

UDK 556.332:551.44(497.12)=40

Interprétation des essais par pompage réalisés dans un aquifère karstique

Obdelava črpalnih poizkusov v kraškem vodonosniku

Primož Krivic

Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Résumé

Les pompages d'essai ont été réalisés sur dix forages répartis sur les secteurs nord et nord-ouest de l'aquifère de Kras (Slovénie, Yougoslavie). L'allure générale des courbes obtenues lors des dix essais permet de distinguer plusieurs types d'évolution: évolution selon un régime transitoire tel qu'on peut l'observer dans un milieu poreux homogène, évolution avec stabilisation rapide ou même immédiate, évolution influencée par l'effet de capacité et les pertes de charge anormales au niveau de l'ouvrage. Les forages étudiés sont tous aquifères (100 %). Chaque forage appartient soit aux zones drainantes à forte transmisivité apparente (40 % des cas), soit aux sous-systèmes, domaines peu perméables. 70 % des lieux explorés par les forages peuvent fournir des débits suffisants pour l'alimentation en eau, soit pour les besoins locaux, soit régionaux.

Kratka vsebina

Črpalni poizkusi v kraško-razpoklinskem vodonosniku so bili izvedeni v desetih vrtinah, ki so izvrtane na severnem in zahodnem delu Krasa. Po obliki krivulj znižanja gladine podtalnice v odvisnosti od časa med črpanjem smo lahko ločili tri tipe znižanja: razvoj znižanja v prehodnem stanju, kakršnega lahko opazujemo v homogeni porozni sredini, zelo hitro ali celo takojšnje ustalitev gladine podtalnice v vrtinah in razvoj znižanja pod vplivom kapacitete vodnjaka in nenormalnih tlačnih izgub v okolici črpalne vrtine. Vse vrtine na tem področju so vodonosne (100 %). Vrtine so locirane bodisi v drenažnih conah z visoko navidezno transmisivnostjo (40 % vrtin) ali v slabo prepustnih podsistemih. Kar 70 % lokacij preiskanih z vrtinami omogoča izkoriščanje za vodooskrbo, bodisi za lokalne ali pa tudi za regionalne potrebe.

Avertissement. Cet article constitue la troisième et dernière partie d'un mémoire sous titre: «Étude hydrodynamique d'un aquifère karstique» présenté par l'auteur en vue d'une soutenance de thèse de Docteur-ingénieur à l'Université Montpellier II, France, année 1981. Les deux premières parties ont été publiées dans les fascicules 1 et 2, de l'année 1982, de la GEOLOGIJA.

Pojasnilo. Članek predstavlja tretji in zadnji del doktorske disertacije z naslovom: »Študija hidrodinamike kraškega vodonosnika«, ki jo je avtor zagovarjal leta 1981 na Univerzi Montpellier II v Franciji. Prva dva dela sta izšla v 1. in 2. delu revije GEOLOGIJA v letu 1982.

Introduction

Contrairement aux parties précédentes (P. Krivic, 1982a, 1982b) dans lesquelles nous avons traité des variations naturelles des niveaux piézométriques, nous examinerons ici des phénomènes provoqués par pompages dans les forages.

Comme on le sait, les essais par pompage ont pour but de déterminer: les caractéristiques hydrauliques des ouvrages, les débits de production, et d'évaluer les paramètres hydrodynamiques de la couche aquifère. La validité de l'interprétation dépendra du choix de la méthode par rapport au problème posé et aux mesures disponibles.

L'approche du problème nécessiterait une description très fine de la géométrie du milieu constitué par une matrice rocheuse plus ou moins poreuse divisée par des discontinuités très conductrices. Il apparaît qu'en général la matrice rocheuse, malgré sa porosité, se caractérise par une perméabilité négligeable devant celle du massif fissuré et que les réseaux d'écoulement dépendent principalement de la répartition et de la géométrie des discontinuités.

Dans les roches calcaires fissurées, les modes d'écoulement et la géométrie des magasins sont d'une complexité telle qu'on ne dispose pas encore actuellement de solution mathématique d'interprétation totalement satisfaisante.

Les méthodes pour la détermination des propriétés hydrauliques des aquifères fissurés sont proposées par A. C. GRINGARTEN, H. J. RAMEY et P. A. WITHERSPOON. Aussi, nous avons utilisé dans ce travail des méthodes d'interprétation classiques qui ne sont strictement valables que pour des aquifères poreux (homogènes, isotropes et d'extension infinie). Il est bien évident que les paramètres obtenus ainsi n'ont plus de signification physique; il s'agit de valeurs apparentes (transmissivité apparente (T_a) d'un milieu poreux homogène équivalent) qui permettent essentiellement de comparer les résultats des essais que nous avons réalisés. La comparaison facile des essais entre eux justifie l'application de ces méthodes, mais les valeurs absolues de paramètres ainsi obtenus n'ont évidemment aucune autre signification.

Dans le cadre de ce travail, les essais par pompage ont été réalisés sur dix forages. Nous allons examiner les résultats de tous ces essais regroupés par »types« d'évolution; soit que les forages sont situés sous des zones drainantes de l'aquifère; soit qu'ils ne recoupent que des fissures de domaines peu perméables.

CHAPITRE I

Structure du milieu karstique et lois d'écoulement

Avant d'examiner les méthodes disponibles pour l'interprétation des essais par pompage, il est utile de rappeler brièvement les modes d'écoulement dans le milieu karstique, mode d'écoulement lié à la structure de ce milieu.

Alors que dans un milieu poreux on admet généralement l'hypothèse de l'écoulement laminaire, confirmée dans la plupart des cas par les mesures expérimentales, en milieu fissuré, cette hypothèse n'est pas toujours justifiée car les vitesses d'écoulement peuvent atteindre dans les fentes des valeurs importantes. Ceci conduit à rechercher les vitesses critiques pour lesquelles

l'écoulement devient turbulent, alors en dehors des limites de validité de la loi de Darcy.

En conséquence, il apparaît que, pour des fissures d'ouverture supérieure à 1 cm, le régime de l'écoulement de l'eau doit être, le plus souvent, turbulent surtout si l'on considère que l'écoulement est presque toujours non parallèle, compte tenu de la forme des fentes. Les fractures ouvertes ne sont ni planes, ni continues et les lois de perte de charge dépendent de leur conformation et du régime d'écoulement. En régime laminaire, la loi d'écoulement s'écrit :

$$V = -K \cdot i$$

où V est la vitesse de filtration, K est le coefficient de perte de charge (coefficient de Darcy en milieu poreux), ou coefficient de perméabilité, et i le gradient hydraulique pris dans le sens de l'écoulement.

D'après des résultats théoriques et expérimentaux (C. Louis, 1974), les écoulements dans les milieux fissurés peuvent être classés dans les cinq domaines suivants :

- écoulement parallèle laminaire,
- écoulement parallèle turbulent hydrauliquement lisse,
- écoulement turbulent complètement rugueux,
- écoulement laminaire non parallèle,
- écoulement turbulent non parallèle.

La loi de Darcy ne peut donc être vérifiée que pour deux régimes de l'écoulement où les pertes de charge sont linéaires : les régimes de l'écoulement laminaire parallèle et non parallèle.

En dehors de ces domaines, la relation liant la vitesse de l'écoulement et le gradient de perte de charge peut s'écrire :

$$V = -K \sqrt{i} \quad (\text{formule de CHEZY})$$

où K représente la conductivité hydraulique (C. Louis, 1974; G. Castany et J. Margat, 1977).

Souvent est invoqué un régime intermédiaire laminaire-turbulent dont l'expression générale est :

$$V = -K i^n$$

où n serait compris entre 1 et 0,5.

Dans le cas de l'écoulement radial autour d'un forage, la vitesse de l'écoulement varie suivant la distance à l'axe du forage. Les forces d'inertie qui augmentent quand la vitesse de l'écoulement croît viennent s'ajouter aux forces de viscosité. Il existe donc un nombre de REYNOLDS limite au-delà duquel les pertes de charge ne sont plus linéaires. Le nombre de REYNOLDS de l'écoulement en un point est donc inversement proportionnel à la distance de ce point à l'axe du forage. Le régime de l'écoulement, dépendant de la valeur de Re , peut donc changer à une certaine distance du forage; il peut ainsi passer à un écoulement à pertes de charge quadratiques. C. Rayneau (1972) a calculé les distances à l'axe du forage pour lesquelles s'établit un certain nombre de Reynolds, pour un débit donné.

Ainsi, si on prend comme nombre de Reynolds limite de l'écoulement à pertes de charge linéaire, la valeur de 1, on constate que le rayon limite

de changement de régime de l'écoulement est de 27,8 m à 0,11/s, 278 m à 1 l/s et 2780 m à 10 l/s (G. Marjolet et J. Salado, 1975). Le domaine des pertes de charges quadratiques autour du forage peut donc être très grand.

La structure du milieu joue un rôle important dans l'organisation des écoulements dans les aquifères karstiques. D'après C. Louis (1974), le milieu fissuré peut être considéré comme continu ou discontinu. Cela dépend uniquement de l'échelle relative du phénomène étudié et du modèle de fracturation caractérisé, par exemple, par la distance moyenne de fractures élémentaires.

Il sera légitime de considérer un milieu fissuré comme continu si la dimension des blocs élémentaires est négligeable devant la dimension du phénomène considéré.

Dans le cas des karsts, la dimension du réseau conducteur n'est pas négligeable, évidemment, par rapport aux dimensions de l'ouvrage. Il est donc extrêmement important de comparer l'extension des fractures (métriques, décimétriques, etc...) et le rayon d'action des essais hydrauliques dans les forages.

Le milieu doit être considéré comme discontinu et hétérogène. Une extrapolation de résultats de mesures ponctuelles à de grands volumes conduirait à de graves erreurs.

L'évolution d'un pompage est étroitement liée à la position de l'ouvrage dans le champ d'hétérogénéité du système karstique, dans lequel on distingue des zones drainantes (des chenaux ou conduits drainants) juxtaposées aux zones peu perméables (C. Drogue, 1974).

Les forages peuvent être situés soit sur les zones drainantes ou à leur proximité immédiate, soit dans les domaines ou »blocs« peu perméables. L'évolution d'un pompage n'est pas la même dans les deux cas, car dans les réseaux de minces fissures les circulations sont lentes et peuvent être laminaires, par contre dans les réseaux de chenaux ou conduits, les écoulements sont plus rapides et peuvent être turbulents; la loi de Darcy n'est alors pas vérifiée.

Les conditions aux limites interviennent aussi car les célérités de propagation des ondes piézométriques (diffusivité apparente élevée) sont telles que les limites de l'aquifère sont atteintes rapidement. Il s'agit, soit des limites à potentiel constant (plan d'eau libre, ligne de sources, ou aquifère adjacent très conducteur), soit des limites imperméables (encaissant marneux par exemple).

CHAPITRE II

Objectifs poursuivis

Avec les pompages, nous avons poursuivi deux objectifs, l'un appliqué et l'autre théorique:

— le premier étant la définition des caractéristiques des forages eux-mêmes et les débits d'exploitation,

— le deuxième objectif vise à améliorer la connaissance des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère karstique.

CHAPITRE III

Méthodes d'interprétation1. *Essai de puits*

Comme on le sait, le rabattement s observé dans un puits de pompage en régime permanent est souvent la somme de deux composantes, dont l'une est linéaire et l'autre quadratique par rapport au débit.

$$s = BQ + CQ^2$$

Le coefficient B est constant pour un forage. Il est fonction des caractéristiques transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère, de la pénétration partielle ainsi que du remaniement éventuel autour de la crépine. Le coefficient C est également constant pour le forage. Il dépend de la nature du tubage et de la crépine, de la géométrie du puits, des accessoires utilisés.

L'équation précédente peut s'écrire sous la forme:

$$s/Q = B + CQ$$

qui est une équation du 1er degré. Les rabattements spécifiques en fonction du débit s'alignent sur une droite d'ordonnée à l'origine B et de pente C .

2. *Essai de nappe*2.1. *Régime transitoire*

Nous ne reprendrons pas, dans le cadre de ce travail, les théories relatives aux méthodes d'interprétation qui sont très classiques (J. Forkasiewicz, 1977, G. P. Kruseman et N. A. de Ridder, 1974).

2.2. *Régime permanent*2.2.1. *Méthode de THIEM*

THIEM fut un des premiers à utiliser plusieurs piézomètres pour mesurer la transmissivité d'un aquifère. Il démontra que, dans un aquifère homogène, isotrope et d'une extension infinie, la transmissivité de l'aquifère peut s'exprimer par la formule:

$$T = \frac{Q}{2\pi (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

dans laquelle T est la transmissivité de l'aquifère en m^2/s ,

Q est la débit de pompage en m^3/s ,

r_1 et r_2 sont les distances en mètres entre le puits d'essai et les piézomètres,

s_1 et s_2 sont les rabattements stabilisés en mètres dans les piézomètres.

