-3	04.05.90	-7.64			-14.03	48 ± 2
25547	TPBR5-6	28.05.90				-13.77	51 ± 2
25548	TPBR5-7	29.05.90	-7.79		< 1.6		
Pumpversuch TP-II							
25549	TPBR5-8	10.08.90	-7.80				
25550	TPBR5-9	23.08.90	-7.83				
Betrieb							
25551	TPBR5-10	27.11.90	-7.33				
Ende solution de rechange							
30713	TPBR5-11	23.09.91	-8.07	-41.1	< 1.5		

TPPz1

Ruhezustand							
25552	TPPz1-a	25.04.90	-8.17				
Pumpversuch TP-I							
25553	TPPz1-2	07.05.90	-8.11				
25554	TPPz1-3	28.05.90	-7.96				

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ± 0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ± 1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ± 0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
--------------	----------------	---------------------	--	--	----------------------	---	---

TPPz2

Ruhezustand							
25555	TPPz2-a	25.04.90	-7.83				
Pumpversuch TP-I							
25556	TPPz2-2	06.05.90	-7.79				
25557	TPPz2-3	27.05.90	-7.83				

TPPz3

Ruhezustand							
25558	TPPz3-a	24.04.90	-7.84				
25559	TPPz3 ???	27.04.90					keine Probe
Pumpversuch TP-I							
25560	TPPz3-2	07.05.90	-7.83				
25561	TPPz3-3	28.05.90	-7.83				
25562	TPPz3 ??	29.05.90	-7.80				keine Probe

TPPz4

Ruhezustand							
25563	TPPz4-a	25.04.90	-7.79				
Pumpversuch TP-I							
25564	TPPz4-2	06.05.90	-7.83				
25565	TPPz4-3	27.05.90	-7.81				

TPPz5

Ruhezustand							
25566	TPPz5-a	24.04.90	-7.73	-51.5	< 1.7	-14.65	29 ± 3
Pumpversuch TP-I							
25567	TPPz5-2	07.05.90	-7.75		< 1.6		
25568	TPPz5-3	29.05.90				-13.85	47 ± 2
Ende solution de recharge							
30723	TPPz5-4	23.09.91	-7.80	-52.1	< 0.7		

TPPg

Ende Pumpversuch TP-I							
25593	TPPg16	30.05.90	-7.89	-52.9	0.4 ± 1.0		
25594	TPPg35	30.05.90	-8.24	-55.8	0.7 ± 1.4		
Ende solution de recharge							
30708	TPPg16-2	24.09.91	-7.86	-52.3	< 1		
30711	TPPg35-2	24.09.91	-8.39	-56.4	1.5 ± 0.8		
30710	TPPg50-2	24.09.91	-8.13	-54.9	7.0 ± 1.1		
Normalbetrieb der Anlage							
38450	TPPg16-3	07.08.92	-7.85	-51.7	0.6 ± 1.0	-12.05	20 ± 2
38451	TPPg35-3	07.08.92	-8.35	-57.0	0.5 ± 0.9	-6.13	< 3
38452	TPPg50-3	07.08.92	-8.18	-57.2	6.7 ± 1.5		

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ± 0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ± 1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ± 0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
KBR1 Koerich							
Ruhezustand vor PV TP-I							
25569	KBR1	27.04.90	-8.36	-55.9			39.5 ± 3.5
Pumpversuch K-I							
25570	KBR1-1	28.08.90	-8.35				
Pumpversuch K-II							
25571	KBR1-2	16.10.90	-8.36				35.2 ± 3.2
25572	KBR1-4	06.11.90	-8.37				40.0 ± 3.1
Ende solution de rechange							
30715	KBR1-5	23.09.91	-8.74	-51.6			35.9 ± 2.5

KBR2

Ruhezustand vor PV TP-I							
25573	KBR2_1	19.05.90	-8.31	-55.6			35.1 ± 2.8
25574	KBR2_2	19.05.90	-8.22				
25575	KBR2_3	19.05.90	-8.21				
Pumpversuch K-I							
25576	KBR2-1	28.08.90	-8.32				
Pumpversuch K-II							
25577	KBR2-2	16.10.90	-8.34				35.7 ± 2.8
25578	KBR2-4	06.11.90	-8.14				39.5 ± 3.5
Ende solution de rechange							
30716	KBR2-5	23.09.91	-8.68	-57.3			32.7 ± 2.3

KBR3

Pumpversuch K-I							
25579	KBR3-1	28.08.90	-7.92				7.0 ± 2.0
Pumpversuch K-II							
25580	KBR3-3	16.10.90	-7.88				6.1 ± 1.8
25581	KBR3-11	06.11.90	-7.87				9.6 ± 2.1
Ende solution de rechange							
30717	KBR3-12	23.09.91	-8.30	-54.7			9.8 ± 0.8

KBR4

Ruhezustand vor PV TP-I							
25582	KBR4	28.04.90	-8.27	-53.1	< 1.0		
Pumpversuch K-I							
25583	KBR4-1	28.08.90	-8.25				
Pumpversuch K-II							
25584	KBR4-3	16.10.90	-8.28				1.0 ± 1.3
25585	KBR4-5	06.11.90	-8.23				3.0 ± 1.9
Ende solution de rechange							
30719	KBR4-6	23.09.91	-8.64	-57.4			4.5 ± 1.1

