

NUMERISCHE SIMULATION VON AQUIFEREN

von

Zoltan Heinemann

Bundesministerium für Handel, Gewerbe und Industrie;
Grundlagen der Rohstoffversorgung, Heft 7, Geotechnik
und Sicherheit im Bergbau - Wasser und Bergbau, Seminar
in Bad Aussee vom 9. bis 11. Mai 1983, Wien 1984.

NUMERISCHE SIMULATION VON AQUIFEREN

von Zoltan Heinemann

Zusammenfassung

Die numerische Simulation ist eine effiziente Methode, großräumige Änderungen in einem Aquifer zu untersuchen und vorauszusagen. Aufgrund solcher Modelle ist es möglich, die Sicherheitsinteressen des Bergbaues mit den Erfordernissen des Umweltschutzes zu vereinen.

Das Eindringen in die Erdkruste zur Entnahme von festen, flüssigen oder gasförmigen Rohstoffen bringt oft die Störung des hydrologischen Gleichgewichts mit sich. Daraus entstehen Gefahren und zusätzliche Kosten für den Bergbau, darüber hinaus ändert sich der Wasserhaushalt breiter Regionen.

Manchmal beschränken sich die Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung der Entnahmestellen und führen in relativ kurzer Zeit zu einem neuen Gleichgewicht. Das heißt, der Zustand des Aquifers ist zwar nicht mehr ursprünglich - aber doch stationär. Durch die immer größer werdenden Tag- und Grubenbaue, die mengenmäßige Zunahme der aus den Bergbauen oder Sonden der aktiven Wasserschutzeinrichtungen gehobenen Wassermengen, entstehen Folgen in Jahren oder Jahrzehnten. Die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes - die Regeneration des Aquifers - dauert nach Auflassen eines Bergbaues wiederum Jahre. Der Aquifer ist in einem transienten Zustand.

Ob ein Aquifer stationäres oder transientes Verhalten zeigt, hängt von seiner Größe und seinen hydrologischen Parametern sowie vom betrachteten Zeitraum ab. Bei stationärem Verhalten ist die Berechnung einfacher, die Folgen eines Eingriffes können laufend erfaßt werden und sind daher überschaubarer und leichter zu beherrschen.

Bei einem transienten Zustand genügt es nicht, den momentanen Zustand des Aquifers zu erfassen und die zugefügten Schäden zu sanieren. Es muß auch vorausgesagt werden, wie

sich die Lage entwickeln wird, bzw. wie man vorgehen soll, um nicht gewünschte Entwicklungen zu vermeiden. Es ist notwendig, die Parameter des Aquifers zu erfassen, sein Verhalten mit einem mathematischen Modell zu beschreiben und die Entwicklung zu prognostizieren.

Eine Methode, diese Aufgabe zu lösen, ist die numerische Simulation, die eine breite Anwendung in der Erdöl- und Erdgasgewinnung gefunden hat. Der Grundsatz ist die Berechnung der Vorgänge in der Vergangenheit mit einem umfassenden Computerprogramm. Es wird durch gezielte Änderungen der Reservoirparameter eine Übereinstimmung von gerechneten und beobachteten Werten wie Druck, Wasserniveau, Quellenergiebigkeit usw. angestrebt. Dieser Vorgang heißt "History Matching". Ist dieses Verfahren erfolgreich, so ist die Möglichkeit gegeben, auch Voraussagen zu machen.

In der Folge wird ein zweidimensionales Aquifermodell und seine Anwendung beim Karstaquifer des transdanubischen Mittelgebirges besprochen.

1. Mathematisches Modell

Ein Aquifer ist eine poröse, zerklüftete, ausgehöhlte, heterogene und anisotrope Gesteinsmasse. Der Poren-, Kluft- und Hohlraum ist zusammenhängend und so geeignet, das Wasser zu speichern und zu leiten.

Um die Strömungsvorgänge zu beschreiben, wird folgendes vorausgesetzt:

- Das Gestein ist anisotrop, heterogen und inkompressibel.
- Das Fluidum (Wasser) ist inkompressibel.
- Die Strömungslinien sind in der vertikalen Richtung parallel (Dupuit'sche Bedingungen).
- Das Darcy'sche Gesetz gilt.

$$u = \frac{k}{\mu} \text{grad} \Phi, \quad \Phi = p - \rho gz, \quad (1)$$

wobei

- u die Filtrationsgeschwindigkeit, m s⁻¹,
- k die Permeabilität, m²
- μ die Viskosität, Pas
- Φ das Potential, Pa
- p den Druck, Pa
- ρ die Flüssigkeitsdichte, kg m⁻³
- z die vertikale Entfernung von einer horizontalen Referenzebene

bedeuten. Die Permeabilität ist ein Tensor. Angenommen, daß die Hauptrichtungen mit den Koordinatenrichtungen übereinstimmen, ist