2.2.2. Méthode de CHEZY-KRASNOPOLSKI

Pour les écoulements turbulents dans les chenaux et fissures A. Krasnopolski a obtenu, d'après la formule de CHEZY

$$V = K\sqrt{i}$$

et avec une démarche analogue à celle de Dupuit, pour débit du puits Q la relation simplifiée suivante (G. V. Bogomolov et G. V. Silin-Bekčurin, 1959):

$$Q = 2\pi kH \sqrt{rs} \quad \text{avec}$$

r : rayon du puits (m); s : rabattement stabilisé (m); H : épaisseur saturée de la couche aquifère (m).

Nous avons donc appliqué cette formule approximative pour le calcul de la conductivité:

$$k = \frac{1}{2\pi} \frac{Q}{H \sqrt{rs}}$$

CHAPITRE IV

Conditions expérimentales

Les essais ont porté sur dix forages répartis sur les secteurs nord et nord-ouest de l'aquifère étudié. Huit forages (B-1 à B-8) exécutés en 1977 furent implantés le long de la vallée de Brestovica. Deux forages, réalisés en 1979, sont situés dans la doline de Avber (V-2) et dans la doline de Kazlje (V-1). Tous les ouvrages sont reportés sur la carte de la figure 1 de l'article P. Krivic 1982a.

Il est important de signaler que le mode d'exécution des pompages d'essai était différent d'un forage à l'autre. L'équipement des forages, leur trop faible diamètre et le manque de piézomètres, ne nous ont pas permis de faire toutes les mesures souhaitées. Trop fréquemment, les pompages d'essai ont été exécutés à l'air comprimé (pompage par émulsion) et les rabattements n'étaient pas observés pendant la descente du niveau piézométrique. Dans ces cas là, les rabattements ont été mesurés à la remontée seulement après l'arrêt du pompage et les rabattements maximum sont obtenus par extrapolation des courbes de la remontée en coordonnées arithmétiques et semi-logarithmiques. Malgré tout, nous avons tenté d'obtenir le maximum d'informations de chaque essai.

Tous les essais de pompage se sont déroulés en étiage.

Caractéristiques géologiques et techniques des ouvrages voir P. Krivic (1982 a).

CHAPITRE V

Interprétation des essais

Comme nous l'avons dit, il est certain que l'évolution d'un pompage est liée à la position de l'ouvrage dans le milieu fissuré (Hu Khiam, 1973; C. Drogue, 1974).

L'allure générale des courbes obtenues lors des dix essais permet de distinguer plusieurs types d'évolution:

- évolution selon un régime transitoire semblable au modèle de THEIS,
- évolution avec stabilisation rapide ou même immédiate,
- évolution influencée par l'effet de capacité et les pertes de charge anormales au niveau de l'ouvrage.

Pour la discussion et l'interprétation des résultats, nous avons donc regroupé les essais selon ces trois familles.

1. Evolution selon un régime transitoire semblable au modèle de THEIS

1.1. Forage V-1 (Kazlje)

1.1.1. Déroulement des essais

Les essais se sont déroulés du 16 au 22 mars 1979 avec une durée totale de 4 jours et demi (fig. 1).

A cause du diamètre foré trop faible (6" 1/2) ne permettant pas le passage d'une pompe au-delà de 115 m de profondeur, le pompage a été fait par émulsion, à l'aide d'un compresseur Atlas-Copco (débit d'air comprimé: $Q = 33 \text{ m}^3/\text{min}$; pression: $P = 20 \text{ bars}$).

Premier essai

L'essai s'est déroulé à débit moyen de $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 45 heures. Après 12 heures de pompage, un régime quasi-permanent s'est établi avec un rabattement de l'ordre de 17 m. Après l'arrêt de l'exhaure, la remontée du niveau dans le forage a été observée pendant 31 heures jusqu'à la stabilisation. Le rabattement résiduel de 0,17 m doit être attribué à la baisse naturelle de la nappe en décrue pendant la période des essais.

Deuxième essai

Cet essai à débit constant de $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ n'a duré que deux heures à cause d'une panne du moteur.

Troisième essai

Le pompage a été repris 30 heures plus tard, après avoir attendu la stabilisation du niveau à la cote de départ du deuxième essai. Le débit de pompage étant fixé à $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pendant une durée de 35 heures, la courbe de rabattement en fonction du temps a repris la même allure que celle obtenue avec le premier essai.

1.1.2. Interprétation des essais

A — Essai de puits

Résultats obtenus — Interprétation

Pour déterminer les caractéristiques du forage et évaluer sa productivité et son efficacité, on ne dispose que de deux paliers de débit différent. Les valeurs ainsi obtenues ne sont donc qu'approximatives.

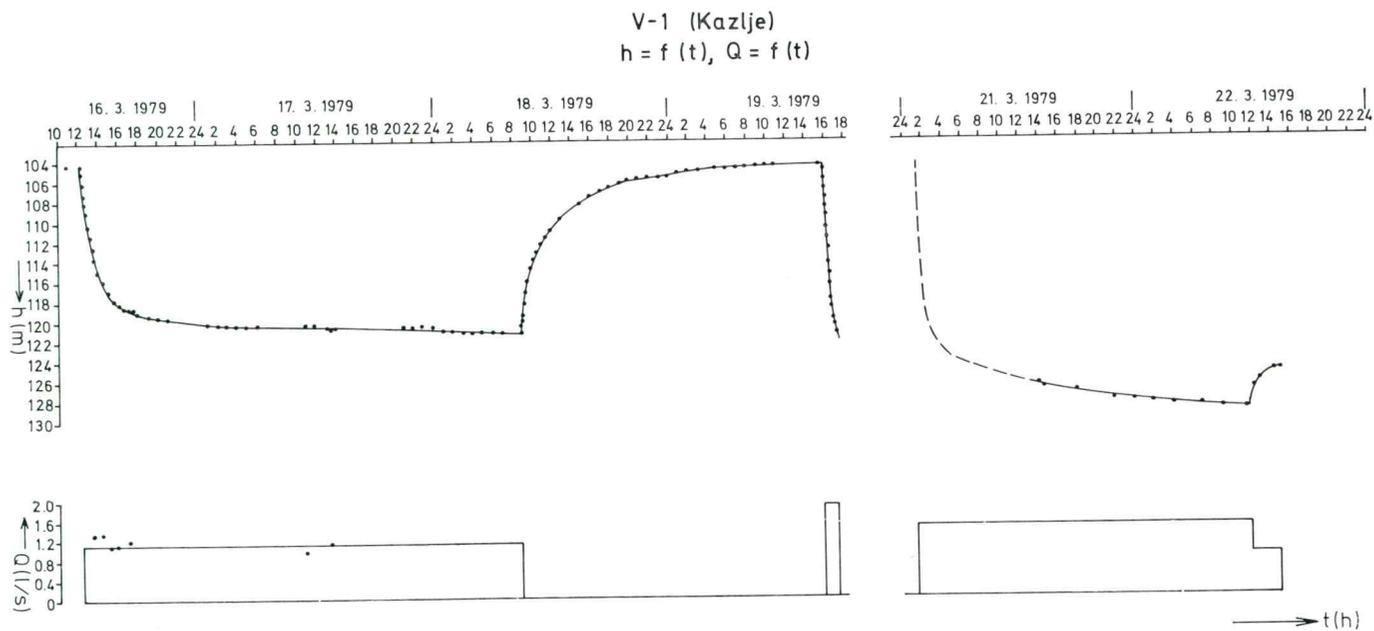


Fig. 1. Pompage d'essai dans le forage V-1

Sl. 1. Črpalni poizkus v vrtini V-1

Tableau 1. Résultats de pompage d'essai par paliers de débit effectué dans le forage V-1

Tabela 1. Rezultati črpalnega poizkusa z različnimi pretoki v vrtni V-1

Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Rab. spécifique en $\times 10^3 \text{ m/m}^3/\text{s}$	Débit spécifique en $\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$
1,1	17,0	15,45	6,47
1,5	24,5	16,33	6,12

Un régime quasi-permanent a été obtenu sur ces deux essais (fig. 1). En effet, en prenant les rabattements suivants après des temps de pompage assez longs et égaux (35 heures) sur les deux paliers de débit, on obtient le tableau 1.

La fonction $s/Q = f(Q)$ est une droite d'équation:

$$s/Q = B + CQ \text{ avec } C = 13 \cdot 10^3; B = 2230 \cdot 10^3$$

La courbe débits/rabattements de $s = f(Q)$ est une fonction parabolique du second degré (fig. 2) qui s'écrit:

$$s = 13 \cdot 10^3 Q + 2230 \cdot 10^3 Q^2$$

Débit exploitable

La courbe $s = f(Q)$ sur la figure 2 montre qu'un pompage au débit de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ donnerait un rabattement de 59 mètres environ.

La forage se révèle donc très peu productif.

B — Essai de nappe

Régime transitoire

Modèle de fissuration

Les méthodes pour la détermination des propriétés hydrauliques des aquifères fissurés, initialement établies pour des réservoirs pétroliers, sont proposées par Gringarten, Ramey et Witherspoon. Les modèles mathématiques ont récemment été développés pour les écoulements transitoires dans des réservoirs comprenant une fracture unique, verticale ou horizontale. Les mêmes auteurs ont publié des courbes théoriques temps-rabattement et ont mis au point une méthode permettant de calculer les paramètres hydrauliques de l'aquifère (Hu Khiam, 1973; Louis, 1974; Pitard, 1976).

Les rabattements dans le puits pompé sont représentés en fonction du temps en coordonnées bilogarithmiques à modules égaux. La superposition des courbes expérimentales avec les courbes théoriques permet de déterminer une valeur de la hauteur réduite Z_{wD} .

Un point arbitrairement choisi donne les coordonnées suivantes:

t — temps de pompage (ou depuis son arrêt)

s — rabattement

t_D — temps réduit

s_D — rabattement réduit

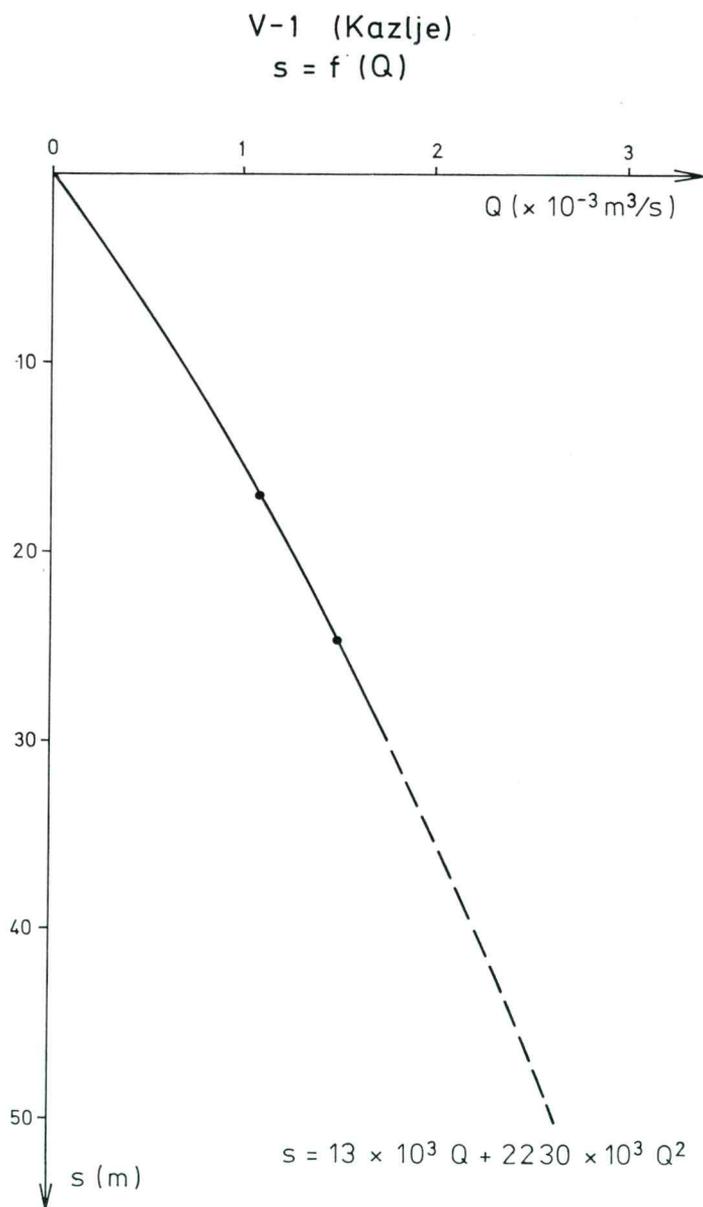


Fig. 2. Courbe débits/rabattements pour le forage V-1
Sl. 2. Krivulja odvisnosti znižanja od črpane količine za vr-
tino V-1

L'ensemble des équations suivantes permet de déterminer la perméabilité horizontale k_h , le rapport k_z/S_s et la profondeur des fractures z_w (Pitard, 1976):

$$k_h = \sqrt{k_x k_y} = \frac{Q}{4\pi s} \frac{s_D}{z} \frac{Z_{WD}}{z}$$

$$k_z/S_s = (z/Z_{WD})^2 \frac{t_D}{t}$$

$$s_D = \frac{4 \sqrt{k_h k_z}}{Q} r_f$$

$$Z_{WD} = \frac{z_w}{r_f} \sqrt{\frac{k_h}{k_z}}$$

avec

k_x, k_y, k_z — coefficients de perméabilité suivant les axes x, y, z

S_s — emmagasinement spécifique

z_w — profondeur de la fracture par rapport à la limite supérieure à pression constante

r_f — demi extension latérale de la fissure équivalente

Pour l'interprétation des pompages effectués dans le forage V-1, nous avons utilisé les abaques de A. C. Gringarten et P. A. Witherspoon et ceux de J. Pitard (1976).

