

Anwendung isopenhydrologischer Methoden bei Dichtigkeitsuntersuchungen am Windachspeicher (Oberbayern)

*Application of isotopes for the research of the imperviousness at the Windach
reservoir (Upper Bavaria)*

M. BECHT, D. RIEGER¹⁾, P. TRIMBORN & W. DROST²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	55
2. Fragestellung	57
3. Meßmethoden	58
3.1. Elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur	59
3.2. Stabile Isotope	59
3.3. Einbohrlochmethode	60
4. Ergebnisse	60
4.1. Beschaffenheit der untersuchten Wässer	60
4.2. Modellierung der unterirdischen Strömungsverhältnisse	67
5. Schlußbetrachtung	69
5.1. Repräsentativität der Untersuchungsergebnisse	69
5.2. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Dammsicherheit	69
Zusammenfassung	70
Literatur	70
Summary	71
Dank	72

1. Einleitung

Der Windachspeicher im Raum Oberfinning–Obermühlhausen (Landkreis Landsberg a. Lech/Obb.) wurde in den Jahren 1961 bis 1964 angelegt und dient seitdem als Hochwasserschutz und zur Aufbesserung von Niedrigwasserabflüssen. Er faßt bei höchstem Stauziel einen maximalen Speicherinhalt von 3,0 hm³ (BAYERISCHES LANDESAMT

¹⁾ PD Dr. M. BECHT & Dipl. Geogr. D. RIEGER, Institut für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geographie, Luisenstraße 37, D-80333 München.

²⁾ Dipl. Phys. P. TRIMBORN & Dipl. Phys. W. DROST, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Hydrologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 Neuherberg.

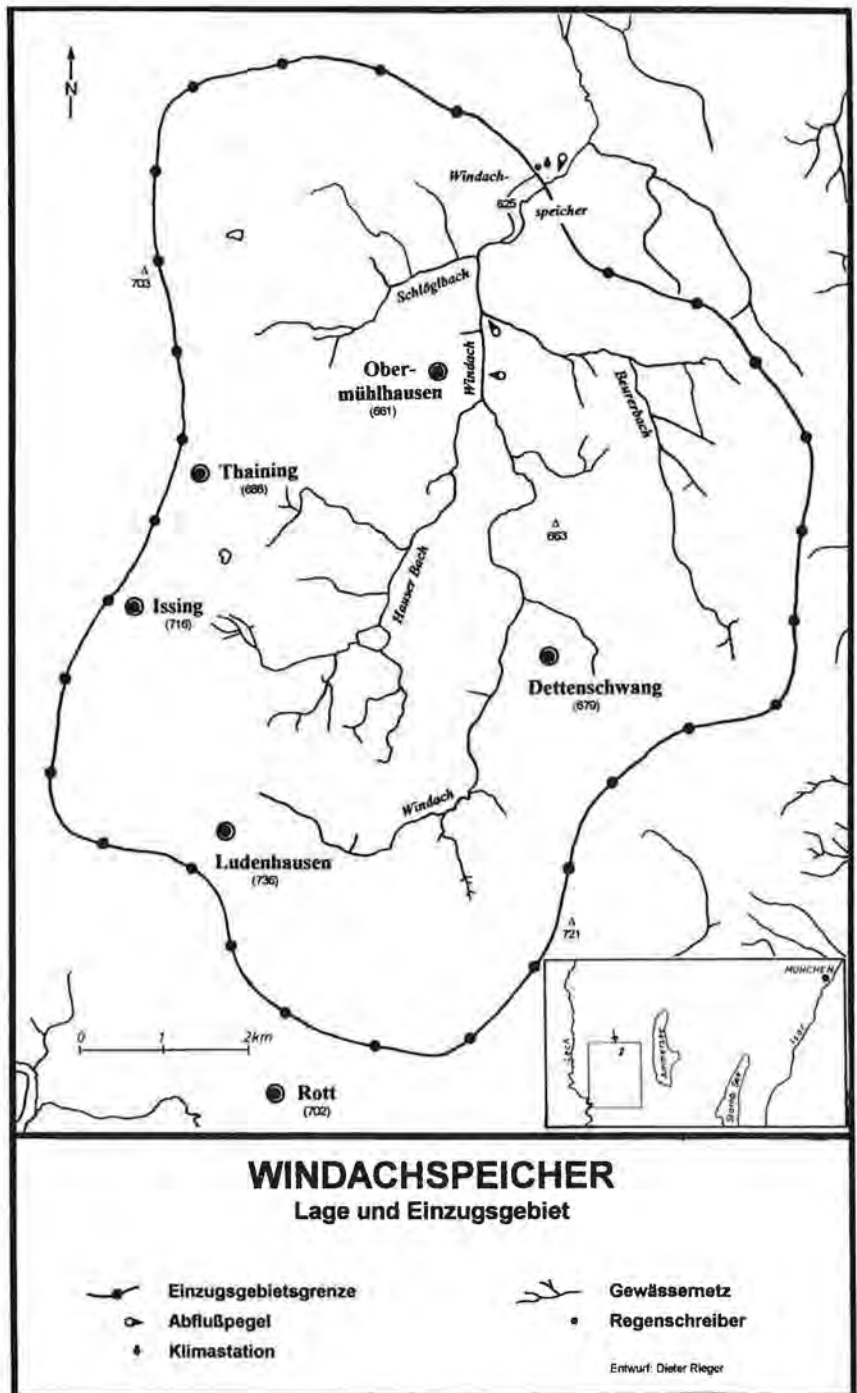


Fig. 1: Geographische Lage und Einzugsgebiet des Windachspeichers.
Location and drainage basin of the Windach reservoir.

FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1993). Die Oberfläche des Stausees beträgt dann 108 ha. Beim Dauerstauziel (625,0 m ü. NN) faßt der Speicher ein Wasservolumen von 0,34 hm³ bei einer Wasseroberfläche von 10 ha.

Das hydrologische Einzugsgebiet des Windachspeichers nimmt eine Fläche von 61,1 km² ein (Fig. 1). Es liegt ausschließlich im Bereich würmglazialer Ablagerungen, die durch den Isar-Loisach-Gletscher sedimentiert wurden.

Im Bereich des Staudammes wurde die Stratigraphie der quartären Sedimente abgeschlossen. Im Liegenden wird tertiärer Flinz vermutet, dessen Tiefe allerdings nicht bekannt ist.

Der Windachspeicher wird von der Windach und ihren Nebenbächen gespeist. Obwohl sich das Einzugsgebiet der Windach ausschließlich auf das Alpenvorland beschränkt (und nur eine Höhendifferenz von etwas mehr als 100 m aufweist), muß der Abflußcharakter als wildbachähnlich bezeichnet werden (NNQ : HHQ = 1 : 1800). Die Abflüsse reagieren unmittelbar auf Niederschläge, was sich auch auf die Schwankungen des Stauspiegels auswirkt.

Der Aufstau des Windachspeichers wird durch einen Erddamm aus bindigem Moränenmaterial ($k_f = 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) gewährleistet, der mit einem Sporn in die Talflanken hineingreift und dort zusätzlich verpreßt wurde. Unmittelbar unter der Dammkrone greift das bindige Moränenmaterial tiefer in das Anstehende ein.

Zur Sicherheitsüberwachung des Speichers wurde vom Wasserwirtschaftsamt Weilheim ein Netz von Beobachtungs- und Meßanlagen eingerichtet (Fig. 2). Es handelt sich dabei um Grundwassermessstellen und Sickerwassersammler, ergänzt durch Abflußpegelanlagen an den Zuflüssen und am Abfluß, einen Pegel, der den Stauspiegel registriert und einen Regenschreiber (Fig. 1).