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Es werden die Bezeichnungen nach Abb. 1 eingeführt. In einem gegebenen Punkt (x, y) steht für die Fluidfiltration die Gesteinsmächtigkeit

$$h = h' - h_t, \text{ wo}$$

$$h' = \begin{cases} h_f & \text{wenn } h > h_f \\ h & \text{, wenn } h \leq h_f \end{cases} \quad (3)$$

zur Verfügung. Die kumulative vertikale hydraulische Leitfähigkeit ist:

$$\eta_x = \int_{h_t}^{h'} \frac{k_x}{\mu} dz. \quad (4)$$

Das Integral (4) kann in folgender Form entwickelt werden:

$$\eta_x = \int_{h_t}^{h_i} \frac{k_x}{\mu} dz - \int_{h'}^{h_i} \frac{k_x}{\mu} dz \approx \eta_{xi} = (h'_i - h') \left(\frac{k_x}{\mu} \right), \quad (5)$$

wobei der Index i die initialen Werte bezeichnet und $(k_x/\mu)'$ die mittlere Leitfähigkeit in demjenigen Bereich des Aquifers ist, in welchem sich der Wasserspiegel bewegt. Die vertikale summierte Gesamtgeschwindigkeit ergibt sich aus den Gl. (1) und (5) mit

$$U = \int_{h_t}^{h'} u dz = \eta_g \text{ grad } h, \quad (6)$$

wobei

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_x & 0 \\ 0 & \eta_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

und h die piezometrische Wasserhöhe ist. Die Kontinuitätsgleichung lautet hierbei:

$$g \text{ div } (\eta \text{ grad } h) - q + \omega = \phi \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (8)$$

wobei

- h (x,y,t) die piezometrische Wasserhöhe, (m),
- g (x,y,t) die Intensität der Wasserentnahme,
- ω (x,y,t) die Intensität der Wasserzufuhr, beide auf eine Flächeneinheit bezogen (ms⁻¹),
- φ (x,y) die Porosität,
- h* (x,y,t) die Wassermächtigkeit nach Gl. (3), (m).

Die Gl. (8) ist eine nichtlineare parabolische Differentialgleichung zweiter Ordnung, deren Lösung mit der Methode der endlichen Differenzen möglich ist.

Bei dieser Methode wird die Fläche mit einem Raster abgedeckt (Abb. 2) und der Aquifer in Blöcke geteilt. Dort, wo die Druckänderungen größer sind, wählt man kleinere, anderswo größere Blöcke. Die Tiefenlage, Mächtigkeit, Porosität, Permeabilität jedes einzelnen Blockes entspricht dem mittleren Wert des entsprechenden Aquiferteils.

2. Die Simulation des Karstaquifers

Im Transdanubischen Mittelgebirge wird Braunkohle, Bauxit und Mangan in großen Mengen abgebaut. Viele dieser Vorkommen sind auf der erodierten alten Oberfläche des Hauptkarstes abgelagert und liegen unterhalb des Karstwasserniveaus. Zum Schutz der Gruben werden große Wassermengen entnommen und das dynamische Niveau unter das Abbauniveau gesenkt. Der Einfluß auf den Wasserhaushalt dieses Gebietes war so groß, daß die Existenz der Gruben ernsthaft in Frage gestellt war.

Der Karstaquifer ist 1000-2000 m mächtig und nimmt nahezu die gesamte Fläche zwischen der Donau und dem Plattensee - Balaton - ein. Er besteht aus norischen Dolomiten, Dachsteinkalk und karnischen Dolomiten mit guten Durchlässigkeiten und stellt somit ein einheitliches hydrodynamisches System dar. Abb. 3 zeigt die Ausbisse des Karstes.

Der natürliche Wasserumsatz beträgt $700 \text{ m}^3/\text{min}$. (G. Szilagyi und A. Schmieder 1976). Der Nachschub stammt aus Niederschlägen auf eine Fläche von 1500 km^2 , wobei die Einsickerung bei 36 % liegt.

Tab. 1 gibt die Wasserbilanz für den ehemaligen ungestörten Zustand und im Jahr 1978 an. In diesem Jahr wurde die Wasserreserve um $190 \text{ m}^3/\text{min}$ vermindert. Der Stand des Wasserspiegels ist im Längsriß der Abb. 4 dargestellt.

Der erste Versuch, den Aquifer numerisch zu simulieren, wurde im Jahr 1975 begonnen. Das Modell wurde schrittweise vergrößert bzw. verfeinert. Abb. 5 zeigt eines der angewendeten Blockschemata, es umfaßt 2025 Blöcke.