Les courbes de descente et de remontée obtenues au forage V-1 présentent une portion rectiligne de pente 0,5 en début de pompage, ce qui indique l'existence d'une fracturation horizontale en relation avec le puits. Les points expérimentaux (fig. 3) coïncident très bien avec les courbes théoriques de modèle mathématique utilisé (fracturation horizontale dans un aquifère semi-infini, avec éponte supérieure à pression constante et pénétration partielle du puits de production).

Ces conditions théoriques sont proches des conditions de gisement de la nappe. Les prospections géophysiques par les sondages électriques ont montré une épaisseur très grande de l'aquifère. Cependant, le degré de fissuration et la karstification en profondeur ne sont pas connus. Enfin, une extension latérale très importante de l'aquifère confirme le choix du modèle appliqué.

La superposition des courbes expérimentales à celles du modèle de fissuration convient le mieux à la courbe type des fissures horizontales avec $Z_{WD} = 1$. La superposition des points expérimentaux sur l'abaque est presque parfaite pour la remontée (fig. 4). Elle est un peu moins bonne pour la courbe de descente (fig. 3) par suite de faibles variations du débit qui n'influencent pas la courbe de remontée.

Les deux premiers points dès le début du pompage et dès son arrêt dans le cas d'une mesure de remonté s'écartent de la courbe théorique correspondante. Cela est dû à l'effet de capacité du puits ou de la postproduction qui provoquent un retard de rabattements dans le puits par rapports aux variations de la pression de l'eau dans l'aquifère.

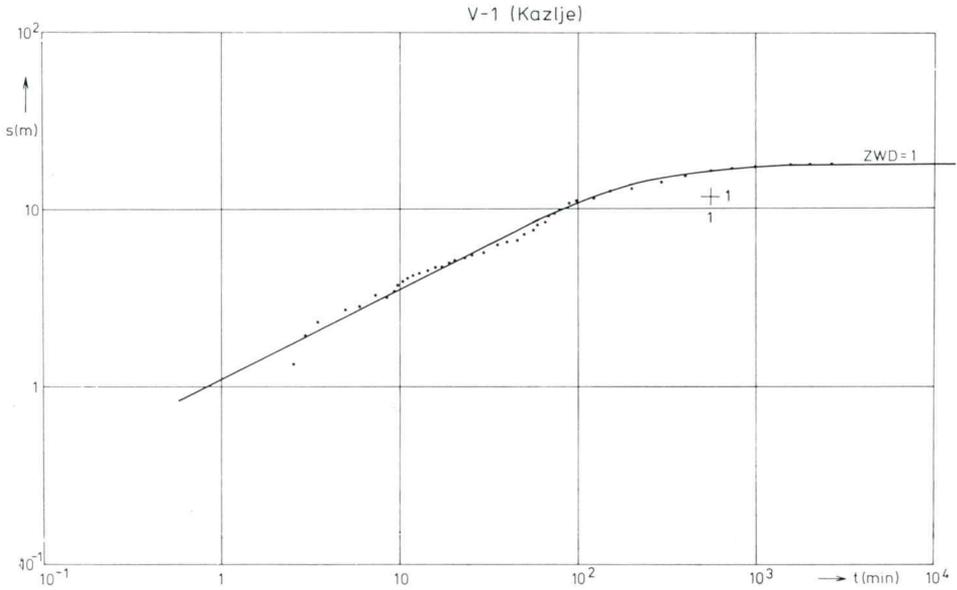


Fig. 3. Courbe type du modèle de fissuration horizontale et les points expérimentaux (abaissement, $Q = 1,1$ l/s)

Sl. 3. Tipška krivulja modela z vodoravnimi razpokami in točke dobljene pri znižanju ($Q = 1,1$ l/s)

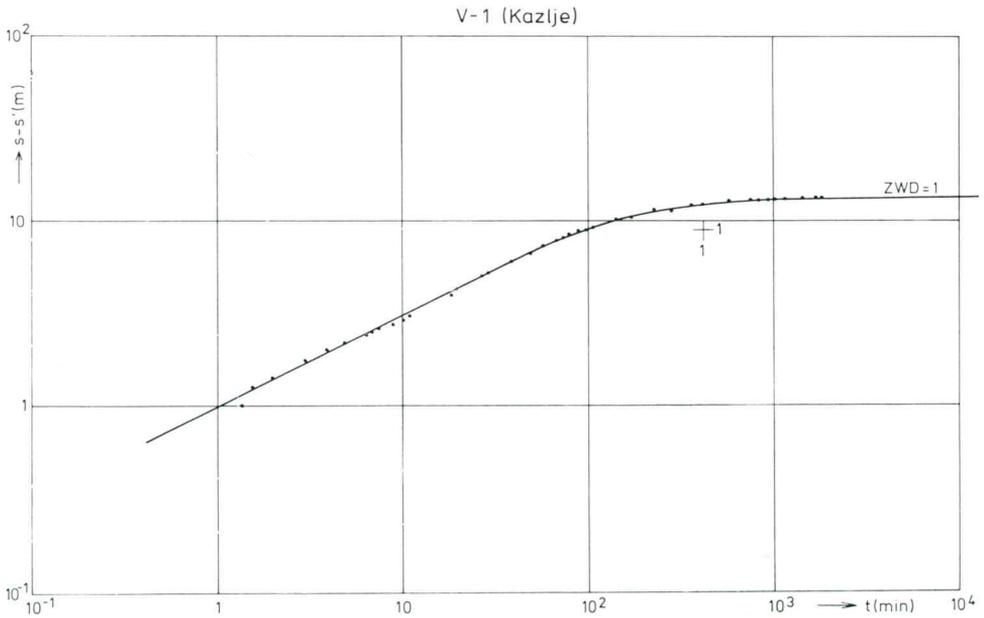


Fig. 4. Courbe théorique modèle de fissuration et les points expérimentaux (remontée)

Sl. 4. Teoretična krivulja razpoklinskega modela in točke dobljene pri dvigu

Tableau 2. Résultats d'interprétation des pompages d'essai par la méthode de Gringarten et Witherspoon effectués dans le forage V-1

Tabela 2. Rezultati interpretacije črpalnih poizkusov v vrtini V-1 po metodi Gringartena in Witherspoona

Diagramme utilisé	Z_{wD}	t en s	t_D	s en m	z_w en m	Q en m^3/s	k_h en m^3/s	k_z/S_s en m^2/s
descente	1	$3,2 \cdot 10^4$	1	11	34	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
remontée	1	$2,5 \cdot 10^4$	1	9	28	—	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$

Les résultats d'interprétation des essais sont résumés dans le tableau 2.

La superposition très satisfaisante des courbes expérimentales aux courbes théoriques du modèle de fissures horizontales montre une prédominance des circulations dans des fentes horizontales dans l'aquifère au niveau de ce site.

Les courbes de descente et de remontée débutent toutes par une portion rectiligne de pente 1/2, puis tendent vers une stabilisation au bout de deux heures environ. La durée assez longue de l'écoulement linéaire caractérisé par cette pente semblable aux cas des réservoirs de pétrole, indiquerait ici un aquifère profond; la partie rectiligne correspondante des courbes obtenues dans les aquifères peu profonds ne durant que quelques minutes (J. Pitar d, 1976).

L'interprétation des courbes par la méthode d'identification conviendrait mieux si nous disposions d'éléments de calcul de base suffisants, tels que l'emmagasinement spécifique du terrain, sa porosité ou l'épaisseur de l'aquifère.

Il semble tout de même que le modèle théorique appliqué convienne aux conditions connues de gisement de la nappe.

Méthode d'approximation logarithmique

Afin de comparer les résultats des interprétations classiques à ceux des méthodes plus spécifiques de A. C. Gringarten et P. A. Witherspoon, nous allons essayer d'interpréter les essais précédents par l'approximation logarithmique de Jacob.

L'évolution du rabattement en régime transitoire est observée lors de la descente et à la remontée du niveau au cours de deux essais.

Le graphique en coordonnées semi-logarithmiques $h = f(\log t)$ représente deux courbes de descente avec deux débits différents (fig. 5). La courbe de rabattement — log du temps pour le premier essai se décompose en trois parties:

— la première partie indique qu'il y a autour du forage un domaine conducteur franchi par l'onde de pompage après 30 minutes d'essai. Il s'agit vraisemblablement du terrain longuement développé lors de l'exécution du forage;

— la deuxième partie représente une droite qui correspond à une transmissivité apparente de $2 \cdot 10^{-5} m^2/s$ du terrain non perturbé par les travaux de forage;

— la troisième partie qui a une pente beaucoup plus faible serait due, soit à l'existence d'un drain d'alimentation, soit à un phénomène de drainance ou d'égouttement.

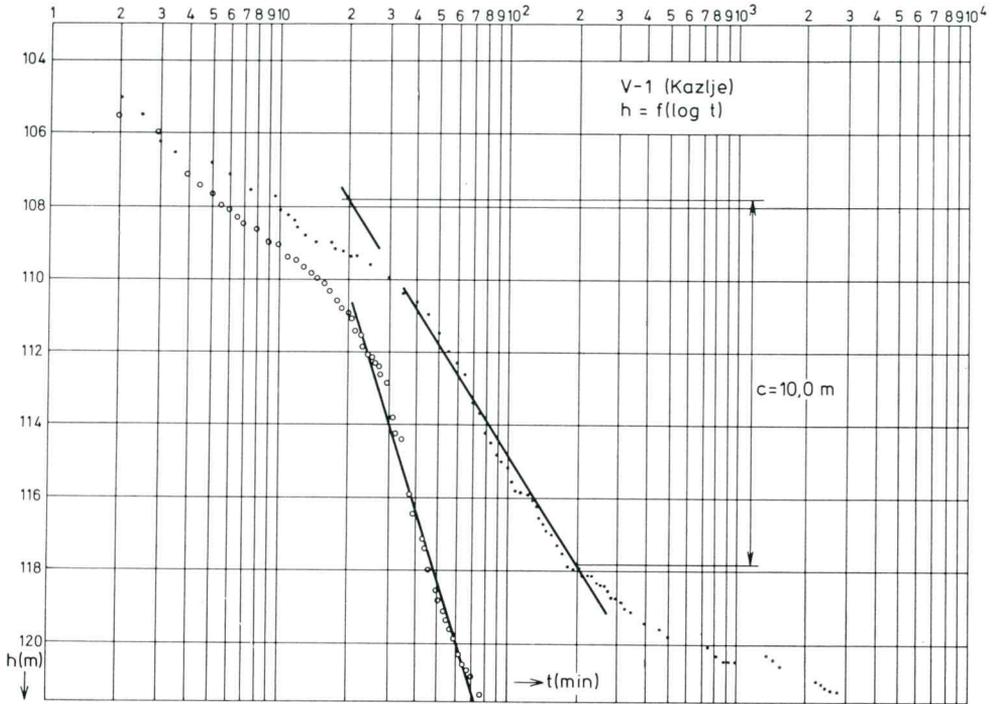


Fig. 5. Essai par pompage sur le forage V-1 (descente: premier essai — $Q = 1,1$ l/s, deuxième essai — $Q = 1,8$ l/s)

Sl. 5. Črpalni poizkus v vrtini V-1 (znižanje: prvi poizkus — $Q = 1,1$ l/s, drugi poizkus — $Q = 1,8$ l/s)

Les courbes de remontée $h = f(\log t')$ et $s = f(\log t/t')$ sont conformes à celles de descente, et permettent de calculer la même transmissivité apparente (fig. 6).

Sur le graphique rabattement résiduel — \log du t/t' (fig. 6), la droite de remontée ne passe pas par l'origine ($t/t' = 1$; $s' = 0$). La vitesse de remontée est plus grande que dans le modèle théorique.

Comme il ne peut pas y avoir de variation de coefficient d'emmagasinement, ceci serait la conséquence de la présence d'un drain d'alimentation.

Les résultats d'interprétation des essais sont résumés dans le tableau 3.

Remarque: Ne disposant pas de piézomètre, il n'est pas possible de calculer le coefficient d'emmagasinement.