2. Fragestellung

Bereits kurz nach Fertigstellung des Erddammes stellte sich an einigen Sickerwassersammlern am linken Talhang, die der Kontrolle der Durchlässigkeit des Dammes dienen, ein perennierender Abfluß von mehreren Litern pro Sekunde ein. Es konnte dabei nicht festgestellt werden, ob austretendes Wasser aus dem Speicher infiltriert oder ob vorwiegend Grundwasser vom Hang her zufließt.

Mit einzelnen Meßkampagnen wurde immer wieder versucht, die Herkunft des Sickerwassers zu klären. Da dies mißlang, sollte ein Injektionsschirm und eine Schmalwand eine vermutete Umläufigkeit verhindern. Es stellte sich allerdings keine Veränderung im Sickerwasserverhalten ein, zumal erhebliche bautechnische Schwierigkeiten auftraten.

Vermutlich konnten die Probleme in der Vergangenheit nicht gelöst werden, weil die Meßkampagnen zu kurz waren bzw. die erforderlichen Voruntersuchungen fehlten. Im Dezember 1992 wurde deshalb ein umfangreiches und breit angelegtes Meßprogramm begonnen, wobei besonders der Sickerwassersammler Rohr 0 (Fig. 2), der mit durchschnittlich mehr als $4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ am stärksten schüttet, im Mittelpunkt des Interesses stand.

Gleichzeitig sollte eine Aussage über das Gefährdungspotential getroffen werden, das bei den gegebenen unterirdischen Strömungsbedingungen für die Dammsicherheit besteht.

Die Untersuchungen wurden im April 1994 abgeschlossen.

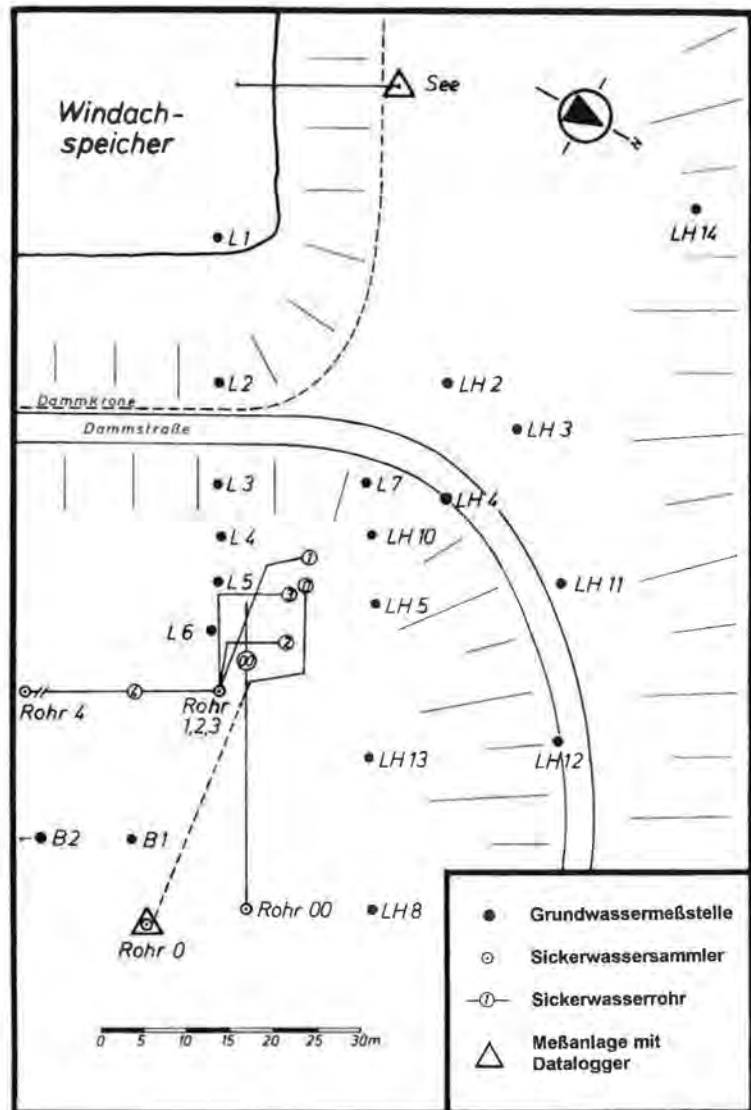


Fig. 2: Elemente des Meß- und Kontrollsystems im Bereich des linken Talbanges (von: D. RIEGER).
 Instrumentation for measuring and controlling the left slope of the valley (after D. RIEGER).

3. Meßmethoden

Zur Lösung des Problems wurden eine Reihe von Untersuchungsmethoden gewählt, die sowohl langfristige Studien als auch Einzelmessreihen umfaßten. Auf diese Weise konnten Ergebnisse gegenseitig auf ihre Plausibilität überprüft und Informationslücken geschlossen werden.

Mit Ausnahme der Einbohrlochmethode wurde ausschließlich auf Untersuchungsmethoden zurückgegriffen, die auf dem Verhalten natürlicher Tracer beruhen.

3.1. Elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur

Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur können mit geringem technischen und finanziellen Aufwand durchgeführt werden, dienen allerdings nur mit Einschränkungen als brauchbare Tracer, da sie sich bei der Untergrundpassage nicht vollständig konservativ verhalten.

Am Windachspeicher konnte allerdings nachgewiesen werden, daß bei Langzeitstudien die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur durchaus erfolgversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Differenzierung unterschiedlicher Wässer bieten können. Das bestätigen u. a. die Ergebnisse, die W. DROST (1987, 1992) bei Untersuchungen an Lechstaustufen erzielte.

Danach muß am Windachspeicher Grundwasser aufgrund der längeren Verweildauer im Substrat stärker mineralisiert sein als infiltriertes Seewasser, das schon nach kurzer Untergrundpassage wieder an den Sickerwassersammlern austritt. Gleichzeitig sollte Seewasser einen deutlich stärkeren Jahresgang aufweisen, da das Oberflächenwasser auf den schwach mineralisierten Niederschlagsinput ($5\text{--}30\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, B. HÖLTING, 1989, S. 203) rasch reagiert. Der Jahresgang der elektrischen Leitfähigkeit im Grundwasser unterliegt dagegen nur geringfügigen Schwankungen.

Ähnliches gilt auch für die Temperatur. Die Grundwassertemperatur schwankt in mehr als 15 m Tiefe nur um wenige Zehntelgrad und entspricht in etwa der Jahresmitteltemperatur der Luft. Für Mitteleuropa liegt diese bei $8\text{--}9^\circ\text{C}$ (F. WILHELM, 1993). Die Seewassertemperatur schwankt hingegen gemäß dem Jahresgang der Lufttemperatur am Windachspeicher um $20\text{--}25^\circ\text{C}$, was sich in abgeschwächter Form auch im infiltrierten Seewasser nachweisen lassen sollte.

Am Speichersee und am Rohr 0, dem am stärksten schüttenden Sickerwassersammler, wurden die Parameter elektrische Leitfähigkeit und Temperatur mit Hilfe von Dataloggern alle 15 Minuten registriert, so daß auch ereignisabhängige Schwankungen erfaßt werden konnten. An den übrigen Meßstellen im Bereich des linken Talhanges (Fig. 2) war das Meßintervall mit einem etwa einwöchigen Rhythmus deutlich länger.

3.2. Stabile Isotope

Für die vorliegende Untersuchung bot sich die Analyse der Umweltisotope ^2H (Deuterium) und ^{18}O an. Sie kommen unter natürlichen Bedingungen im Wasserkreislauf vor und verhalten sich zudem bei der Untergrundpassage konservativ.

Am Windachspeicher kann das Grundwasser in Speichernähe einmal durch infiltrierendes Seewasser, zum anderen durch infiltrierendes Niederschlagswasser gespeist werden. Der Isotopengehalt von Seefiltrat und des vom Speicher unbeeinflussten Grundwassers ist gemäß der unterschiedlichen Isotopenfraktionierung (H. MOSER & W. RAUERT, 1980) jedoch verschieden, was die Identifizierung der beiden Wassertypen an den Sickerwassersammlern ermöglicht.