Die erste Aufgabe war es, die initiale Lage zu erfassen. Man stellte die natürlichen Randbedingungen dar und rechnete ausgehend von einem beliebigen Zustand den stationären Zustand aus. Dieser mußte mit dem originalen Karstwasser-Flächenprofil übereinstimmen. Es mußten die Parameter so lange geprüft und geändert werden, bis das gerechnete und das beobachtete Profil übereinstimmen. Die Abweichungen waren überall weniger als 10 m.

Das History Matching umfaßt die Jahre 1956-1976. Abb. 7 zeigt das gerechnete, Abb. 8 das beobachtete Wasserflächenprofil vom 1. Jänner 1974. Abb. 9 zeigt die Abweichungen. Eine bessere Übereinstimmung konnte nicht erreicht werden, weil das nach den Beobachtungen konstruierte Profil ungenau und widersprüchlich war.

Abb. 10 vergleicht die gemessenen und errechneten Wasserumsätze, sie waren in ihrer Tendenz gleich. Die Abweichungen waren am Anfang größer und wurden zusehendst kleiner. Diese Annäherung geht auf genauere Meßwerte zurück.

Das durch das History Matching geeichte Modell dient zur Untersuchung künftiger Szenarien, denn bei einem History Matching von über zwanzig Jahren, kann die Beurteilung eines künftigen Zeitraumes von 5-10 Jahren mit guter Genauigkeit erfolgen.

Literatur

Heinemann, Z., Szilagy, G.: Simulation des Hauptkarstsystems der Transdanubischen Mittelgebirge. MTA X. Osztályának Közleményei 9, 3-4, Budapest 1976.

Schmieder, A., Szilagy, G.: Regionales Modell der Karstwasseraquifer der Transdanubischen Mittelgebirge. MTA X. Oszt. Közl. 12, 1-3, Budapest 1979.

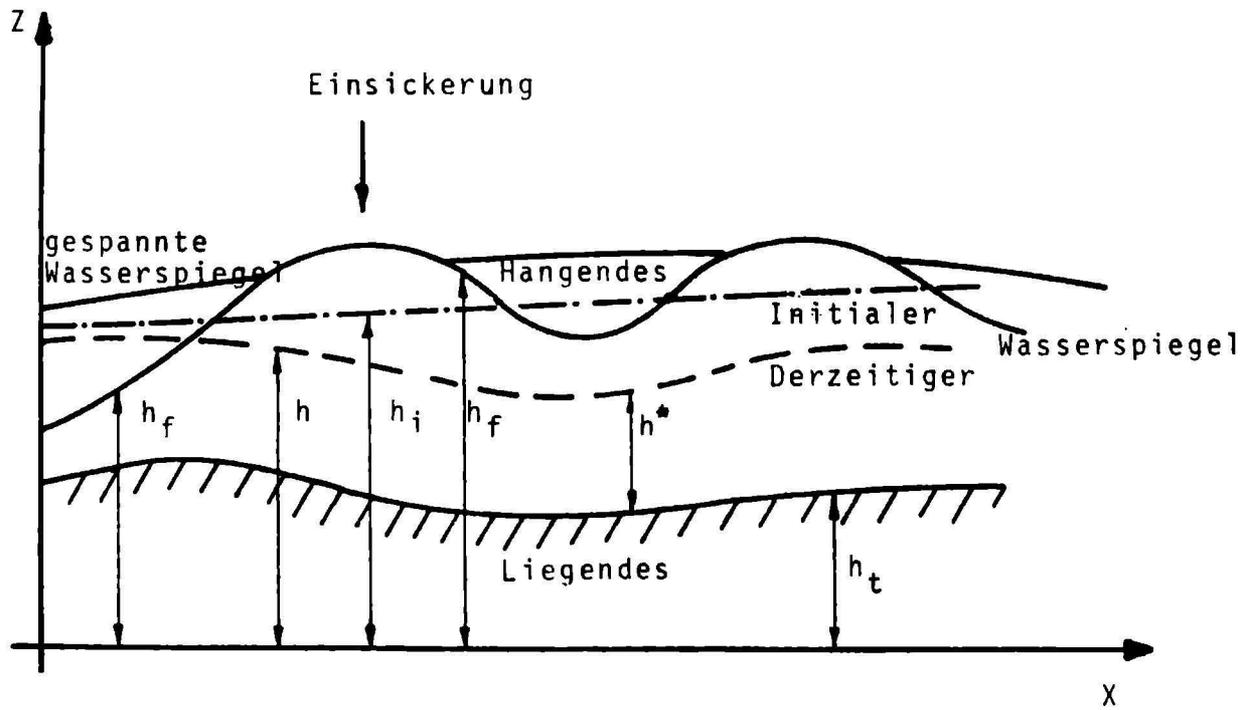
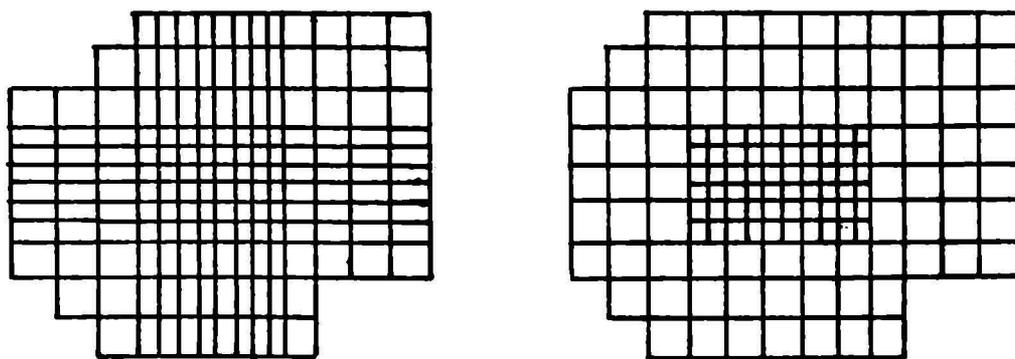