Régime permanent

Deux paliers de débit en régime quasi-stabilisé vers la fin de chaque essai donnent les résultats suivants (tab. 4) d'après l'interprétation par la formule approximative de CHEZY-KRASNOPOLSKI pour l'écoulement turbulent dans les fissures aux alentours du puits:

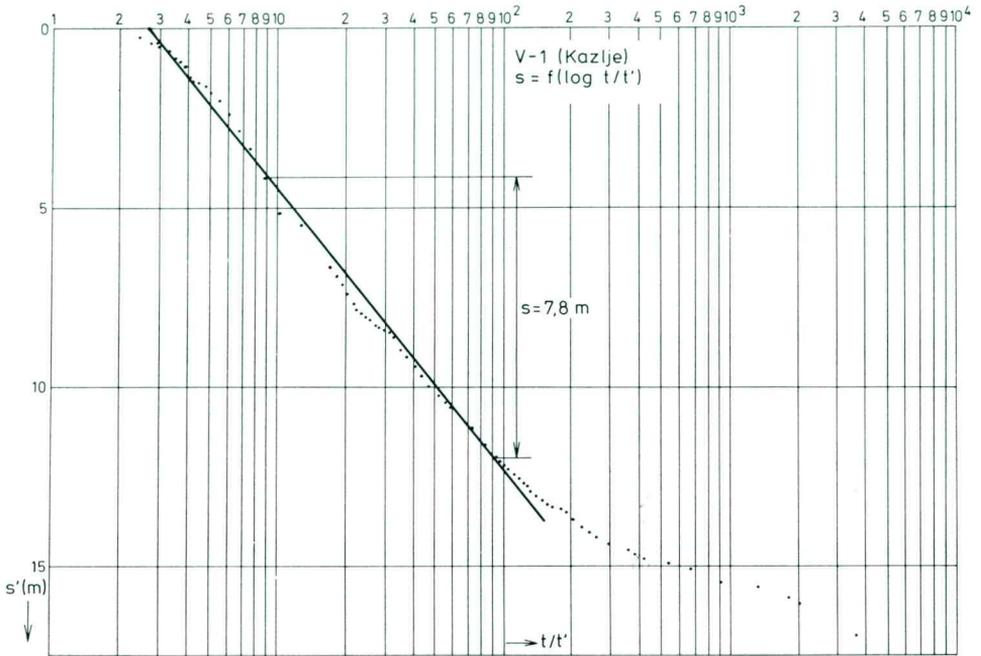


Fig. 6. Essai par pompage sur le forage V-1 (remontée)
Sl. 6. Črpalni poizkus v vrtini V-1 (dvig)

Tableau 3. Résultats d'interprétation des pompages dans le forage V-1 par la méthode d'approximation logarithmique

Tabela 3. Rezultati obdelave poizkusnih črpanj v vrtini V-1 po metodi logaritemske aproksimacije

Date d' exécution	Diagramme utilisé	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Transmissivité apparente en m^2/s
16. 3. 1977	$h = f(\log t)$	1,1	$2 \cdot 10^{-5}$
19. 3. 1977	$h = f(\log t)$	1,8	$2 \cdot 10^{-5}$
18. 3. 1977	$s = f(\log t/t')$	1,1	$3 \cdot 10^{-5}$
18. 3. 1977	$h = f(\log t')$	1,1	$3 \cdot 10^{-5}$

$$k = \frac{1}{2\pi} \frac{Q}{H\sqrt{rs}} \quad \text{avec}$$

$$H = 97 \text{ m et } r = 0,1 \text{ m}$$

Tableau 4. Résultats d'interprétation des pompages dans le forage V-1 par la méthode de Chezy-Krasnopolski

Tabela 4. Rezultati obdelave črpalnih poizkusov v vrtini V-1 po metodi Chezya in Krasnopolskega

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Conductivité hydraulique en m/s
16.-18. 3. 79	1,1	17,2	$1,4 \cdot 10^{-6}$
21.-22. 3. 79	1,5	24,5	$1,6 \cdot 10^{-6}$

Conclusion

Les essais par pompage décrits ci-dessus, bien qu'imparfaits, paraissent sur certains points satisfaisants.

L'interprétation des courbes à l'aide des théories de A. C. GRINGARTEN et H. J. RAMEY convient très bien en vue de déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère. L'application au modèle de fissuration a révélé que le forage aurait recoupé les fissures à prédominance horizontale.

La transmissivité apparente, un peu faible, donne une valeur représentative de la transmissivité du terrain de ce secteur. Il s'agit d'une zone à minces fissures assez éloignée d'un drain d'alimentation.

Du point de vue pratique, il apparaît que le forage V-1 n'est pas en mesure de fournir des débits élevés économiquement intéressants.

1.2. Forage B-1

Les observations lors des essais par pompage effectués dans le forage B-1 sont incomplètes par suite du diamètre trop faible du forage ne permettant des mesures que pour la remontée après l'arrêt du pompage.

Deux essais fournissent les valeurs suivantes de la conductivité hydraulique par la formule de CHEZY-KRASNOPOLSKI (tab. 5).

D'après un calcul approximatif à partir de l'observation de remontée en régime transitoire, on obtient une valeur de la transmissivité apparente qui se situerait entre $4 \cdot 10^{-7}$ et $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tableau 5. Résultats d'interprétation des pompages d'essai dans le forage B-1 par la méthode de Chezy-Krasnopolski

Tabela 5. Rezultati obdelave črpalnih poizkusov v vrtini B-1 po metodi Chezya in Krasnopolskega

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Hauteur d'eau en m	Conductivité hydraulique en m/s
22. 2. 1977	0,08	40,5	61,3	$1,2 \cdot 10^{-7}$
25. 2. 1977	0,12	46,6	78,7	$1,4 \cdot 10^{-7}$

1.3. Forage B-3

Le pompage du 2 avril 1977 était semblable à celui effectué dans le forage B-1 (observation de la seule remontée).

La courbe de remontée $h = f(t')$, tend vers une asymptote pour $h = 38$ m.

Sur le graphique rabattement résiduel — log du temps, les points expérimentaux s'alignent sur une droite de pente: $\Delta s = 23,4$ m qui donne, avec un débit de $0,28 \cdot 10^{-3}$ m³/s, une transmissivité apparente très faible:

$$T_a = \frac{0,183 \cdot Q}{\Delta s} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

La conductivité hydraulique calculée par la formule de CHEZY-KRASNO-POLSKI, avec une hauteur d'eau dans le forage $H = 47,3$ m et un rabattement de 32 m, est faible également:

$$K = \frac{1}{2\pi} \frac{Q}{H \sqrt{r s}} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

Le forage se révèle donc très peu productif.

1.4. Forage B-6

Les pompages se sont déroulés le 11 et 12 juillet 1977. Nous n'avons pu mesurer que la remontée par suite du diamètre trop faible. Cependant, nous avons effectué deux essais par émulsion qui ont donné les résultats suivants (fig. 7 et tableau 6).

Sur le graphique de $h = f(\log t')$, les points expérimentaux s'alignent sur deux droites (tableau 7).

Le développement progressif des fissures colmatées autour du forage s'est produit au cours du pompage. On retient donc les valeurs de $k = 9 \cdot 10^{-6}$ m/s et $T_a = 1 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

1.5. Forage B-8

Nous avons effectué deux essais de pompage à débit moyen de $0,95 \cdot 10^{-3}$ m³/s (fig. 8).

L'interprétation des essais par la méthode de CHEZY-KRASNOPOLSKI est résumée dans le tableau 8.

L'exploitation des mesures de remontée en régime transitoire, la pente ($c = 6,9$ m) étant la même pour les deux courbes, a fourni la valeur suivante de la transmissivité apparente:

$$T_a = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

1.6. Forage V-2

Les essais dans le forage V-2 ont été effectués le 13 et 14 mai 1979 avec un débit de $0,2 \cdot 10^{-3}$ m³/s.

Le niveau dynamique étant descendu au-dessous de 150 m, nous n'avons pas pu suivre l'évolution du rabattement lors du pompage par manque d'équipement.

Le rabattement étant donc supérieur à 80 m, la conductivité hydraulique k est inférieure à $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

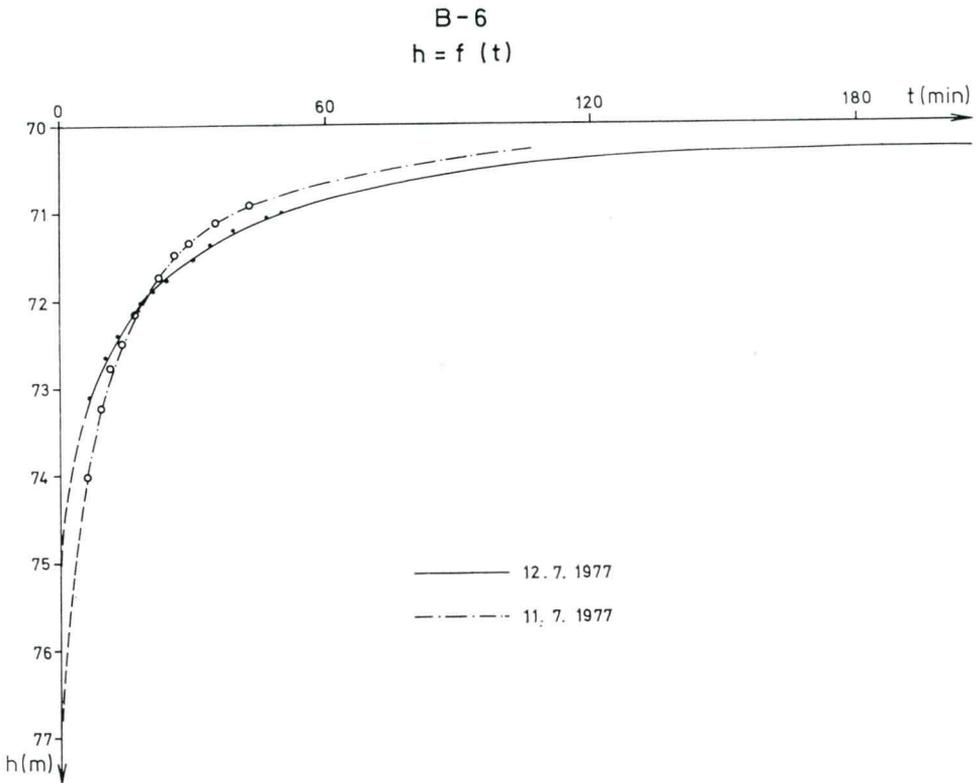


Fig. 7. Courbes de remontée dans le forage B-6: premier essai — $Q = 1,7$ l/s, deuxième essai — $Q = 1,9$ l/s

Sl. 7. Krivulji dviga po črpanju v vrtini B-6: prvi poizkus — $Q = 1,7$ l/s, drugi poizkus — $Q = 1,9$ l/s

Tableau 6. Résultats d'interprétation des essais dans le forage B-6 par la méthode de Chezy-Krasnopolski

Tabela 6. Rezultati poizkusnih črpanj v vrtini B-6 obdelanih po metodi Chezya in Krasnopolskega

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Conductivité hydraulique en m/s
11. 7. 1977	1,7	5,27	$7 \cdot 10^{-6}$
12. 7. 1977	1,9	4,07	$9 \cdot 10^{-6}$

Tableau 7. Résultats d'interprétation des pompages dans le forage B-6 par la méthode d'approximation logarithmique

Tabela 7. Rezultati obdelave črpalnih poizkusov v vrtini B-6 po metodi logaritemske aproksimacije

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$	Rabatement pour log cycle en m	Transmissivité apparente en m^2/s
11. 7. 1977	1,7	3,92	$8 \cdot 10^{-5}$
12. 7. 1977	1,9	2,42	$1 \cdot 10^{-4}$

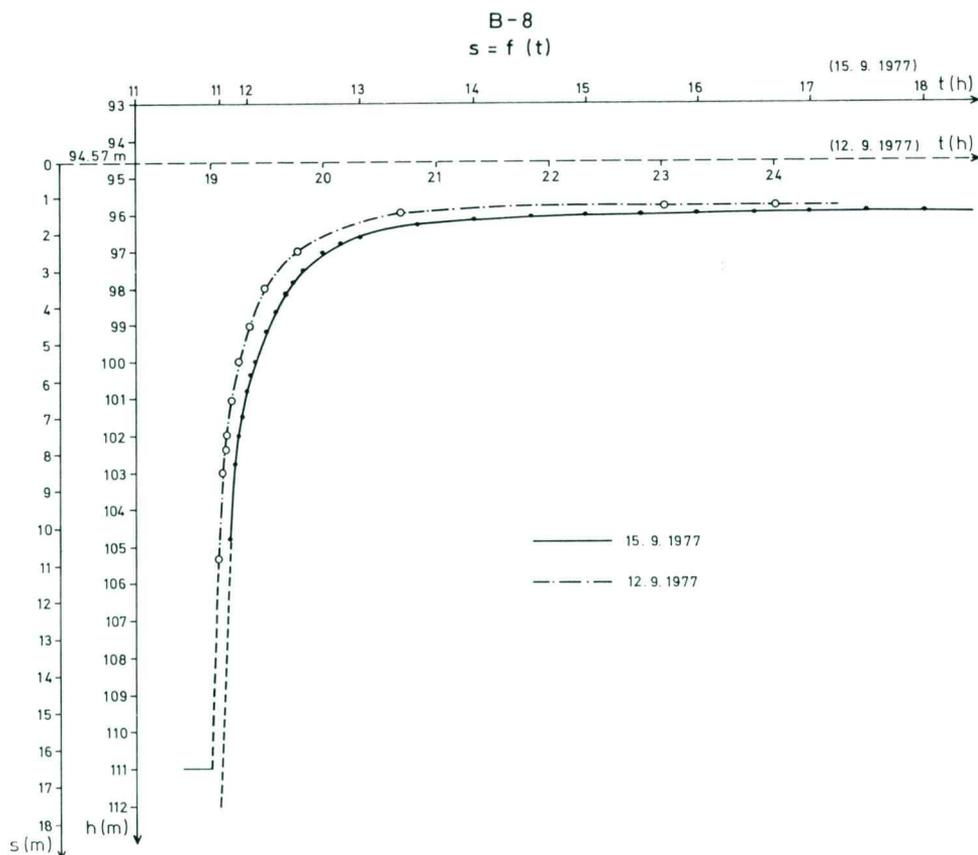


Fig. 8. Courbes de remontée dans le forage B-8 ($Q = 0,95 \text{ l/s}$)

Sl. 8. Krivulji dviga po črpanju v vrtini B-8 ($Q = 0,95 \text{ l/s}$)

Tableau 8. Résultats d'interprétation des essais par pompage dans le forage B-8

Tabela 8. Rezultati obdelave poizkusnih črpanj v vrtini B-8

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Hauteur d'eau dans le forage en m	Conductivité hydraulique en m/s
12. 9. 1977	0,95	16,4	97	$2 \cdot 10^{-6}$
15. 9. 1977	0,95	17,4	97	$2 \cdot 10^{-6}$

2. Evolution avec stabilisation rapide ou même immédiate

2.1. Forage B-2

Lors de l'exécution du forage B-2 deux pompages étaient effectués avec observations de la descente et de la remontée.