^2H und ^{18}O reichern sich bei Verdunstung im verbleibenden Wasser an und bei Kondensation im zurückbleibenden Wasserdampf ab. Deshalb unterliegt der Niederschlag einer zeitlich und örtlich veränderten Isotopenzusammensetzung. Durch wiederholtes Ausregnen kommt es zu einer Abreicherung der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O im Niederschlag (Kontinentaleffekt). Die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung bedingt gleichzeitig, daß der Gehalt an ^2H und ^{18}O im Niederschlag mit der Höhe abnimmt (Höheneffekt) und einen deutlichen Jahresgang aufweist (Jahres-

zeiteneffekt; Sommermaximum und Winterminimum). Zwischen dem Gehalt an ^2H und ^{18}O im Niederschlag besteht folgende lineare Beziehung:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + d.$$

Am Windachspeicher findet über der freien Wasseroberfläche intensive Verdunstung statt, was zu einer Anreicherung der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O im Seewasser führt (Verringerung der Steigung in obiger Beziehung), die temperaturbedingt im Sommer stärker ist als in den Wintermonaten. Die ^2H - und ^{18}O -Gehalte liegen auf der sogenannten Verdunstungsgeraden deren Steigung ≈ 5 und damit < 8 ist. Im Grundwasser eines Porongrundwasserleiters treten wegen der längeren Verweildauer meist nur geringe jahreszeitliche Schwankungen im ^2H - und ^{18}O -Gehalt auf, der annähernd dem Jahresmittelwert der Isotopengehalte im Niederschlag entspricht (J. R. GAT & Y. TZUR, 1967).

Anders verhält sich die Isotopenzusammensetzung in den Grundwasservorkommen, die nicht ausschließlich vom Niederschlag erneuert werden, sondern auch mit Oberflächengewässern kommunizieren. Der Jahresgang des ^2H - und ^{18}O -Gehalts, der das Oberflächengewässer auszeichnet, findet sich dort wieder, da bei der Untergrundpassage die isotopische Zusammensetzung des Wassers nicht verändert wird. See- oder Flußinfiltrat kann daher über größere Distanzen an seinem Gehalt an stabilen Isotopen wiedererkannt werden (B. R. PAYNE, 1970, W. STICHLER & P. TRIMBORN, 1980, W. DROST et al., 1982, W. STICHLER et al., 1986).

Die Bestimmung des ^2H - und ^{18}O -Gehalts erfolgte am Windachspeicher für insgesamt acht Meßtermine zwischen Oktober 1993 und März 1994. Proben wurden aus allen Beobachtungsstellen des linken Talhanges (Fig. 2) genommen.

3.3. Einbohrlochmethode

Die Interpretation von ^2H - und ^{18}O -Gehalten, elektrischer Leitfähigkeit und Wassertemperatur wird erleichtert, wenn die Geschwindigkeit bekannt ist, mit der sich das Grundwasser oder das Seeinfiltrat bei der Untergrundpassage bewegen. Diese Geschwindigkeit ist substratabhängig und kann mit Hilfe von Einbohrlochmessungen direkt (als Filtergeschwindigkeit) gemessen werden. Die Messung erfolgt im Filterrohr von Grundwassermeßstellen, indem eine Traceronde eingeführt wird, die gleichzeitig zur Eingabe des Tracers und zur Messung dient (W. DROST & H. MOSER, 1980, W. DROST, 1984). Am Windachspeicher wurde dabei schwach radioaktives ^{82}Br (kurze Halbwertszeit von 36 Stunden) verwendet. Einbohrlochmessungen geben gleichzeitig Aufschluß über die Fließrichtung des Grundwassers. Bei den Messungen wurde darauf geachtet, die Situation am linken Talhang des Windachspeichers möglichst flächendeckend zu erfassen. Im einzelnen erfolgte die Messung in den Grundwassermeßstellen L 2, L 3, LH 2, LH 10, LH 11, LH 12, LH 13 und LH 14 im November 1993. Die Stausituation des Windachspeichers am Aufnahmetag entsprach etwa dem Dauerstauziel.

4. Ergebnisse

4.1. Beschaffenheit der untersuchten Wässer

Die ^2H - und ^{18}O -Gehalte der untersuchten Wässer liefern eine Reihe sehr guter Informationen im Hinblick auf die hydrogeologischen Beziehungen der einzelnen Be-

obachtungsstellen. Dabei stört auch der Umstand nicht, daß die Probenahme im Winterhalbjahr erfolgte (Oktober bis März), also zu einer Zeit mit einer gegenüber dem Sommer reduzierten Verdunstung über der freien Wasseroberfläche des Windachspeichers. Obwohl im Winter die Anreicherung des Wassers im Windachspeicher mit den stabilen Isotopen ^2H und ^{18}O abgeschwächt ist, reicht sie aus, um Oberflächenwasser eindeutig von unbeeinflusstem Grundwasser zu unterscheiden. Auch der Input von isotopisch „leichtem“ Niederschlagswasser im Winter wirkt sich auf die Auswertung nicht negativ aus, da die Zuflüsse des Windachspeichers, außer bei Hochwasser, nicht vom Direkt-, sondern in erster Linie vom Basisabfluß gespeist werden, dessen Isotopengehalte wiederum dem Jahresmittel des Niederschlags entsprechen (D. RIEGER, 1994).

Die isotopische Zusammensetzung verschiedener Wässer kann sehr übersichtlich anhand eines $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramms gegenübergestellt werden. Figur 3 gibt das $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Verhältnis der am Windachspeicher beprobten Meßstellen wider.

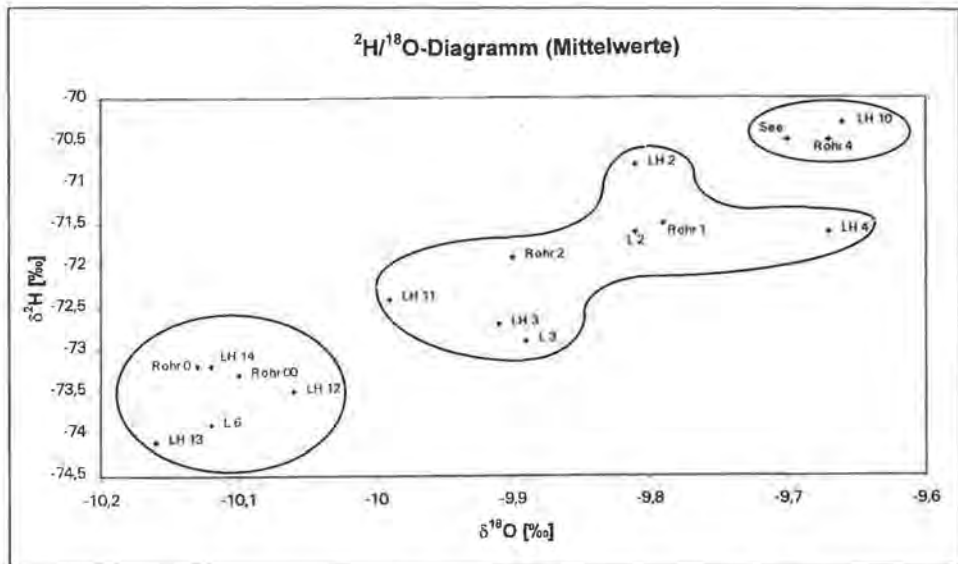


Fig. 3: $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Diagramm der mittleren Isotopengehalte des Wassers aus allen Beobachtungsstellen des linken Talhanges.
 $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ diagram with the average isotope content of the water from the observation sites at the left slope of the valley.