Labor Nr.	Prob.-bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ±0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ±1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ±0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
-----------	------------	------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	----------------------	--------------------------------------	---

Eisch

vor PV TP-I							
25586	Eisch-04	28.04.90	-7.90	-51.9	27.0 ± 3.2		
Pumpversuch K-I							
25587	Eisch-08	28.08.90	-8.12	-53.2	31.0 ± 3.2		
Pumpversuch K-II							
25588	Eisch-11	06.11.90	-8.02	-52.8	22.3 ± 2.8		
Ende solution de rechange							
30718	K-Eisch	23.09.91	-8.47	-56.7	30.8 ± 2.2		

Quellen

Begin Pumpversuch TP-I							
25589	Qu10	10.05.90	-7.93	-53.8	20.0 ± 2.2		
25590	Qu11	10.05.90	-8.31	-56.0	36.4 ± 3.5		
25591	Qu14	10.05.90	-8.29	-54.5	32.4 ± 3.0	-14.22	50 ± 1
Ruhezustand nach Pumpversuch K-II							
25592	QuLauterb	28.11.90	-8.52	-56.7	42.7 ± 3.0		
Ende solution de rechange							
30722	K-Peiffer	23.09.91	-8.61	-56.0	35.9 ± 1.8		
30721	K-Lauterb	23.09.91	-8.58	-58.0	42.2 ± 3.1		
30720	K-Wykersl	23.09.91	-8.64	-58.9	25.1 ± 2.9		
	K-Frontzenberg	23.09.91	trocken				

Quelle: Qu10 - Q-Nr.10 - Q-N°10 - K-Frontzenbiery

Quelle: Qu11 - Q-Nr.11 - Q-N°11 - K-Peiffer

Quelle: Qu14 - Q-Nr.14 - Q-N°14 - K-Wykerslooth

Quelle: K-Lauterbur

S15-1 / SBR4 Schaedhaff

Anfang solution de rechange							
30738	S15-1-3	19.06.91			19.5 ± 2.8		
Ende solution de rechange							
30714	S15-1-4	24.09.91			15.0 ± 1.8		

S15-2 / SBR3

Anfang solution de rechange							
30737	S15-2-3	19.06.91			17.2 ± 1.0		
Ende solution de rechange							
30712	S15-2-4	24.09.91			16.9 ± 1.3		

S15-3 / SPz1

Anfang solution de rechange							
30741	S15-3-3	19.06.91			14.8 ± 2.2		
Ende solution de rechange							
30707	S15-3-4	24.09.91			13.0 ± 2.0		

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ± 0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ± 1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ± 0.2	^{14}C [‰mod.]
--------------	----------------	---------------------	--	--	----------------------	---	----------------------------

S15-4 / SBR1

Anfang solution de rechange							
30740	S15-4-3	19.06.91				17.4 ± 1.2	
Ende solution de rechange							
30706	S15-4-4	24.09.91				12.2 ± 1.4	

S15-5 / SBR2

Anfang solution de rechange							
30739	S15-5-3	19.06.91				16.2 ± 1.0	
Ende solution de rechange							
30709	S15-5-4	24.09.91				15.2 ± 1.8	

BR-Sidor Brunnen - Sidor

32513	BR-Sidor	03.12.91	-9.45	-64.2	< 1.5	-10.71	<2
-------	----------	----------	-------	-------	-------	--------	----

E15-1 / EBR4 Everlange

Anfang solution de rechange							
30736	E15-1-3	19.06.91	-8.61	-42.8		1.8 ± 0.9	
Ende solution de rechange							
30742	E15-1-4	22.09.91				2.4 ± 0.9	

E15-2 / EBR3

Anfang solution de rechange							
30735	E15-2-3	19.06.91	-8.54	-41.2		8.7 ± 1.0	
Ende solution de rechange							
30728	E15-2-4	22.09.91	-8.21			8.4 ± 1.1	

E15-3 / EBR2

Anfang solution de rechange							
30734	E15-3-3	19.06.91	-8.59	-44.8		5.7 ± 0.8	
Ende solution de rechange							
30729	E15-3-4	22.09.91	-8.24			4.1 ± 0.9	

E15-4 / EBR1

Anfang solution de rechange							
30733	E15-4-3	19.06.91	-8.36	-56.2		3.7 ± 0.9	
Ende solution de rechange							
30730	E15-4-4	22.09.91	-8.20			3.7 ± 1.0	

Labor Nr.	Prob.- bez.	Datum - P.-nahme	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] ± 0.15	$\delta^2\text{H}$ [‰] ± 1.5	^3H [TU]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] ± 0.2	^{14}C [‰ _{mod.}]
--------------	----------------	---------------------	--	--	----------------------	---	---

E15-5 / EBR5

Anfang solution de rechange							
30732	E15-5-3	19.06.91	-8.45	-55.6		6.3 ± 0.8	
Ende solution de rechange							
30731	E15-5-4	22.09.91	-8.23			7.1 ± 1.1	

Attert

Ende solution de rechange							
30726	E-Attert	22.09.91	-8.19	-53.0		26.2 ± 2.0	

Schamicht

Ende solution de rechange							
30724	E-Schamicht	22.09.91	-8.26	-52.5		25.5 ± 1.6	

ISBN 2-919994-02-6