La détermination de la transmissivité est difficile du fait de la brièveté du régime transitoire. Celui-ci n'a duré que 7 minutes environ pendant la descente et 2 minutes seulement à la remontée. Une estimation de la transmissivité apparente, autour du forage, donne $2 \cdot 10^{-3}$ et $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs sont cependant très discutables.

Les résultats d'interprétation des pompages d'essai par la formule de CHEZY-KRASNOPOLSKI sont résumés dans le tableau 9.

Les paramètres hydrauliques calculés ci-dessus sont ceux d'une zone drainante de l'aquifère.

De plus, l'établissement rapide d'un régime permanent serait dû à une relation directe avec une ligne de sources (sources de Timav à 4 km du forage) ou avec un drain d'alimentation à potentiel constant.

Ce secteur mériterait d'être l'objet d'une étude hydrogéologique approfondie avec installation des équipements adéquats. C'est le lieu favorable pour l'implantation de puits d'exploitation.

Tableau 9. Résultats d'interprétation des pompages d'essai dans le forage B-2 en régime permanent

Tabela 9. Rezultati obdelave črpalnih poizkusov v vrtini B-2 v ustaljenem stanju

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Hauteur d'eau en m	Conductivité hydraulique en m/s
17. 3. 1977	4,5	0,35	37,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$
23. 3. 1977	4,5	0,35	47,1	$1,1 \cdot 10^{-4}$

2.2. Forage B-4

L'essai par pompage effectué dans le forage B-4 a duré 22 heures avec un débit moyen de $7,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Aucune variation du niveau n'a été révélée ni lors du pompage ni après l'arrêt de celui-ci.

L'établissement immédiat d'un régime permanent ne permet pas la détermination de la transmissivité.

Le forage B-4 est donc implanté dans une zone drainante de l'aquifère, à très forte diffusivité, probablement en liaison directe avec les sources de Timav. (P. Krivic, 1981).

2.3. Forage B-7

L'essai a été réalisé le 5 août 1977 avec un débit de $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ et un rabattement apparent de 0,1 m en fin d'essai.

Le calcul de la conductivité hydraulique k par la formule de CHEZY-KRASNOPOLSKI déjà citée donne le résultat suivant :

$$k = \frac{1}{2\pi} \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{70 \cdot \sqrt{0,05 \cdot 0,1}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

La grande perméabilité de ce secteur le rend intéressant pour l'implantation de puits de production.

3. Evolution des pompages avec effet de capacité et pertes de charge anormales au niveau de l'ouvrage

3.1. Forage B-5 (Drča jama)

Les essais ont été effectués du 23 au 27 mai 1977 (fig. 9). Nous avons utilisé une pompe de 6'' Pleuger immergée à — 72 m. L'eau pompée était rejetée dans une doline située à 600 m à l'est du forage.

Afin de vérifier que cette eau ne revenait pas dans le forage, un essai d'injection de la fluorescéine a été effectué dans cette doline. Il ne fut pas observé de colorant dans l'eau d'exhaure du forage B-5 et aux sources de Timav.

3.1.1. Dispositif d'observation

Les observations ont porté :

- a) sur les niveaux piézométriques (fig. 10);
 - dans le forage B-5, les niveaux ont été mesurés en permanence au moyen d'une sonde électrique;
 - dans l'aven Drča jama à intervalles irréguliers (distance 2 m du forage B-5);
 - dans l'aven Dolenca jama distant de 80 m NE du forage B-5;
 - dans le piézomètre B-1 situé à 120 m à l'ENE du forage B-5;
- b) sur les débits indiqués par le compteur de débits et vérifiés par les mesures à la capacité avec un fût de 2 m^3 .

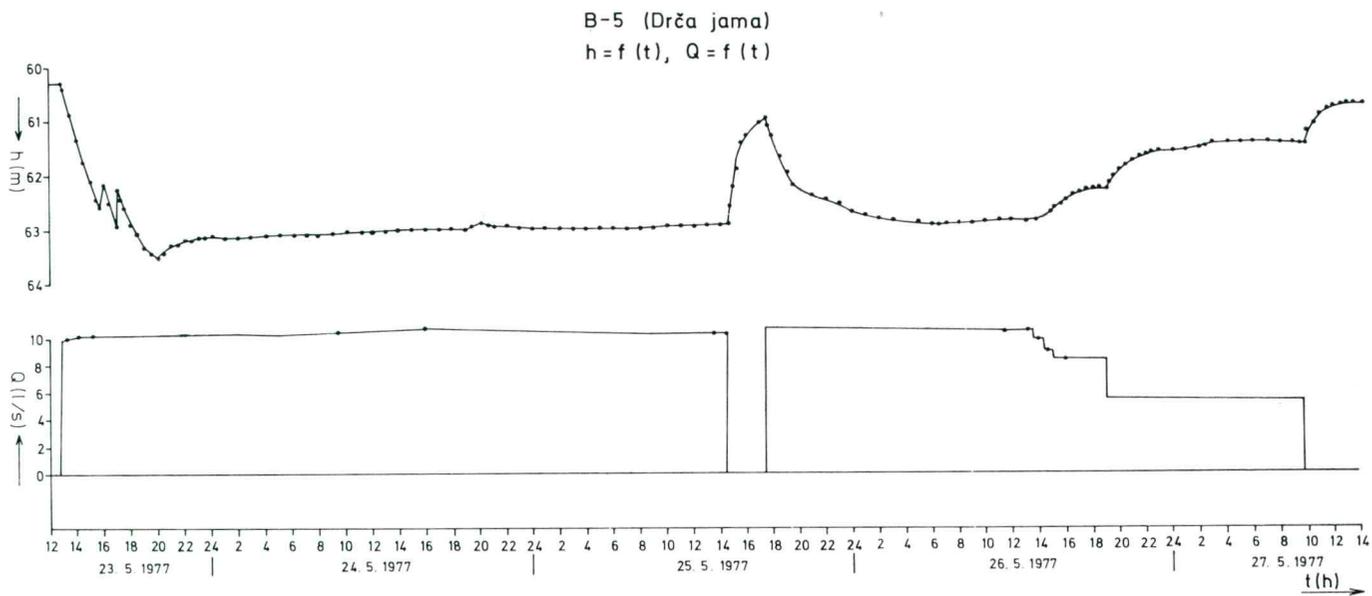


Fig. 9. Essai par pompage sur le forage B-5

Sl. 9. Črpalni poizkus v vrtini B-5

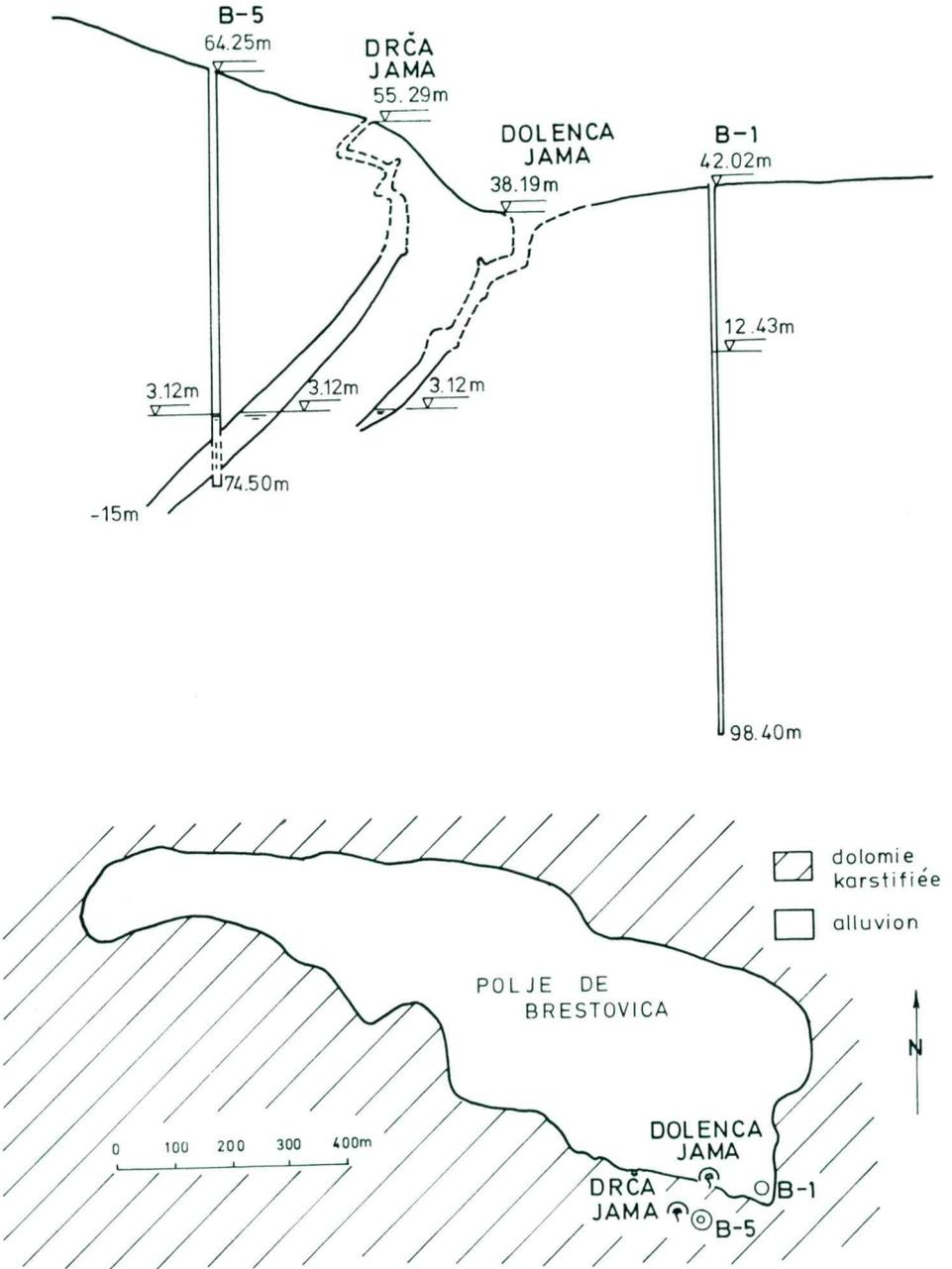


Fig. 10. Forage B-5. Coupe schématique et situation des piézomètres
Sl. 10. Vrtina B-5. Shematični prerez in situacija piezometrov

3.1.2. Déroulement des essais

Premier essai

Le premier essai a été effectué les 23, 24 et 25 mai 1977. Cet essai s'est déroulé à débit constant de 10,4 l/s pendant une durée de 50 heures. Les observations de la remontée ont été poursuivies le 25 mai jusqu'à 17 h 30.

L'abaissement du niveau dans le forage était continu dans les trois premières heures. Après 3 heures de pompage, plusieurs remontées brusques se sont produites accompagnées par des arrivées d'eau trouble, alors que le débit était constant (fig. 9 et 11). Il s'agit de nettoyage et de développement de fissures remplies d'argile aux alentours d'un chenal (grotte de Drča jama) recoupé par le forage.

Après 10 heures de pompage, le niveau était pratiquement stabilisé avec une légère remontée du fait d'un développement progressif.