Betrachtet man zunächst nur die Sickerwassersammler Rohr 0 bis 4 und Rohr 00 liegt eine Einteilung in drei Wassertypen nahe. Der Isotopengehalt des Wassers aus Rohr 4 entspricht nahezu dem des Seewassers. An dieser Stelle findet also mit großer Wahrscheinlichkeit eine Infiltration von Seewasser statt. Dem entgegengesetzt ist das $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ -Verhältnis der Wässer aus den Sickerwassersammlern Rohr 0, der mit etwa $41 \cdot \text{s}^{-1}$ am stärksten schüttet, und Rohr 00: Der ^2H - und ^{18}O -Gehalt im Wasser dieser Meßstellen ist deutlich geringer als im Seewasser. Die Isotopengehalte des Wassers aus Rohr 1 und Rohr 2 liegen etwa zwischen denen des Sees und denen aus Rohr 0, nehmen also eine Mittelstellung ein.

Die Frage, ob es sich beim Wasser aus Rohr 0 und Rohr 00 vorwiegend um Grundwasser handelt, das hangseitig zufließt, kann anhand der Ganglinien der ^2H - und

^{18}O -Gehalte nahezu zweifelsfrei geklärt werden (Fig. 4). Der Isotopengehalt der Wässer aus Rohr 00 und Rohr 0 zeigt keinen sichtbaren Jahresgang. Die Werte schwanken nur geringfügig um einen Mittelwert, die Ganglinien sind sehr gedämpft. Im Gegensatz dazu schwanken die Isotopengehalte des Seewassers und des Wassers im Bereich von Rohr 4 deutlich. Die höchsten Werte treten im Oktober auf, wenn die Verdunstung vergleichsweise größer ist als im Januar und im Februar, den Monaten, in denen das Seewasser die geringsten ^2H - und ^{18}O -Gehalte aufweist. Dabei ist besonders interessant, daß zwischen Oktober und Dezember das Wasser aus Rohr 4 sogar deutlich

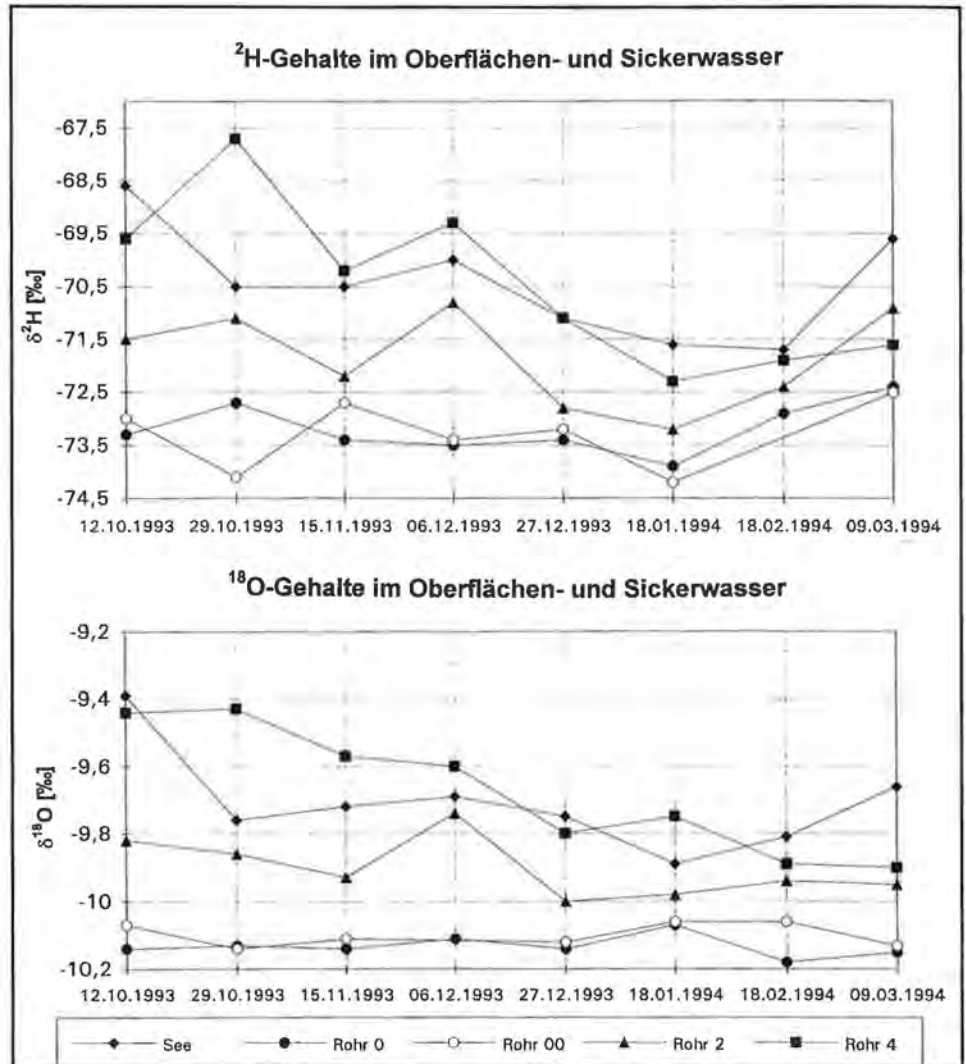


Fig. 4: Ganglinie der Deuteriumgehalte (oben) und ^{18}O -Gehalte (unten) in Oberflächen- und Sickerwasser.
Variations of the ^2H content (above) and the ^{18}O content (below) in surface and subsurface water.

höhere ^2H - und ^{18}O -Gehalte hat als das Seewasser. Das weist eindeutig darauf hin, daß im Bereich von Rohr 4 in dieser Zeit Seeinfiltrat austritt, das noch aus dem Spätsommer bzw. Herbst stammt und mit einer deutlichen Phasenverschiebung an der Meßstelle ankommt.

Würde im Bereich der Sickerwassersammler Rohr 0 und Rohr 00 Seewasser infiltrieren, müßte sich auch dort ein deutlicher Jahresgang des Isotopengehalts, ähnlich dem im Seewasser, nachweisen lassen (H. MOSER & W. RAUERT, 1980). Aufgrund der Phasenverschiebung im Isotopengehalt zwischen dem aus dem See infiltrierenden Wasser und dem am Sickerwassersammler austretenden Wasser müßten die Werte sogar noch stärker schwanken als im Seewasser und absolut höhere Isotopengehalte als das Seewasser aufweisen, da es sich dann um noch stärker angereichertes Infiltrat aus dem Sommer handeln würde. Für unbeeinflusstes Grundwasser im Bereich von Rohr 0 und 00 sprechen deren absolute Isotopengehalte, die im Mittel bei $-73,2\text{‰}$ bzw. $-73,3\text{‰}$ für ^2H und bei $-10,13\text{‰}$ und $-10,10\text{‰}$ für ^{18}O liegen. Jüngste Isotopenbestimmungen aus dem Raum Augsburg ergaben ähnliche Werte für das unbeeinflusste Grundwasser. Dies ist verständlich, da das Herkunftsgebiet des Grundwassers beider Untersuchungsgebiete vergleichbar ist.

Auch für die Grundwassermessstellen läßt sich anhand ihrer Isotopengehalte die oben genannte Dreiteilung durchführen. Es kann somit unterschieden werden zwischen:

1. unterirdischem Wasser, bei dem Seeinfiltrat überwiegt: Beobachtungsstellen Rohr 4 und LH 10;
2. unterirdischem Wasser, bei dem der Anteil an ungestörtem Grundwasser überwiegt: Meßstellen Rohr 0 und Rohr 00 sowie L 6, LH 12, LH 13 und LH 14;
3. Mischwasser mit unterschiedlichen Anteilen an Grundwasser und Seeinfiltrat: Rohr 1 und Rohr 2 sowie L 2, L 3, LH 2, LH 3, LH 4, LH 11.

Die Meßstellen Rohr 3, L 4, 5 und 7, LH 5 und 8 sowie B 1 und 2 wurden nicht in die Auswertung miteinbezogen, weil sie nur selten Wasser führten oder weil sie nicht den Anforderungen an eine Grundwassermessstelle gerecht wurden (z. B. Verschlämmung der Filterrohre).