Abb.1: Längsprofil durch einen Aquifer



a) konventionell

b) lokal verfeinert

Abb.2: Blockmodelle

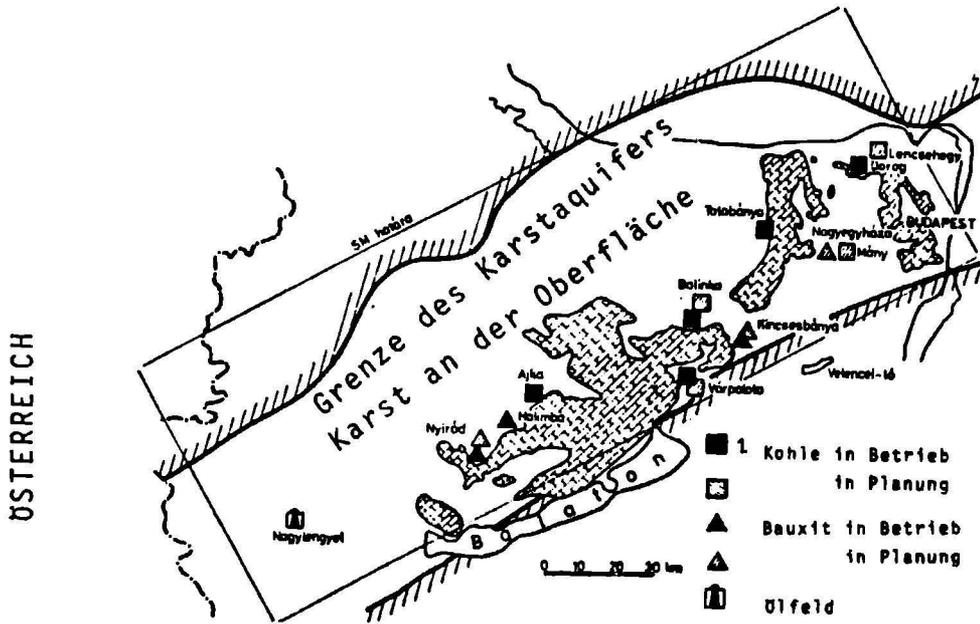


Abb.3: Bergwerke mit Karstwasserentnahme

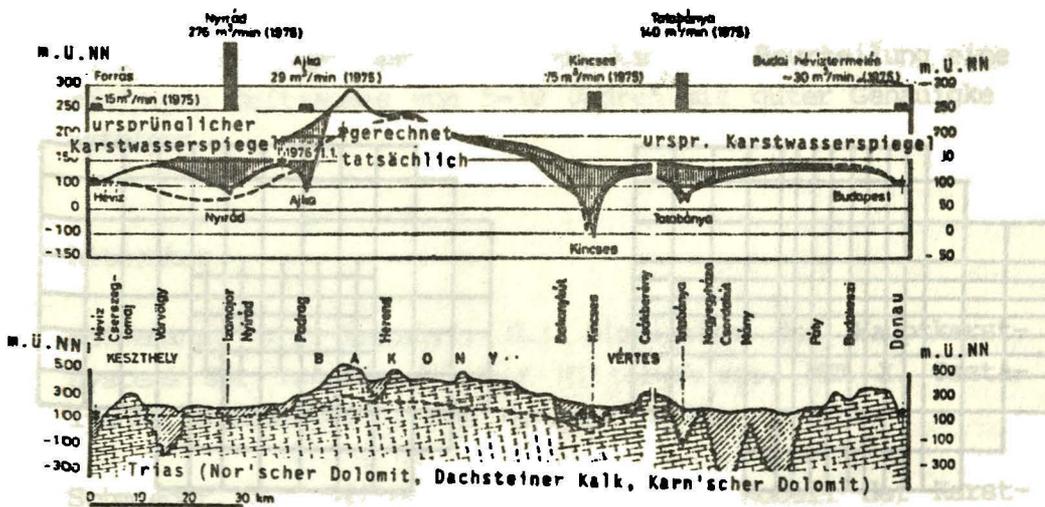