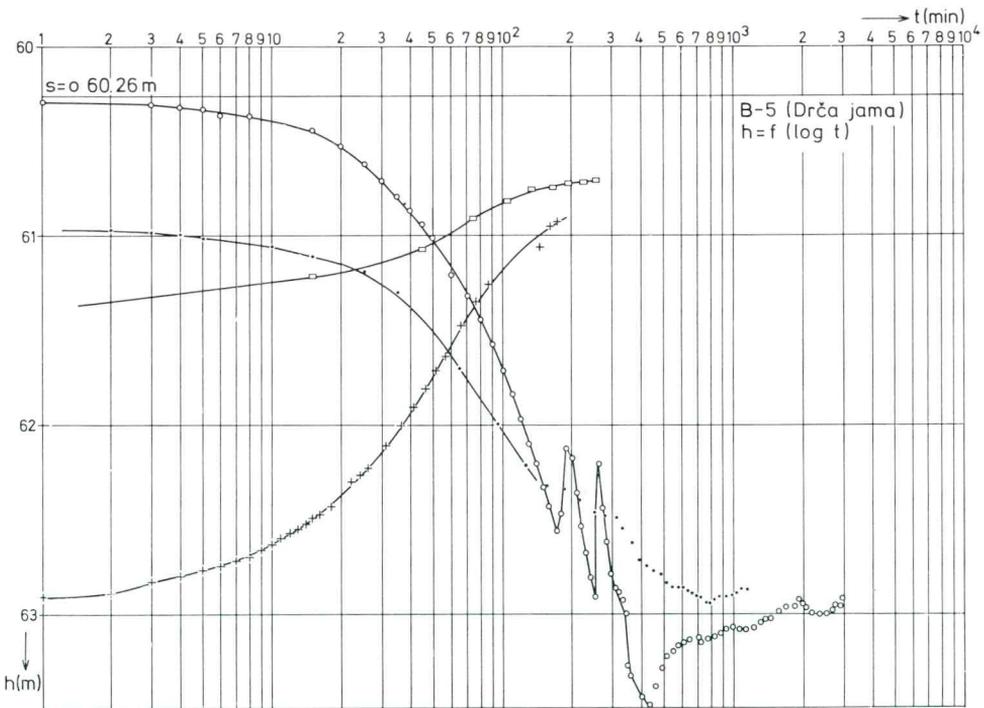


Fig. 11. Essai par pompage sur le forage B-5. Points observés: ○ — descente $Q = 10,4 \text{ l/s}$, + — remontée $Q = 10,4 \text{ l/s}$, ● — descente $Q = 10,5 \text{ l/s}$, □ — remontée $Q = 5,4 \text{ l/s}$

Sl. 11. Črpalni poizkus v vrtini B-5. Izmerjene točke: ○ — znižanje $Q = 10,4 \text{ l/s}$, + — dvig $Q = 10,4 \text{ l/s}$, ● — znižanje $Q = 10,5 \text{ l/s}$, □ — dvig $Q = 5,4 \text{ l/s}$

Deuxième essai

Cet essai s'est déroulé du 25 au 27 mai 1977, en trois paliers de débit en régime quasi-permanent; le premier palier au débit de 10,5 l/s, le deuxième au débit de 8,3 l/s et le troisième au débit de 5,4 l/s (fig. 9).

La durée totale du pompage était de 40 heures. La remontée a été observée durant 4 heures. Le régime quasi-permanent a été réalisé en fin de chaque palier de débit.

Observations dans les piézomètres

Les observations pendant le pompage ont montré que:

— Le sondage B-1 prévu comme piézomètre n'a pas réagi, le niveau étant toujours à 25,06 m sous le bord du tubage au début et à la fin du pompage.

— Avant le pompage, le niveau piézométrique dans le forage B-5 était à la même cote que dans l'aven Drča jama. Après 24 heures de pompage, le niveau a baissé de 2,78 m à B-5 et de 2,62 m à Drča jama. La différence de 16 cm entre ces deux rabattements est due aux pertes de charge dans le forage (fig. 10).

— En même temps on a mesuré un rabattement de 1,725 m dans l'aven Dolenca jama.

3.1.3. *Interprétation des essais**A — Essai de puits*

Résultats obtenus — interprétation

L'essai par paliers de débit effectué dans le forage B-5 a donné les résultats représentés dans le tableau 10.

Le débit spécifique n'est pas constant et diminue lorsque le débit Q augmente. Le graphique de $s = f(Q)$ représente une fonction parabolique du second degré (fig. 12):

$$s = 177,5 Q + 7,6 \cdot 10^3 Q^2$$

Le rabattement spécifique s/Q croît avec le débit Q . Les points expérimentaux représentant les valeurs de s/Q en fonction de Q s'alignent sur une droite (fig. 13). L'équation de cette droite s'écrit:

$$s/Q = 177,5 + 7,6 \cdot 10^3 Q$$

Tableau 10. Résultats de pompage d'essai par paliers de débit effectué dans le forage B-5

Tabela 10. Rezultati črpalnega poizkusa z različnimi črpanimi količinami v vrtini B-5

Débit en $\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$	Rabattement en m	Rab. spécifique en $\text{m}/\text{m}^3/\text{s}$	Débit spécifique en $\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
5,4	1,18	218,5	4,58
8,3	2,00	241,0	4,15
10,5	2,70	257,1	3,89

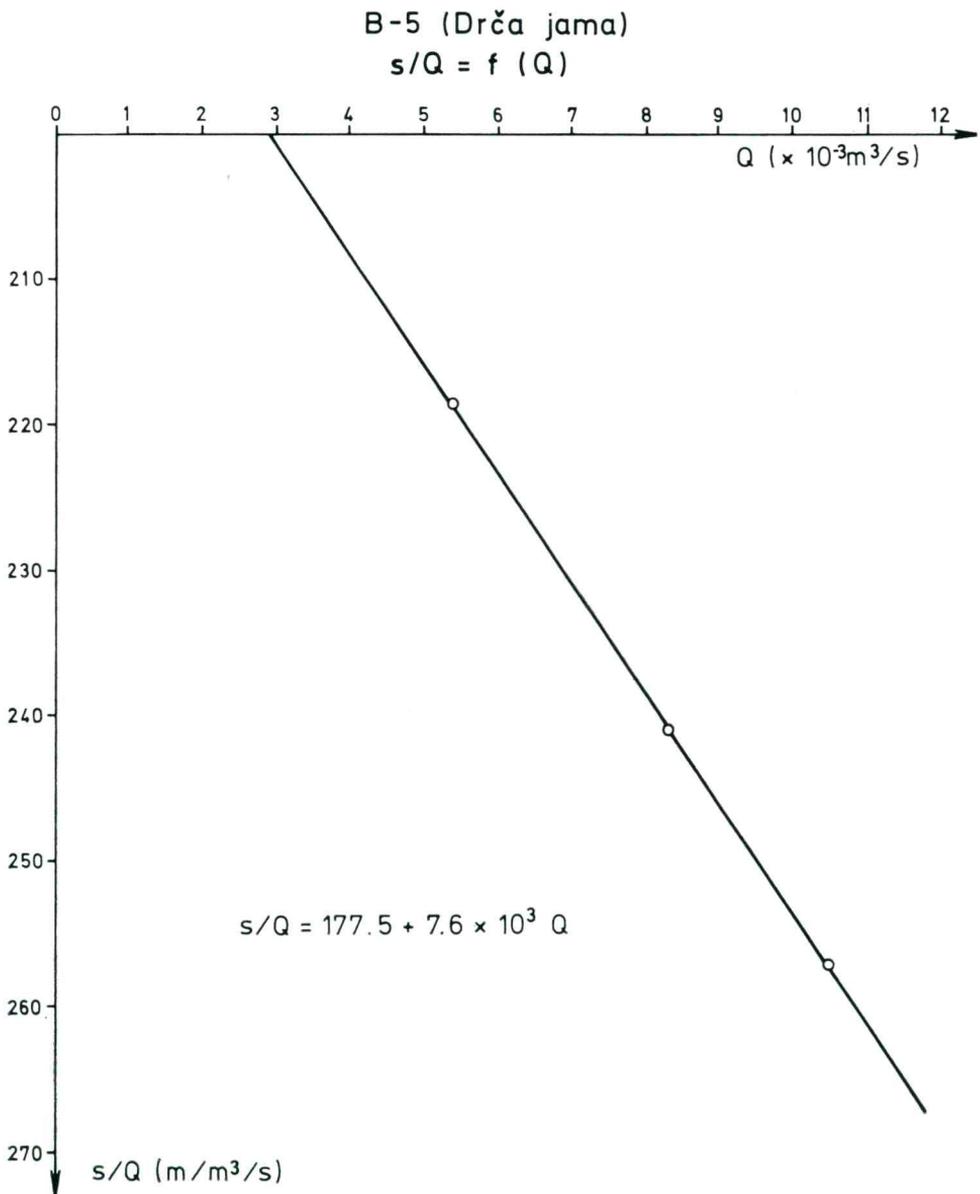


Fig. 12. Courbe caractéristique du forage B-5

Sl. 12. Krivulja odvisnosti znižanja od črpane količine za vrtino B-5

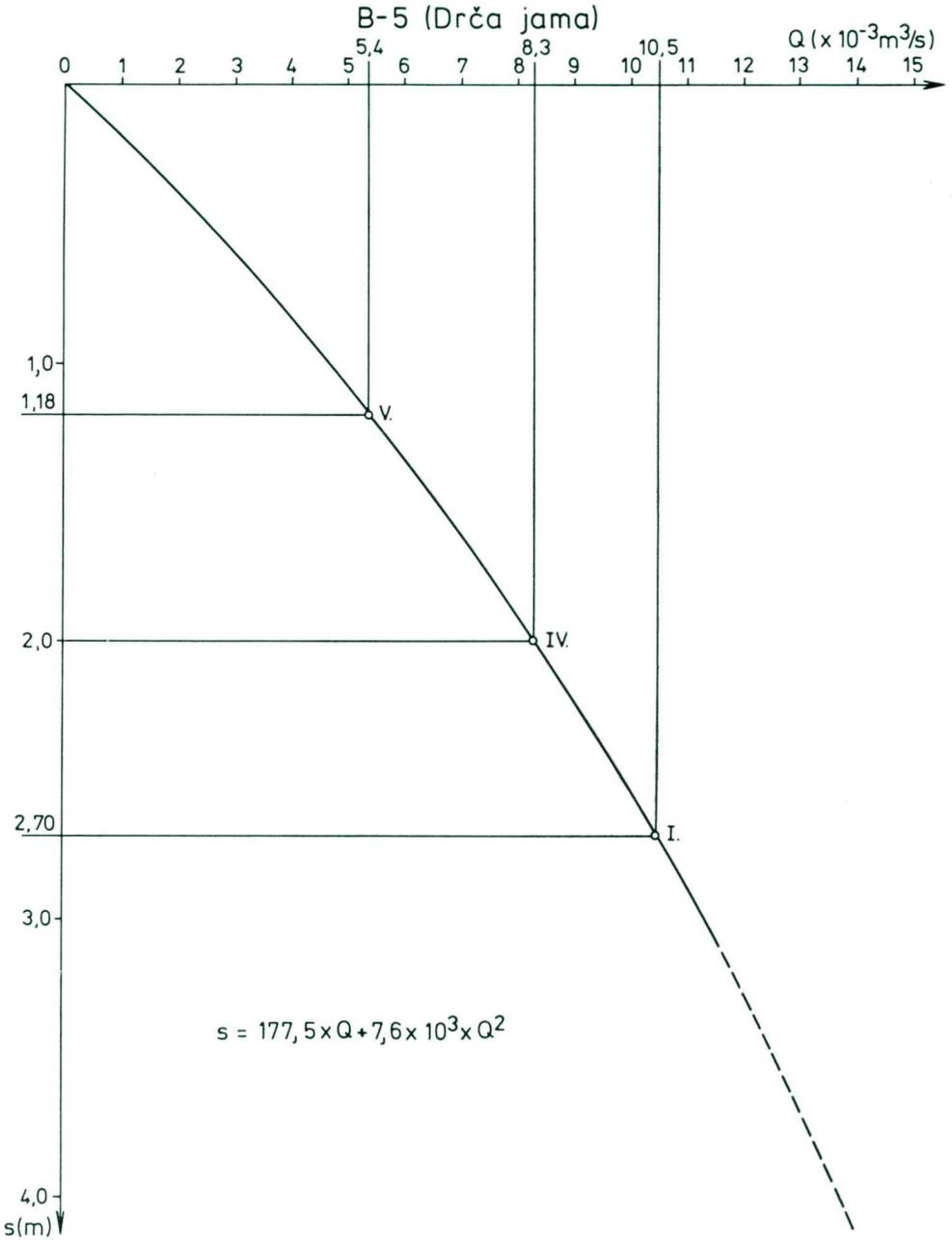


Fig. 13. Courbe débits/rabattements spécifiques pour le forage B-5
 Sl. 13. Krivulja odvisnosti specifičnega znižanja od pretoka za vrtino B-5

Débit exploitable

L'essai de puits montre que le débit spécifique du forage est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre de rabattement, compte tenu des pertes de charge dues au puits.

Le pompage au débit de $10,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a provoqué en régime stabilisé un rabattement de 2,7 m. L'extrapolation de la courbe $s/Q = f(Q)$ de la figure 13 et l'équation:

$$s = BQ + CQ^2 \text{ avec } B = 177,5 \text{ et } C = 7,6 \cdot 10^3$$

donnent pour un rabattement maximum de 12 m un débit voisin de $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Le rabattement au débit maximum à l'état actuel du forage, intègre une perte de charge parasite de l'ordre de 6 m, soit environ la moitié du rabattement total.