Setzt man voraus, daß es sich bei der Meßstelle mit den geringsten Isotopengehalten (LH 13) um reines Grundwasser handelt, so lassen sich mit Hilfe einer einfachen Formel (B. HÖLTING, 1989, S. 73) die Anteile an infiltriertem Seewasser für alle Beobachtungsstellen anhand ihrer ^2H - und ^{18}O -Gehalte berechnen (Tab. 1). Auch wenn bei den beiden Berechnungen geringfügige Abweichungen auftreten, wird deutlich, daß

Tab. 1: Anteil des Seewassers (X in %) an den Wässern der einzelnen Meßstellen.
Portion of lake water (X in %) at different measuring sites.

Meßstelle	$\delta^2\text{H}$ [‰]	X [%]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	X [%]	Meßstelle	$\delta^2\text{H}$ [‰]	X [%]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	X [%]
Rohr 0	-73,2	25	-10,13	7	LH 2	-70,2	92	-9,81	76
Rohr 00	-73,3	22	-10,10	13	LH 3	-72,7	39	-9,91	54
Rohr 2	-71,9	61	-9,90	57	LH 4	-71,6	69	-9,67	100
Rohr 4	-70,5	100	-9,67	100	LH 10	-70,3	100	-9,66	100
L 2	-71,6	69	-9,81	76	LH 11	-72,4	47	-9,99	37
L 3	-72,9	33	-9,98	39	LH 12	-73,5	17	-10,06	22
L 6	-73,9	6	-10,12	9	LH 13	-74,1	0	-10,16	0
					LH 14	-73,2	25	-10,12	9

im Bereich von Rohr 0 und 00 sowie der Grundwassermeßstellen L 6, LH 12, LH 13 und LH 14 der Seewasseranteil sehr gering ist. Alle anderen Meßstellen werden zu einem beträchtlichen oder überwiegenden Teil von Seeinfiltrat gespeist.

Mischungsverhältnisse geben noch keine Auskunft über die Seewassermenge, die im Bereich der einzelnen Meßstellen auftritt, sie sind aber wichtig, um konkrete Aussagen hinsichtlich der Dichtigkeit des Erddammes zu machen. Die in Kapitel 3.3. erläuterten Einbohrlochmessungen sollen Einblick in diese Fragestellung geben.

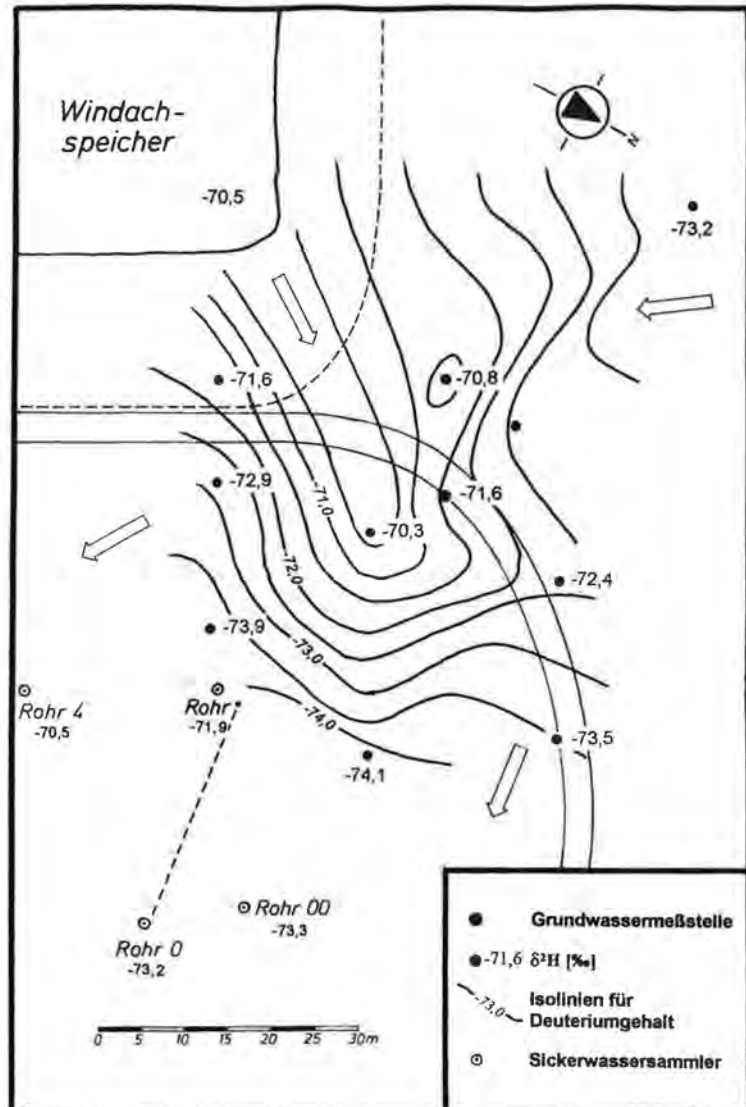


Fig. 5: Isoliniendarstellung für Deuterium (Mittelwerte). Die Pfeile geben die vermutete Strömungsrichtung des unterirdischen Wassers an.

²H isolines (averages). The arrows show the expected flow direction of the subsurface water.

Zunächst soll mit einer Isoliniendarstellung auf der Basis der Mittelwerte der in den einzelnen Beobachtungsstellen gemessenen Deuteriumgehalte ein einfaches Bild der Strömungsverhältnisse hergestellt werden (Fig. 5). Aus der Darstellung geht hervor, daß der ^2H -Gehalt des Wassers mit zunehmender Entfernung vom See abnimmt. Das spricht für einen starken hangseitigen Zustrom von Grundwasser. Die Isolinien deuten jedoch auch darauf hin, daß in unmittelbarer Nähe der Grundwassermessstelle am See Seewasser infiltriert und nach NE abfließt. Das hangseitig (etwa aus NW) zuströmende Grundwasser prägt nach kurzer Fließstrecke dem Seefiltrat seinen isotopischen Charakter auf. Dieser Umstand kann als erstes Indiz dafür herangezogen werden, daß die Leckage im Dammbereich unbedeutend ist. Im Bereich von Rohr 0 (Schüttung etwa $41 \cdot \text{s}^{-1}$) und Rohr 00 (Schüttung etwa $0,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) dominiert das Grundwasser bereits deutlich. Der Sickerwassersammler Rohr 4, der den Dammfuß drainiert, wird dagegen vorwiegend von Seewasser gespeist, weist allerdings mit etwa $0,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ einen vergleichsweise geringen Abfluß auf.

Die Ergebnisse der isotoopenhydrologischen Untersuchungen werden durch die langfristig angelegten Meßreihen der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit bestätigt. Figur 6 zeigt, stellvertretend für alle anderen Beobachtungsstellen, die Temperaturganglinien für den See und für die Sickerwassersammler Rohr 0, 2 und 4. Im Gegensatz zu den Grundwassermessstellen liefern Temperaturmessungen an den Sickerwassersammlern sehr gute Ergebnisse, weil dort ein rascher Wasseraustausch vorhanden