Abb.4: Hydrogeologisches Längsprofil

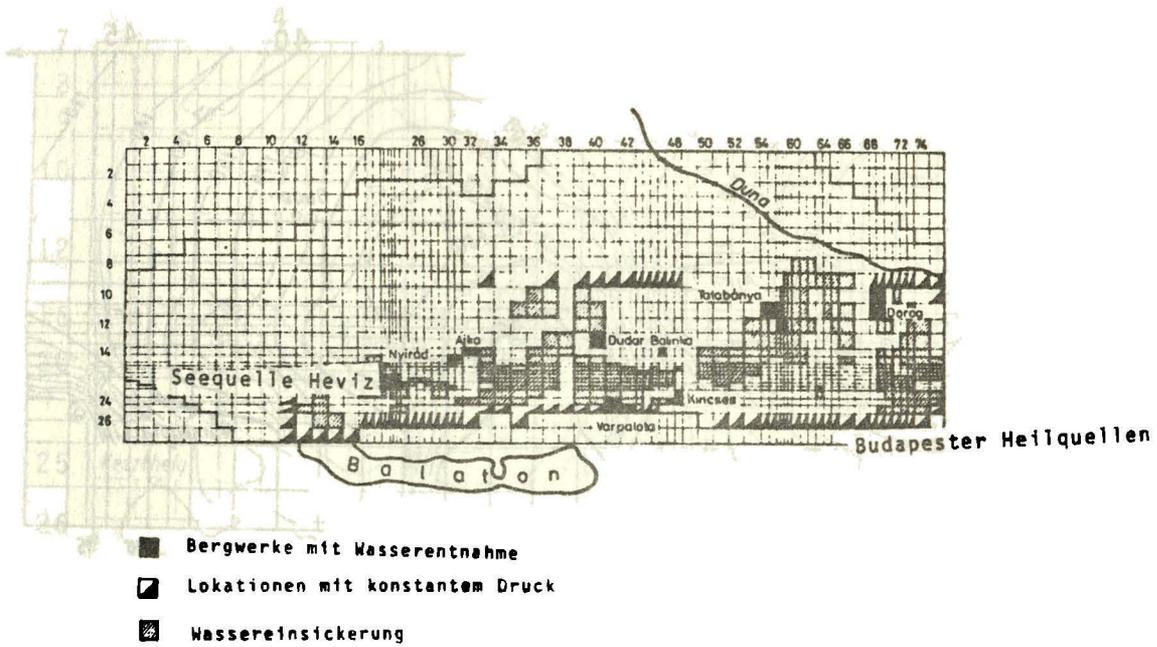


Abb.5: Blockschema des Simulationsmodells

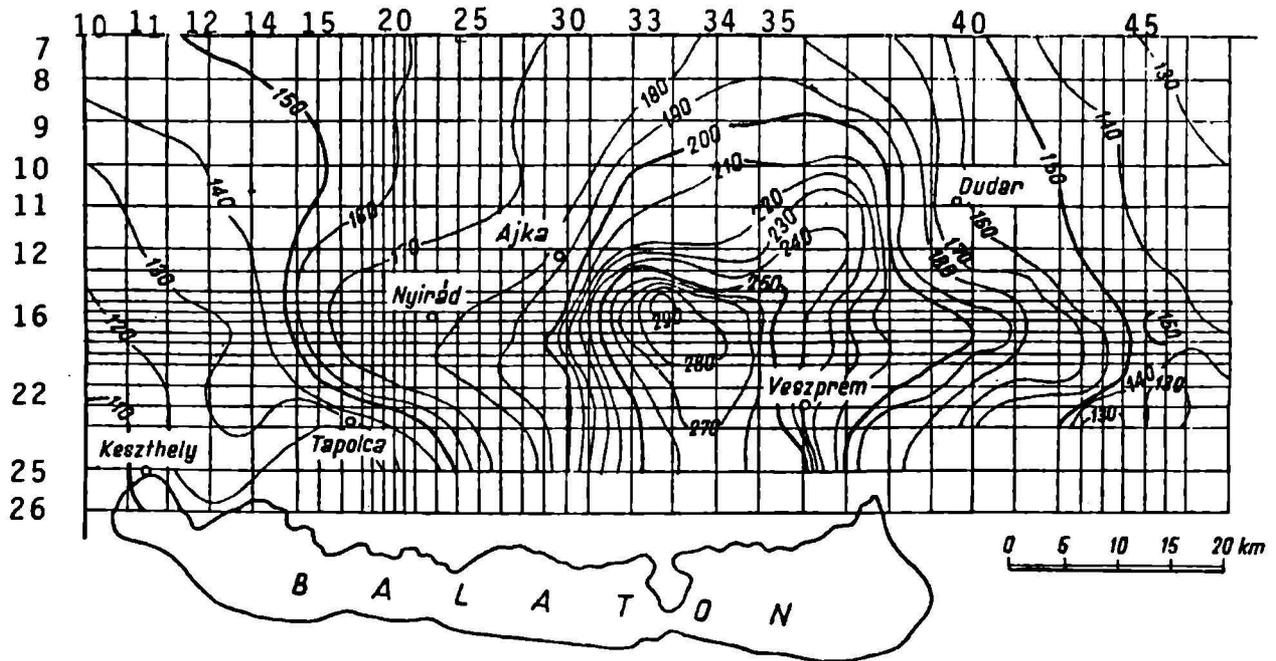


Abb.6: Ursprünglicher Karstwasserspiegel in Meter oberhalb