Vu le développement progressif et la diminution des pertes de charge dues aux décolmatage lors du pompage d'essai, on pourrait espérer avoir des débits d'exploitation supérieurs pour des rabattements équivalents.

B — Essai de nappe

Régime transitoire

L'allure des courbes en coordonnées semi-logarithmiques $h = f(\log t)$ semblables dans les deux essais (fig. 11) montre l'importance de l'effet de capacité. Il s'agit de volume d'eau contenu dans le puits et dans le chenal principal de l'aven Drča jama qui se comporte comme un puits de grand diamètre. L'effet inverse de la post-production sur l'évolution du rabattement résiduel est observé au cours de remontée du niveau (fig. 11).

Sur les courbes de la descente après 3 heures à partir du début de pompage, on remarque les anomalies déjà décrites dans le chapitre V.3.1.2. Il s'agit des remontées au cours du pompage dues au nettoyage des fissures colmatées (tab. 11).

Tableau 11. Comparaison des résultats d'analyse des courbes expérimentales par la méthode d'approximation logarithmique

Tabela 11. Primerjava rezultatov obdelave poizkusnih kri-
vulj po metodi logaritemske aproksimacije

Date d'exécution d'essai	Portion de la courbe utilisée	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Transmissivité apparente en m^2/s
23. 5. 1977	descente	10,4	$6,8 \cdot 10^{-4}$
25. 5. 1977	remontée		$9,5 \cdot 10^{-4}$
25. 5. 1977	descente	10,7	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Régime permanent

Méthode de THIEM

La détermination de la transmissivité par la méthode de THIEM avec Drča jama et Dolenca jama comme piézomètres donne les résultats suivants:

$$\begin{aligned} s_1 &= 2,62 \text{ m} \\ s_2 &= 1,73 \text{ m} \\ Q &= 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\ r_1 &= 2 \text{ m} \\ r_2 &= 80 \text{ m} \end{aligned}$$

$$T_a = \frac{Q}{2\pi (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

s_1 et s_2 sont les rabattements stabilisés dans les avens Drča jama et Dolenca jama respectivement, r_1 et r_2 sont les distances entre le puits d'essai et les piézomètres.

Ce résultat montre que la transmissivité dans la direction entre le puits et les deux grottes est un peu plus grande que la moyenne obtenue par l'interprétation en régime transitoire. C'est tout à fait normal car les deux grottes recoupent la même fracture plus ou moins ouverte en liaison directe avec le puits de production.

Méthode de CHEZY-KRASNOPOLSKI

On a appliqué la formule approximative de CHEZY-KRASNOPOLSKI déjà citée:

$$k = \frac{1}{2\pi} \frac{Q}{H \sqrt{r s}}$$

avec $H = 18 \text{ m}$ (de niveau piézométrique jusqu'au fond du puits naturel de Drča jama) et $r = 1 \text{ m}$ (rayon moyen du puits naturel).

Le pompage dans le forage B-5 a été opéré en trois paliers de débit dont les résultats peuvent se résumer dans le tableau 12.

Tableau 12. Résultats d'interprétation des pompages d'essai dans le forage B-5 en régime permanent

Tabela 12. Rezultati obdelave črpalnih poizkusov v vrtini B-5 v ustaljenem stanju

Date d'exécution	Débit en $\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	Rabattement en fin de palier en m	Conductivité hydraulique en m/s
23. - 24. 5. 77	10,5	2,70	$5,7 \cdot 10^{-5}$
26. 5. 1977	8,3	2,00	$5,2 \cdot 10^{-5}$
27. 5. 1977	5,4	1,18	$4,4 \cdot 10^{-5}$

Conclusion

La transmissivité apparente moyenne trouvée pour les dolomies dans ce secteur de l'ordre de $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, montre que le forage a été placé dans une zone drainante du système aquifère.

L'interprétation des courbes $\log s = f(\log t)$ par application des modèles de fissuration n'a pas été possible à cause de l'effet de capacité du puits, non négligeable, qui masque l'évolution normale des rabattements en premières heures du pompage. C'est la période la plus intéressante pour l'interprétation par cette méthode.

Les pompages d'essai que nous avons effectués en mai 1977, ont montré qu'il peut être envisagé pour le forage B-5 un débit d'exploitation proche de $30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

CHAPITRE VI

Synthèse des résultats

Des dix essais par pompage que nous avons décrits et interprétés, il n'y en a que deux qui soient très complets. Il s'agit des essais effectués sur les forages B-5 et V-1.

Les autres essais ne sont souvent que très sommaires à cause des difficultés techniques rencontrées.

Nous présentons la synthèse des résultats d'interprétation dans le tableau 13.

La comparaison des valeurs de paramètres hydrodynamiques résumées dans le tableau ci-dessus montre bien l'hétérogénéité caractéristique du milieu fissuré et karstique.

Tableau 13. Récapitulation des résultats d'interprétation des essais par pompage

Tabela 13. Primerjava rezultatov črpalnih poizkusov v različnih vrtinah

Forage	Transmissivité apparente en m^2/s	Conductivité hydraulique en m/s
B-1	$4 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-7} - 1,4 \cdot 10^{-7}$
B-2	$2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-4} - 1,4 \cdot 10^{-4}$
B-3	$2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$
B-4	$>1 \cdot 10^{-1}$	$>1 \cdot 10^{-3}$
B-5	$7 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-5} - 5,4 \cdot 10^{-5}$
B-6	$1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$
B-7		$7 \cdot 10^{-5}$
B-8	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
V-1	$2 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-6}$
V-2		$<1 \cdot 10^{-9}$

En ce qui concerne la forme des courbes, on peut distinguer:

a) les pompages qui évoluent selon un régime transitoire tel qu'on peut l'observer dans un milieu poreux homogène. Il s'agit des forages qui ne recoupent que des réseaux de fissures fines. L'écoulement serait semblable ou voisin de l'écoulement de Darcy: dans les domaines (C. Louis, 1974) de l'écoulement laminaire parallèle et non parallèle. C'est le cas des essais effectués sur les forages B-1, B-3, B-6, B-8 et V-1.

b) les pompages dans des forages qui recoupent les chenaux ou conduits, ou se situent à proximité de ceux-ci dans les zones drainantes. Au cours du pompage dans les forages de ce type, le régime transitoire est très court ou même inexistant et l'établissement quasi-instantané d'un régime permanent entraîne une stabilisation rapide après le début de pompage. Le régime d'écoulement est très probablement turbulent, donc en dehors des limites de validité de la loi de Darcy. Il s'agit des essais effectués sur les forages B-2, B-4 et B-7.

Dans les deux cas, l'effet de capacité de puits, l'effet de la drainance ou d'égouttement, l'effet de développement progressif lors de pompage dû au décolmatage des fissures remplies d'argile, et l'effet des conditions aux limites (limites étanches et limites à potentiel constant), peuvent se surajouter à l'évolution des rabattements et modifier ainsi la forme des courbes. Les essais effectués sur le forage B-5 représentent un exemple d'influence de ces facteurs.

Suivant la schématisation de l'hétérogénéité d'un aquifère karstique (C. Drogue, 1971, 1974) dans lequel on distingue des zones drainantes (des chenaux ou conduits drainants), juxtaposées aux sous-systèmes (zones peu perméables), nous avons groupé dans le tableau 14 les secteurs des forages

Tableau 14. Synthèse des résultats: position des périmètres expérimentaux dans le modèle global du milieu karstique

Tabela 14. Sinteza rezultatov: položaj poizkusnih področij v splošnem modelu kraške vodonosne sredine

Secteur de forage étudié	Paramètres hydrodynamiques		Position dans le modèle du système aquifère karstique	Aptitude pour l'implantation des puits de production
	Conductivité hydraulique en m/s	Transmissivité apparente en m ² /s		
B-4	$>10^{-3}$	$>10^{-2}$	Sur le drain ou à sa proximité immédiate	Possibilité d'installation des captages d'importance régionale
B-2 B-5 B-7	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^{-4}$		
V-1 B-6 B-8	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-4} - 10^{-5}$		
V-2 B-1 B-3	$<10^{-6}$	$<10^{-5}$	Domaine peu perméable	Captages pour les besoins locaux Inutilisable

étudiés selon leur position dans le schéma du système aquifère et aussi d'après leur aptitude pour l'implantation des puits de production.

Les courbes débits/rabattements $s = f(Q)$ de quelques forages mettent aussi en évidence l'hétérogénéité du milieu karstique (fig. 14).

N. B.: Le puits de production VB-4 (ϕ 609/400 mm, profondeur 70 m) se situe à la proximité du forage de reconnaissance B-4 (fig. 15 et 16).

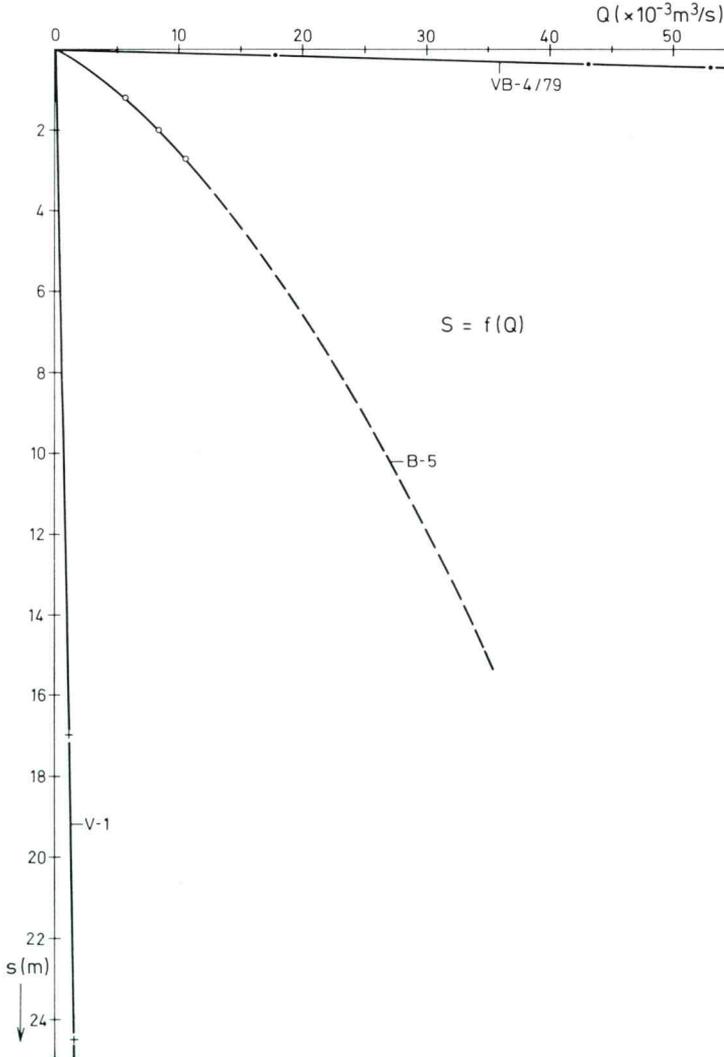


Fig. 14. Courbes caractéristiques des forages V-1, B-5 et VB-4/79

Sl. 14. Krivulje odvisnosti znižanja od črpane količine za vrtine V-1, B-5 in VB-4/79

Nous voyons donc que:

— les forages étudiés sont tous aquifères (100 %),

— chaque forage appartient, conformément au schéma du milieu karstique proposé par C. Drogue (1971, 1974), soit aux zones drainantes à forte transmissivité de 10^{-4} m²/s jusqu'à 10^{-1} m²/s et plus (40 % des cas), soit aux sous-systèmes, domaines peu perméables,

— 70 % des lieux explorés par les forages cités ci-dessus peuvent fournir des débits suffisants pour l'alimentation en eau, soit pour les besoins locaux, soit régionaux.

La production possible des forages par rapport à la capacité de la nappe est très faible. Les forages de reconnaissance que nous avons testés dans le cadre de ce travail ne sont pas prévus pour la production. On envisage l'implantation de puits de production dans les lieux situés sur les zones drainantes (chenaux ou conduits), explorés par les forages de reconnaissance. Le débit de production de ces puits peut atteindre, dans des conditions favorables, 100 l/s et plus par puits (P. Krivic & F. Drobne, 1980). C'est pourtant très peu par rapport à la capacité de la nappe dont le débit sortant d'étiage à l'exutoire est estimé à 10 m³/s (E. Boegan, 1938; C. D'Ambrosi, 1952; F. Bidovec, 1957 et 1965), ce qui nous donne une idée d'importance des réserves régulatrices de l'aquifère. Les réserves globales sont, certes, encore plus grandes. Les forages, même s'ils recoupent des fentes ou des chenaux, se comportent comme des mauvais robinets de la nappe. C'est en quelque sorte un frein pour la mise en vidange de la réserve aquifère.