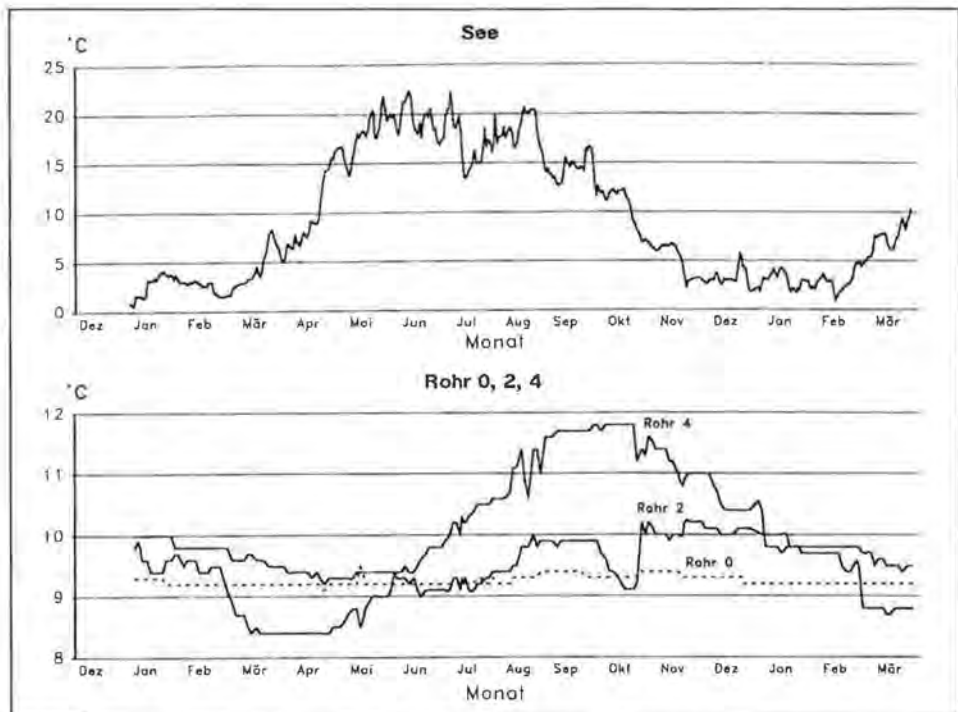


Fig. 6: Temperaturganglinien für die Beobachtungspunkte See, Rohr 0, 2, und 4 für den Zeitraum von Januar 1993 bis März 1994. (Datenquelle: Wasserwirtschaftsamt Weilheim.)
Seasonal variations of the temperature at the measuring sites "lake", "pipe 0", "2" and "4" from January 1993 to March 1994. (Data: Wasserwirtschaftsamt Weilheim.)

ist. In den Grundwasserpegeln kann eine vertikale Temperaturschichtung (in Abhängigkeit von der Lufttemperatur) auftreten, was zu einer Verfälschung der Meßergebnisse führen kann.

Im Untersuchungszeitraum betrug die Amplitude der Seewassertemperatur etwas mehr als 20°C . Dieser Temperaturgang läßt sich auch in den Sickerwassersammlern nachweisen, die nach den Ergebnissen aus der isopenhydrologischen Untersuchung überwiegend oder zu einem beträchtlichen Teil von Seefiltrat gespeist werden, wie es z. B. im Bereich von Rohr 4 und auch von Rohr 2 der Fall ist.

Mit zunehmender Dauer der Untergrundpassage tritt jedoch eine deutliche Amplitudendämpfung auf, ein Phänomen, das auch in der Literatur eingehend beschrieben wird (z. B. K. H. KLUDIG, 1970, G. MATTHESS, 1973, B. REICHERT, 1991). Gleichzeitig kommt es zu einer Phasenverschiebung der Minima und Maxima. Seefiltrat trifft demnach erst nach mehrwöchiger Verzögerung an den Sickerwassersammlern ein. Dies konnte auch durch die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeiten (Tab. 2) im Bereich des linken Talhanges mit Hilfe der Ergebnisse der Einbohrlochmessungen gezeigt werden.

Die Temperaturmessungen in Rohr 0 bestätigen, daß hier fast ausschließlich ungestörtes Grundwasser fließt. Die Wassertemperatur pendelt nur um wenige Zehntelgrad um einen Mittelwert, der mit $9,2^{\circ}\text{C}$ nahezu dem Jahresmittel der Lufttemperatur entspricht, und typisch für Quellwasser ist (F. WILHELM, 1993).

Auch die Ergebnisse der Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in Rohr 0 bestätigen eindeutig die Dominanz von unbeeinflusstem Grundwasser in diesem Bereich (Fig. 7). Während die elektrische Leitfähigkeit des Seewassers um mehr als $300\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ schwankt und besonders bei Hochwassersituationen auf die Einspeisung von schwach mineralisiertem Niederschlags- oder Schmelzwasser reagiert, treten im Bereich von Rohr 0 nur geringfügige Schwankungen auf. Die Meßergebnisse aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit für den Bereich der anderen Beobachtungsstellen bestätigen weitgehend die Aussagen, die mit Hilfe der Bestimmung der stabilen Isotope gewonnen wurden.

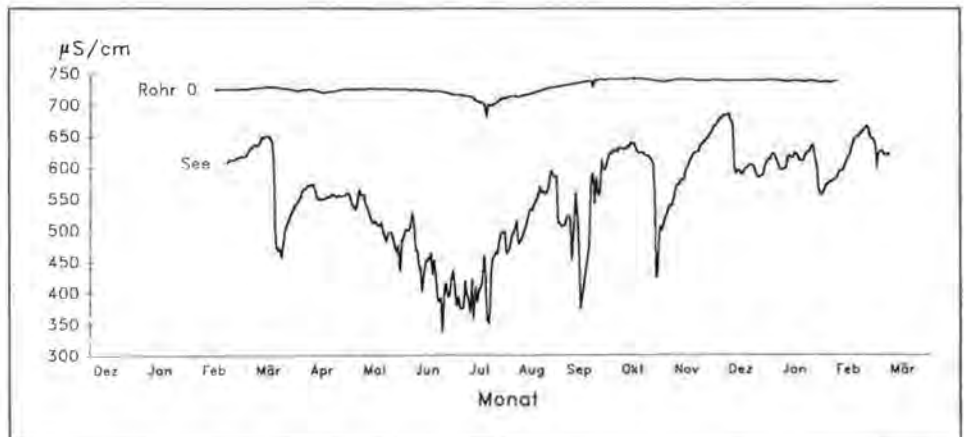


Fig. 7: Ganglinien der elektrischen Leitfähigkeit für Wasser aus dem See und aus Rohr 0 (zwischen Februar 1993 und März 1994).
Seasonals variations of the electric conductivity at the measuring sites "lake" and "pipe 0" (from February 1993 to March 1994).

4.2. Modellierung der unterirdischen Strömungsverhältnisse

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Herkunft der Wässer an den einzelnen Beobachtungsstellen nahezu zweifelsfrei geklärt und die Erkenntnisse mehrfach abgesichert werden konnten, soll nun ein vereinfachtes Bild der Strömungsverhältnisse des unterirdischen Wassers konstruiert werden. Dabei soll auch die Frage nach einer Quantifizierung der beteiligten Wässer berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang halfen Einbohrlochmessungen weiter, mit denen sowohl die Filtergeschwindigkeit als auch die Fließrichtung im Nahbereich eines Grundwasserpegels ermittelt werden kann. Die Messergebnisse für die einzelnen Untersuchungs-punkte sind in Tab. 2 aufgelistet und in Fig. 8 dargestellt. Die Streuung der Einzelmessungen an den Untersuchungsstandorten deutet darauf hin, daß die Strömungsbedingungen nicht in jeder Tiefe identisch sind. Kleine Abweichungen können aber auch auf Meßfehler zurückzuführen sein, die in der Unvollständigkeit und Ungenauigkeit der Ausbaupläne der Grundwassermessstellen und in der Lage der jeweiligen Filterstrecken begründet sind. Dies hat jedoch auf die grundsätzlichen Ergebnisse bei der Interpretation der Meßdaten keinen Einfluß, da lediglich kleine Abweichungen zu erwarten sind.

Tab. 2: Filtergeschwindigkeit, Fließrichtung und Abstandsgeschwindigkeit (v_a) am linken Talhang, ermittelt mit Hilfe der Einbohrlochmessungen.
Darcy velocity, flow direction and distance velocity (v_a) at the left slope of the valley, measured with the single borehole method.