des Meeresniveaus (nach Heinemann, Z., Szilagy, G., 1976)

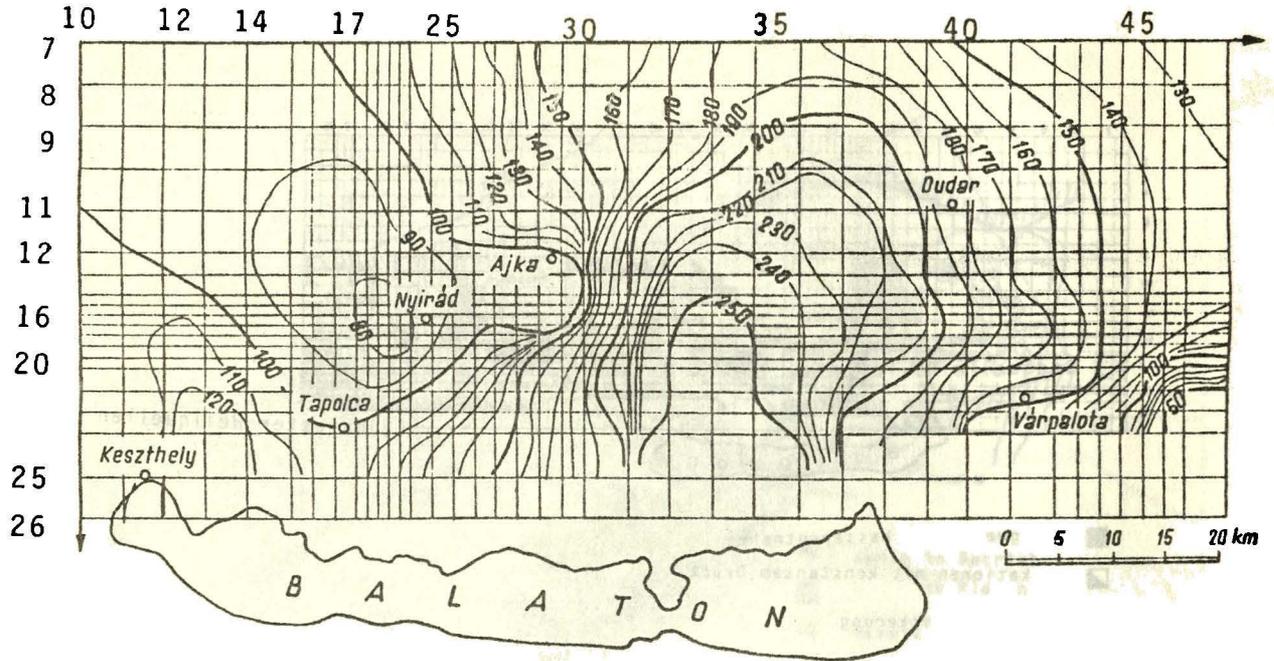


Abb.7: Berechneter Karstwasserspiegel (m.o.d.M.N.)
für den Zeitpunkt 1.1.1974 (nach Heinemann, Z.,
Szilagyi, G., 1976)