Conclusion générale

L'étude du fonctionnement de l'aquifère karstique, par différentes approches présentées ici et dans les travaux Krivic, 1982a et 1982b, a permis d'obtenir un ensemble de valeurs cohérentes caractérisant le milieu.

L'étude statistique des données piézométriques, pluviométriques et hydro-métriques à l'échelle journalière s'est avérée riche d'enseignement. Par cette analyse, il a été possible de se faire une première idée du comportement de l'ensemble de l'aquifère, de délimiter les zones de fonctionnement semblable, et d'apporter des données quantitatives qui seront utiles dans le déroulement ultérieur de l'interprétation hydrodynamique. L'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques, apparaît également comme un outil intéressant permettant d'obtenir des paramètres de l'aquifère, telle que la diffusivité.

Contrairement à l'étude des variations naturelles des niveaux piézométriques, dans laquelle nous avons considéré le système karstique dans son ensemble, les essais par pompage sur les forages fournissent des valeurs locales des paramètres hydrodynamiques.

En tenant compte du fait que les méthodes d'interprétation ne sont pas toujours précises, on cherche surtout à caractériser numériquement les réponses des forages aux pompages, plutôt que définir des valeurs des paramètres hydrodynamiques rigoureuses. Ceci permet, cependant, de comparer entre eux des secteurs de l'aquifère. Ce n'est pas très satisfaisant du point de vue strictement scientifique, mais il s'agit d'une approche nécessaire dans une reconnaissance en vue d'exploitation des ressources.

L'aquifère karstique est affleurant; pourtant, globalement son comportement est apparemment semblable à celui d'une nappe captive ou semi-captive. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que lors des régressions du Quaternaire, des niveaux de karstification ont pu se développer à des cotes inférieures au niveau actuel de la mer et permettre ainsi la mise en place de niveaux conducteurs dans les parties basses de la zone saturée.

Cet état de chose ne doit pas être spécifique à la région de Trieste, mais doit se présenter sur les karsts périméditerranéens, car les régressions marines intéressent l'ensemble de ce domaine.



Fig. 15. Essai par pompage sur le forage VB-4/81. Débit 55 l/s
Sl. 15. Črpalni poizkus v vodnjaku VB-4/81 s pretokom $Q = 55 \text{ l/s}$

De cela, il résulte que l'on peut, d'une part, trouver des exutoires sous marins importants pour les karsts littoraux, et, d'autre part, espérer des fortes conductivités sur des forages profonds.

En contre partie, les contaminations par des invasions d'eau salée dans ces aquifères pourront être importantes.

Dans l'introduction de ce travail, nous posons la question de la justification de recherches spécifiques dans une étude appliquée.



Fig. 16. Traçage des eaux pompés du puits VB-4/79 qui disparaissent dans la perte près de Klariči à la distance de 1000 m du puits

Sl. 16. Sledilni poizkus pri vrodu v kaverno pri vasi Klariči, kjer izginja voda izčrpana iz 1000 m oddaljenega vodnjaka VB-4/79

Dans le karst étudié, la réponse semble être positive, puisque l'analyse d'un phénomène très particulier, comme l'effet de marée, par exemple, permet de calculer des paramètres hydrodynamiques utilisables pour la compréhension de la structure du magasin, utile au développement de recherches appliquées.

Au-delà de ce travail, on peut penser qu'il sera possible d'obtenir à partir des modèles probabilistes du type «boîte noire», des renseignements plus précis sur la structure et les paramètres caractéristiques du milieu. Bien entendu, pour cela, il serait nécessaire de disposer d'observations beaucoup plus denses et régulièrement réparties sur toute l'étendue de l'aquifère.

La poursuite de ces études se justifierait par l'importance économique des ressources en eau pouvant être exploitées.

Študija hidrodinamike kraškega vodonosnika

Povzetek

(Povzetek vseh treh delov skrajšanega teksta doktorske disertacije, od katerih sta prva dva dela izšla v 25. knjigi, tretji del pa v 26. knjigi revije GEOLOGIJA.)

Študija obravnava hidrodinamiko kraško-razpoklinskega vodonosnika na področju Krasa v jugozahodni Sloveniji. Obravnavani kraški sistem je razmera velik, saj pokriva površino okrog 500 km². Vodonosnik se napaja s padavinami, z letnim povprečjem preko 1400 mm in na robovih z rekami, ki pritekajo z nekraškega flišnega površja, kot reka Reka, Vipava in Raša ali preko aluvijalnega vodonosnika Soče, ki je na severozahodnem delu Krasa v kontaktu s karbonatnimi kamninami. Na razvitost podzemskega odtoka kaže dejstvo, da ni nobenih površinskih vodnih tokov za dreniranje kar 500 km² velikega kraškega platoja. Vodonosnik se prazni ob severnem robu Tržaškega zaliva med Nabrežino, Devinom in Trzičem na italijanskem ozemlju. Najpomembnejši so izviri Timava pri Štivanu, Brojnice pri Nabrežini, Moščenice, Lizert, Sardoč in Sabličiči. Vzdolž obale Tržaškega zaliva od Devina do Nabrežine pa so tudi številni podmorski izviri. Skupni pretok vseh izvirov ni bil nikdar izmerjen, po ocenah pa minimalni pretok presega 10 m³/s. Na severnem in severovzhodnem delu Krasa smo izvrtali 10 vrtin, ki smo jih po poizkusnih črpanjih uporabili kot piezometre.

V prvem delu študije (Krivic, 1982a) so s pomočjo statističnega modela obravnavana naravna nihanja piezometričnih nivojev podtalnice v odvisnosti od padavin in pretokov rek, ki napajajo vodonosnik. Obdelani so bili odnosi med kronološkimi serijami pretokov rek in podatki o dnevnih višinah padavin, kot vstopnimi podatki in dnevnimi višinami gladine podtalnice v piezometrih kot odgovori na impulze padavin in površinskih voda, ki napajajo vodonosnik. Za študij dolgih časovnih serij smo pripravili program za obdelavo zbranih podatkov in avtomatsko risanje sintetičnih diagramov. Statistična analiza med neodvisnimi spremenljivkami »pretok« in »padavine« in odvisno spremenljivko »piezometrična gladina« je bila izdelana po enostavni metodi linearne korelacije. S korelacijami med nivoji posameznih vrtin smo ugotovili reprezentativnost piezometrov in določili vrtine, ki so locirane v glavnih drenažnih conah in tiste, ki so v slabo prepustnih blokih. Pri korelacijah »padavine« — »piezo-

metrični nivo« in »pretok« — »piezometrični nivo« smo vpeljali tudi faktor časa in ugotovili, da se vpliv dežja, ki pade pri meteoroloških postajah v Senožečah, Opatjem selu, Biljah in Matavunu pozna v vrtinah pri Brestovici po 2 do 3,5 dneh, navidezna hitrost prenašanja piezometričnih valov v vodonosniku pa je 730 m/h v smeri od ponora reke Reke proti izviru Timava, od Soče 200 m/h in od ponorov Vipave 150 m/h, v smeri proti piezometrom v dolini Brestovice.

Drugi del študije (Krivic, 1982b) obravnava razširjanje valov plime in oseke v obalnem vodonosniku Krasa. V vrtinah na področju Brestoviške doline, ki so oddaljene 4000 m od morske obale, so bila že v letih 1977 in 1978 s pomočjo limnigrafov registrirana nihanja z amplitudami od 2 do 10 cm. Pri analizi periodičnih nihanj smo preizkusili več hidrogeoloških modelov. Znanim geološkim razmeram najbolje ustreza model vodonosnika pod pritiskom z delno vodotesnostjo krovnine drenažne cone. Ta model omogoča tudi najboljšo rekonstrukcijo v vodonosniku opazovanih nihanj, enako kot tudi model vodonosnika s prosto gladino in vplivom izcejanja. Gotovo je, da vodonosnik ni niti s prosto gladino, niti popolnoma pod pritiskom. Velika razlika med hitrostjo razširjanja piezometričnih valov (730 m/h) in dejansko hitrostjo pretakanja vode v vodonosniku (90 m/h) in efekt delne vodotesnosti krovnine, ki je blizu 1 ($\beta = 1,141$), kažejo na to, da je velik del pretoka v vodonosniku pod pritiskom. Ocenjena difuzivnost na osnovi črpalnih poizkusov v vrtini B-4 naj bi znašala za vodonosnik pod pritiskom od 100 m²/s do 1000 m²/s. Po uporabljenem modelu pa naj bi bila difuzivnost drenažne cone, v kateri se nahajajo izviri in vrtine pri Klaričih, 200 m²/s, torej v mejah za vodonosnik pod pritiskom z delno vodotesnostjo krovnine drenažne cone.

Proučevanje hidrodinamike s pomočjo naravnih nihanj gladine podtalnice zaradi napajanja iz padavin in rek in zaradi plimovanja, ki zajamejo velike dele vodonosnika, pa v tem članku dopolnjujejo s črpanji umetno povzročena nihanja podtalnice, ki dajejo točkovne vrednosti hidrodinamičnih parametrov. Kraški vodonosnik ni pokrit z neprepustnimi plastmi, kljub temu pa deluje kot zaprt ali polzaprt vodonosnik, kar razlagamo z zakrsevanjem pod današnjo gladino morja med regresijami v pleistocenu. Tako so nastale današnje cone dobre prevodnosti v spodnjem delu zasičenega dela vodonosnika. Podatki raziskovalnih vrtin kažejo na veliko heterogenost krasa, saj dosežejo vrtine locirane v drenažnih conah navidežno transmisivnost 10⁻¹ m²/s in več, v vmesnih blokkih pa je le-ta lahko tudi 100 000-krat manjša. Izdatnost vrtin v primerjavi s kapaciteto vodonosnika je zelo majhna. Raziskovalne vrtine obravnavane v tej študiji niso predvidene za izkoriščanje. Možna pa je izdelava črpalnih vodnjakov v ugotovljenih drenažnih conah, z izdatnostjo preko 100 l/s po vodnjaku. Pri Klaričih je sedaj zajeto kar 250 l/s vode za vodooskrbo Krasa in Sežane, raziskave pa kažejo, da bo mogoče v Brestovici zajeti tudi preko 1000 l/s zdrave pitne vode.

Bibliographie

Bidovec, F. 1957, Prispevek Notranjske Reke k vodnim množinam kraških izvirov v povodju Timava. 10 let hidrometeorološke službe, Zbornik H. M. Z., pp. 29—43, Ljubljana.

Bidovec, F. 1965, The hydrosystem of karstic springs in the Timavo Basin. Actes Coll. Dubrovnik, AIHS-UNESCO, Vol. 1, pp. 263—274, Paris.

Boegan, E. 1938, Il Timavo. Mem. Inst. Ital. Speleol., 251 p., Trieste.

Bogomolov, G. V. & Silin-Bekčurin, G. V. 1959, Specialnaja gidrogeologija, Moskva (traduction serbo-croate), Specijalna hidrogeologija, Gradj. knjiga, 208 p., Beograd.

Castany, G. & Margat, J. 1977, Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM, 249 p., Orléans.

D'Ambrosi, C. 1952, Osservazioni Geo-idrologiche preliminari presso Trieste. Boll. Soc. Adr. Sc. Nat., Vol. 46, pp. 75—90, Trieste.

Drogue, C. 1971, De l'eau dans le calcaire. Sc. Pro. Découverte, éd. Dunod, no 34433, pp. 39—46, Paris.

Drogue, C. 1974, Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux de forages. C. R. Acad. Sc. Paris, 278, Série D, pp. 2621—2624, Paris.

Hu Khiam, 1973, Résultats d'essais par pompages réalisés sur quelques forages des karst de la région montpelliéraine. Thèse Doct. spéc., 130 p., Montpellier.

Krivic, P. & Drobne, F., 1980, Hidrogeološke raziskave Tržaško-komenskega krasa. Zbornik 6. Jug. simp. hidrogeol. inž. geol., 1, pp. 233—239, Portorož.

Krivic, P. 1981, Étude hydrodynamique d'un aquifère karstique côtier: le Kras de Slovénie, Yougoslavie. Thèse Doct. Ing. Univ. Montpellier. 108., Montpellier.

Krivic, P. 1982 a, Variations naturelles de niveau piézométrique d'un aquifère karstique. Geologija, 25/1, 129—150, Ljubljana.

Krivic, P. 1982 b, Transmission des ondes de marée à travers l'aquifère côtier de Kras. Geologija, 25/2, 309—325, Ljubljana.

Kruseman, G. P. & De Ridder, N. A. 1974, Interprétation et discussion des pompages d'essai. I. L. R. I., 213 p., Wageningen.

Louis, C. 1974, Introduction à l'hydraulique des roches. Bull. BRGM, 2 ème série, séction III, no 4, pp. 283—356, Orléans.

Marjolet, G. & Salado, J. 1975, Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez. Mémoires C. E. R. G. H., 101 p., Montpellier.

Pitard, J. 1976, Contribution à l'interprétation des essais par pompages dans les roches fissurées. Thèse Doct. spéc., 98 p., Montpellier.

Rayneau, C. 1972, Contribution à l'étude des écoulements autour d'un forage en milieu fissuré. Thèse Doct. Ing., 59 p., Montpellier.