Pegel	Meßtiefe [m]	Filtergeschw. [m/d]		Fließrichtung [°]		Porosität	v_a [m/d] Mittelw.
		Einzelw.	Mittelw.	Einzelw.	Mittelw.		
L 2	13,5	0,70	0,70	252	252	0,2	3,5
L 3	12,1	0,79	0,79	98	98	0,2	4,0
LH 2	11,0	0,39		238			
	12,0	0,03	0,19	9	241	0,2	1,0
LH 10	8,5	0,10		35			
	9,1	0,12	0,10	87	64	0,2	0,5
LH 11	10,5	1,25		75			
	11,5	2,36	1,68	30	45	0,2	8,4
LH 12	9,7	4,84		65			
	10,7	3,63	4,09	95	78	0,2	20,5
LH 13	5,5	5,20		105			
	6,5	3,99	4,49	80	94	0,2	22,5
LH 14	16,5	2,28		154			
	17,2	0,68	1,47	167	157	0,2	7,4

Interessant ist besonders, daß das Wasser im Bereich der Piezometer L 2, LH 2 und LH 14, anders als es bisherige Untersuchungen vermuten ließen, zum See hinströmt. Das kann als sicheres Zeichen dafür gewertet werden, daß an der Meßstelle LH 14, die in unmittelbarer Seenähe liegt, kein Seeinfiltrat auftritt, was auch durch die Messung der stabilen Isotope bestätigt wird.

Das gleiche gilt theoretisch auch für die Grundwasserpegel L 2 (liegt unmittelbar im Bereich der Dammkrone) und LH 2. Auf jeden Fall deuten die geringen Filtergeschwindigkeiten auf eine hohe Dichtigkeit des Erddammes bzw. der daran anschließenden Hangpartien hin. Im Bereich von LH 2 könnte diese auch auf eine in der Nähe eingebrachte Schmalwand zurückzuführen sein. Eine aus den Isotopengehalten errechnete

Zumischung von 70 % und mehr Seewasser (Tab. 1) läßt vermuten, daß es im Bereich von L 2 und LH 2 zu einem regelrechten Rückstau von Seewasser, vermischt mit oberflächlich infiltriertem Niederschlagswasser kommt.

Jenseits des Dammes, im Bereich der Meßstellen L 3 und LH 10, ist die Fließrichtung vom See weggerichtet (entspricht dem Oberflächengefälle). Die Filtergeschwindigkeiten sind hier deutlich geringer als in den am Talhang gelegenen Meßstellen (LH 11, LH 12 und LH 13). Bereits aus der Isoliniendarstellung des Deuteriumgehalts (Fig. 5) ging hervor, daß im Bereich von LH 10 eine Leckage des Dammes vorliegen dürfte. Die äußerst geringe Filtergeschwindigkeit in diesem Bereich belegt jedoch, daß die in-

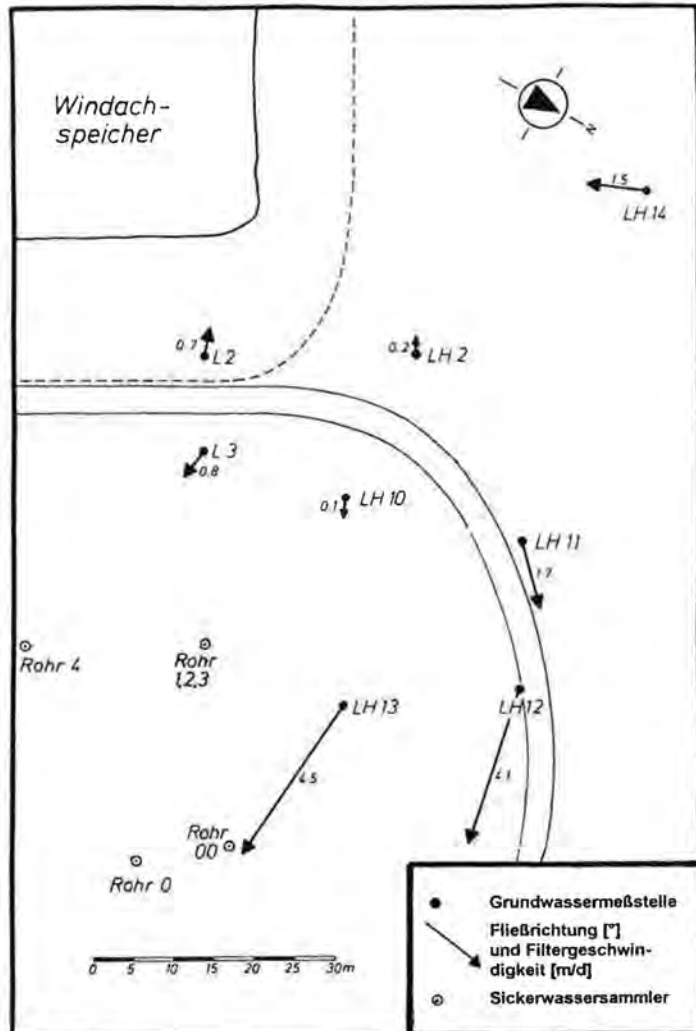


Fig. 8: Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit am linken Talhang (Mittelwerte), ermittelt mit der Einbohrlochmethode.
Flow direction and flow velocity at the left slope of the valley (averages), measured with the single borehole method.

filtrierende Seewassermenge ausgesprochen gering sein dürfte. Dagegen kann anhand der Fließrichtung in den Pegeln LH 11, 12 und 13 nachgewiesen werden, daß sie höchstens zu einem geringen Teil Seeinfiltrat erhalten. Die hohen Filtergeschwindigkeiten deuten auf einen, in Relation etwa zum Abfluß am Piezometer LH 10, beträchtlichen Grundwasserzustrom hin. Damit läßt sich auch der starke Abfluß am Sickerwassersammler Rohr 0 erklären.

5. Schlußbetrachtung

5.1. Repräsentativität der Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchung der Strömungsverhältnisse am Windachspeicher mit Hilfe verschiedener hydrologischer Methoden ergab überwiegend übereinstimmende Ergebnisse. Es bleibt jedoch anzumerken, daß sich die Erkenntnisse hauptsächlich auf Situationen beschränken, bei denen der Stauspiegel des Windachspeichers und damit auch der Grundwasserspiegel Normalniveau (entsprechend dem Dauerstauziel) hatte. Das gilt besonders für die isotonhydrologischen Untersuchungen. Streng genommen dürfen also diese Ergebnisse nur auf Situationen mit ähnlichen hydrologischen Randbedingungen übertragen werden.

Die Auswirkungen von Hochwassersituationen auf das Grundwasserströmungsfeld und damit auch auf die Dammdichtigkeit können nur durch wenige Beobachtungen dokumentiert werden.

Im Verlauf der Temperaturmeßreihe des gesamten Untersuchungszeitraums in Rohr 0 konnten keine kurzfristigen Schwankungen der Wassertemperatur festgestellt werden, die mit einem Hochwasserereignis in Verbindung stehen, obgleich Ereignisse registriert wurden, bei denen der Stauspiegel um mehrere Meter anstieg und die Seewassertemperatur gleichzeitig deutlich sank. Allerdings wurden z. B. in Rohr 4 keine hochwasserabhängigen Temperaturschwankungen gemessen, obwohl bei normalem Stauspiegel nachweislich Seewasser infiltriert. Dies deutet auf eine starke Dämpfung der Temperaturamplitude hin.

Insgesamt läßt sich feststellen, daß mit steigendem Stauspiegel auch die Abflüsse in den Sickerwassersammlern zunehmen. Da dies praktisch ohne Verzögerung geschieht, ist anzunehmen, daß die erhöhten Abflüsse vornehmlich auf die veränderten hydraulischen Verhältnisse während einer solchen Situation zurückzuführen sind. Zum Beispiel entwässert hangseitig zufließendes Grundwasser bei Niedrigwasser in den See, bei steigendem Stauspiegel wird es selbst aufgestaut und fließt dann in eine etwas veränderte Richtung ab. Dabei steigt der Grundwasserspiegel im Bereich des gesamten linken Talhanges und unterhalb des Staudammes aufgrund von Druckübertragungsmechanismen unmittelbar an, was zu einer Zunahme des Sickerwasserabflusses führt. Es gibt deshalb keine Hinweise, daß bei Hochwasser neue Leckagen im Damm auftreten.