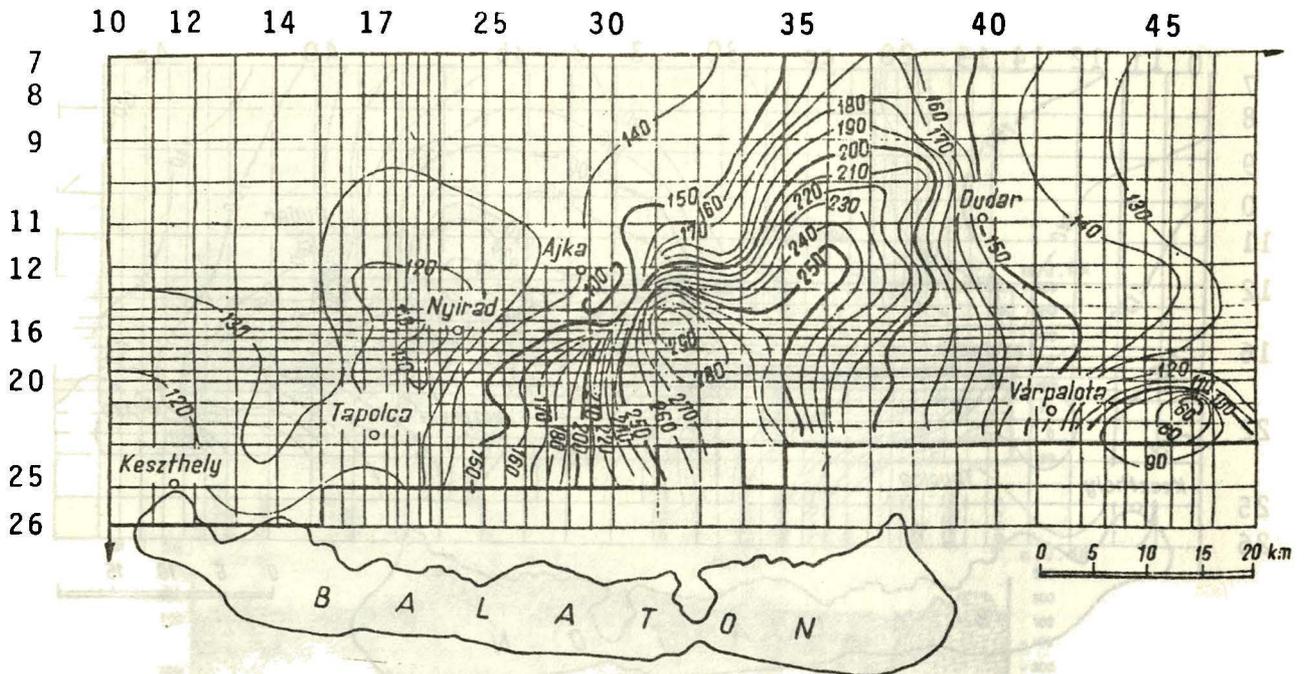


Abb.8: "Tatsächlicher" Karstwasserspiegel (m.o.d.M.N.)
zum Zeitpunkt 1.1.1984 (nach Heinemann, Z.,
Szilagyi, G., 1976)