5.2. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Dammsicherheit

Die Auswertung der Meßdaten zeigte, daß neben dem unbeeinflussten Grundwasser, das vom Talhang her zufließt, auch infiltriertes Seewasser die Sickerwassersammler speist. Es kann sogar oberhalb des Grundwasserrohres LH 10 eine Leckage vermutet

werden. Alle Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, daß die infiltrierende Seewassermenge im Vergleich zum Grundwasserzuström gering ist. Daß eine Infiltration bei einem Erd-damm wie am Windachspeicher nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, ist keineswegs ungewöhnlich.

Für die Dammsicherheit besteht deshalb allerdings keine Gefahr. Durch weiterführende Arbeiten sollte eine Verdichtung der Isotopen- und Einbohrlochmessungen, besonders während Hochwasserereignissen, angestrebt werden. Zusätzlich sollte in der Nähe des Windachspeichers ein Pegel gesetzt werden, aus dem Grundwasser entnommen werden kann, das mit absoluter Sicherheit vom See unbeeinflusst ist, um so Referenzwerte für den Vergleich mit Seewasser zu erhalten.

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit dem Einsatz verschiedener hydrogeologischer und isotopenhydrologischer Methoden bei Dichtigkeitsuntersuchungen an einem Staudamm, wie dem Windachspeicher. Im Rahmen mehr als einjähriger Meßreihen sollte geklärt werden, ob das Wasser in den Sickerwassersammlern unterhalb des Staudammes, die als Kontrolleinrichtung für die Dammsicherheit dienen, vom Talhang als Grundwasser zuströmt oder aus dem Windachspeicher selbst stammt.

Im Laufe der Auswertungen konnte nachgewiesen werden, daß in den Sickerwassersammlern, in denen hohe Abflüsse auftreten, Seeinfiltrat höchstens eine untergeordnete Rolle spielt. Besonders gute Ergebnisse lieferte dabei die Auswertung der Gehalte der stabilen Isotope ^2H und ^{18}O , die als natürliche Tracer fungieren. Der Isotopengehalt des Seewassers (und damit auch des Seeinfiltrats) unterliegt deutlichen jahreszeitlichen Veränderungen, wohingegen beim Grundwasser kaum Schwankungen auftreten.

Als sehr effektiv erwiesen sich auch Einbohrlochmessungen zur Bestimmung der Fließrichtung und der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers. Auf diese Weise konnten die unterirdischen Strömungsbedingungen rekonstruiert und die Verweilzeiten bei der Untergrundpassage bestimmt werden.

Dominant tritt Seewasser nur an einer Meßstelle auf, die zur Dammdrainage dient. Die Durchsickerung des Dammes jedoch ist quantitativ nur sehr gering. Auch eine Umläufigkeit des Dammes kann nahezu ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse aus der Verteilung stabiler Isotope werden durch Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen bestätigt, die über einen Zeitraum von etwa eineinhalb Jahren am Windachspeicher durchgeführt wurden.

Literatur

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1993): Jahresbericht 1992.– München.
- DROST, W. (1984): Einbohrlochmethoden zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeit und der Fließrichtung des Grundwassers.– Wasser und Boden, 36, 149–153, Hamburg.
- DROST, W. (1987): Bericht über radiohydrometrische Untersuchungen der Grundwasserströmung im Bereich des Peitnach-Einlaufes zur Lechstaustufe 7 bei Schongau.– Unveröff. Bericht, Institut für Hydrologie des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit, 21 S., Neuherberg.

- DROST, W. (1992): Bericht über radiohydrometrische Untersuchungen im Bereich der Talsperre Dornau (Lechstaustufe 6).– Unveröff. Bericht, Institut für Hydrologie des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit, 52 S., Neuherberg.
- DROST, W. & H. MOSER (1980): Einbohrlochmethoden.– In: MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 8, 224–252, Stuttgart/Berlin (Bornträger).
- DROST, W., W. RAUERT, W. STICHLER & G. LEHMANN (1982): Isotopenhydrologische Untersuchungen im linksrheinischen Teil von Düsseldorf. Beiträge über hydrologische Tracermethoden und Anwendungen.– GSF-Bericht, R 290, 238–254, Neuherberg.
- GAT, J. R. & Y. TZUR (1967): Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge.– *Isotopes in Hydrology*, 49–60, IAEA, Wien.
- HÖLTING, B. (1989): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.– 396 S., Stuttgart (Ferdinand Enke).
- KLUDIG, K. H. (1970): Ermittlung des Anteils von Uferfiltrat bei Mischgrundwasser.– *Das Gas- und Wasserfach – Wasser/Abwasser*, 111, 77–79, München.
- MATTHESS, G. (1973): Die Beschaffenheit des Grundwassers.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 2, 324 S., Stuttgart/Berlin (Bornträger).
- MOSER, H. & W. RAUERT (Hrsg., 1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie.– Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 8, 400 S., Stuttgart/Berlin (Bornträger).
- PAYNE, B. R. (1970): Water balance of lake Chala and its relation to groundwater from tritium and stable isotope data.– *Journal of Hydrology*, 11, 47–58, Amsterdam.
- REICHERT, B. (1991): Hydrochemische Veränderung von Oberflächenwässern bei der Uferfiltration.– *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie*, 42, 165–198, Graz.
- RIEGER, D. (1994): Verhalten des unterirdischen Wassers im Bereich des Erddammes am Windachspeicher.– Unveröff. Diplomarb., Institut f. Geographie der Univ. München, 110 S., München.
- STICHLER, W. & P. TRIMBORN (1980): Hydrologische Untersuchungen im Bereich eines Baggersees mit ^2H - und ^{18}O -Analysen und Einbohrlochmessungen.– GSF-Bericht, 250, 28–38, Neuherberg.
- STICHLER, W., P. MALOSZEWSKI & H. MOSER (1986): Modelling of river water infiltration using oxygen-18 data.– *Journal of Hydrology*, 83, 355–365, Amsterdam.
- WILHELM, F. (1993): Hydrogeographie. Grundlagen der Allgemeinen Hydrogeographie.– 227 S., Braunschweig (Westermann).

Summary

The present investigation deals with the use of various hydrological and isotope-hydrological methods to study the imperviousness of a dam, such as the Windach reservoir. Within the scope of more than one year of measurements, it should be clarified whether the water in the water leakage collectors below the dam which serve as a control device for the dam security, flows from the valley slopes as groundwater or if it comes directly from the Windach reservoir.

In the course of interpretation, it could be proven beyond a doubt that lake infiltration plays at least a minor role in the water collectors from which a high level of discharge occurs. Especially good results were achieved in the interpretation of stable isotope content of ^2H and ^{18}O , which act as natural tracers. The isotopic content of the lake water (and thus also the infiltration from the lake) undergo clear seasonal changes, whereas almost no changes occur in the groundwater. Borehole measurements to determine the direction and velocity of groundwater flow have proven to be effective. In this way, underground flow conditions could be reconstructed and the delay time of the underground paths could be determined.

Only at one point a significant amount of lake water appeared, which served as dam drainage. The dam leakage is, however, quantitatively speaking, very minor. Also lateral overflow can be excluded. The results of stable isotope distributions are confirmed by temperature and conductivity measurements, which were carried out at the Windach reservoir over a period of approximately one and a half year.

Dank

Die Untersuchungen wurden vom Wasserwirtschaftsamt Weilheim finanziell unterstützt. Dank gilt besonders allen Mitarbeitern des Amtes, die an der Durchführung der Arbeiten tatkräftig beteiligt waren.