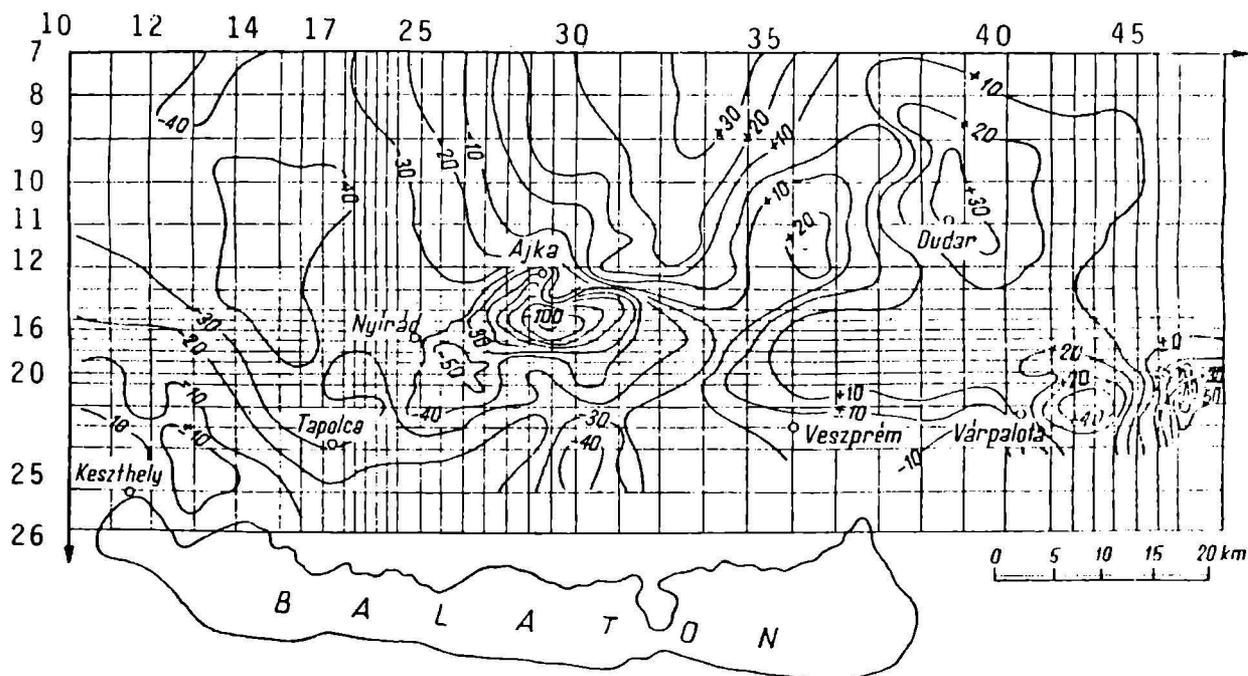


Abb.9: Abweichung zwischen gerechneten und gemessenen Karstwasserspiegel zum Zeitpunkt 1.1.1974 (nach Heinemann, Z., Szilagyi, G., 1976)

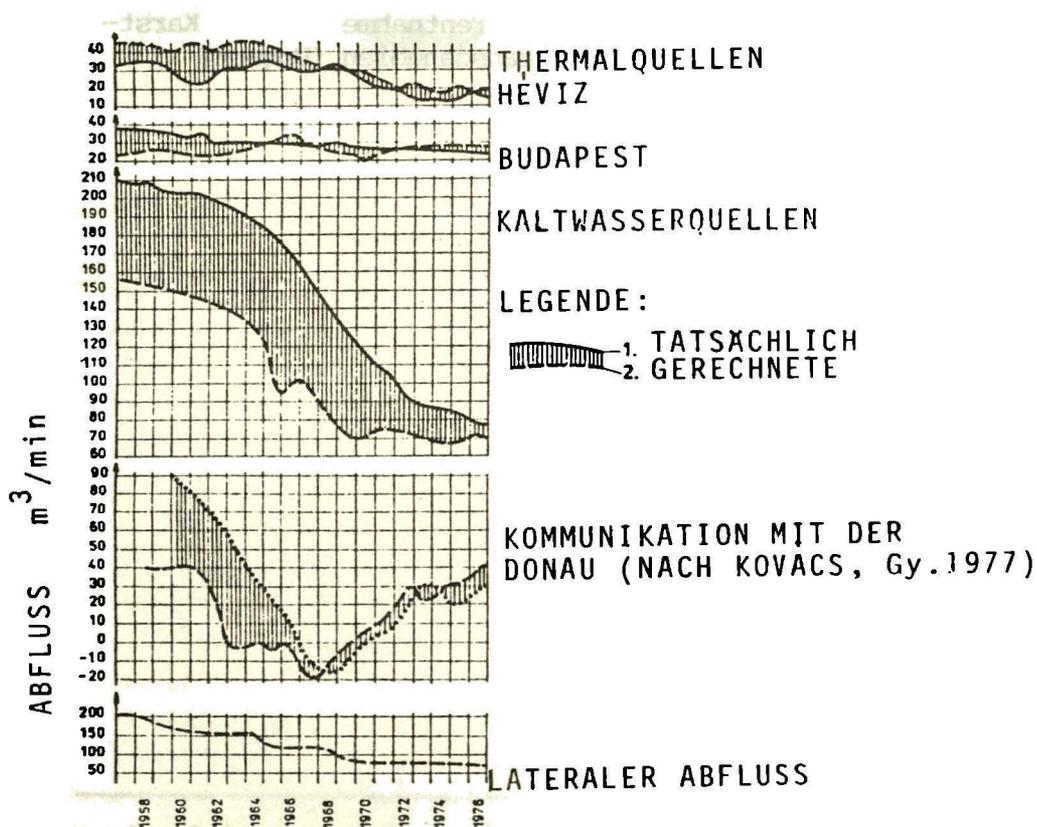


Abb.10: Gemessener und berechneter Wasserabfluß (nach Schmieder, A., Szilagyi, G., 1979)

	UNGESTÖRTER ZUSTAND	IM JAHRE 1978
NATORLICHER WASSERABFLUSS	700 m ³ /min 100%	250 m ³ /min 35%
WASSERENTNAHME	— " —	600 m ³ /min 65%
INSGESAMT	700 m ³ /min 100%	850 m ³ /min 100%

VERTEILUNG DER ENTNAHME

NATORLICHER ABFLUSS	KALTE QUELLEN	36%	10%
	LATERALER ABFLUSS	28%	10%
	BODENWASSER AUF GEBIRGS- SOHLE	17%	3%
	THERMALQUELLEN	10%	8%
	ABFLUSS IN DIE DONAU	9%	4%
WASSERENTNAHME	WASSERWERKE	-	2%
	BERGWERKE	-	63%
		<u>100%</u>	<u>100%</u>

Tab.1: Wasserabfluß und Wasserentnahme aus dem Karstreservoir von Nordtransdanubien (Ungarn)