

Sborník geologických věd	Hydrogeologie, inž. geologic, 20	Str. 61–66	3 obr.	– tab.	– přil.	ČGÚ Praha 1994	ISBN 80-7075-174-6 ISSN 0036-5289
-----------------------------	-------------------------------------	---------------	-----------	-----------	------------	-------------------	--------------------------------------

## Prognóza snížení hladiny podzemní vody na úpatí Krušných hor postupem povrchové těžby uhlí – matematický model AQUIFEM 1

### Prognosis of groundwater level decrease due to the progressing open pit coal mining at the foot of the Krušné hory Mts. – groundwater flow model AQUIFEM 1

JOSEF HORÁK<sup>1</sup>

Předloženo 1. října 1990

1 : 50 000: 02-31

Key words: Hydrogeology, Groundwater, Hydraulics, Mathematical models

HORÁK, J. (1994): Prognóza snížení hladiny podzemní vody na úpatí Krušných hor postupem povrchové těžby uhlí – matematický model AQUIFEM 1. – Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol., 20, 61–66. Praha.

Výtah: Stručné seznámení s matematickým modelem AQUIFEM 1, řešícím dvojrozměrné proudění podzemní vody při použití metody konečných prvků. Model byl prakticky použit při prognóze ovlivnění hladin krystalinika na úpatí svahů Krušných hor vlivem postupu těžby uhlí lomem VČSA v období let 1990–2030. Modelové řešení bylo jedinou možností stanovit hladiny podzemní vody pro posouzení stability svahů ve výpočtových profilech.

<sup>1</sup> Aquatest, SG Inc., Geologická 4, 150 00 Praha 5

#### Popis modelu AQUIFEM 1 podle kritérií Mezinárodního ústavu pro systémovou analýzu (IASA)

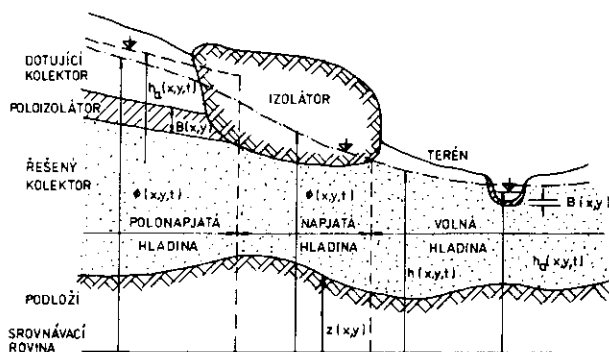
Modelový systém: dvojrozměrné proudění podzemní vody ve zvodněném kolektoru s napjatou i volnou hladinou při použití metody konečných prvků (trojúhelníková síť) – viz obr. 2.

Cíl: výpočet úrovní a změn úrovní hladiny podzemní vody v ploše a čase.

Časové měřítko: výpočet volitelný v denních intervalech, délka neomezena.

Hraniční podmínky: tři typy vnějších a vnitřních hraničních podmínek –  $H = \text{konst.}$ ,  $q = \text{konst.}$ ,  $q = f(H)$ .

Vstupy: vstupní data sestávají z hydrogeologických parametrů horninového prostředí (báze, mocnosti) a definování hraničních podmínek, doplněné hydrologickými bilančními prvky (infiltrace, výpar, povrchové odtoky) a uvažováním umělých zásahů.



1. Řez definující hypotetický zvodněný kolektor.

Výstupy: úrovně hladiny podzemní vody v čase, změny úrovně hladin oproti výchozímu stavu, bilance přítoků a odtoků v řešeném území.

Omezení: přesnost omezená spolehlivostí a reprezentativností vstupních dat, znalostí odtokových poměrů území a výší přesnosti iterativních výpočtů časových kroků.

Počítač: původní program sestaven pro IBM-370-168, ve Stavební geologii upraven pro minipočítač (I-102-F) a počítače kompatibilní s IBM-PC.

Programovací jazyk: FORTRAN IV.

Náklady: řešení problematiky jednoho území (300–500 uzlů sítě) v podmínkách ustáleného a neustáleného proudění včetně verifikace výchozího stavu a grafické dokumentace – podle strojového času I-102-F činí cca 25 000 Kč.

Kalibrace: kalibrován podle analytických řešení radiálního ustáleného proudění (Dupuitova rovnice) a neustáleného proudění (Theisova rovnice).

Demonstrace: přehled použití modelu uvádějí TOWNLEY a WILSON (1980) a WILSON, TOWNLEY a SA DA COSTA (1979).

Reference: model vznikl na základě požadavku UNDP – Projekt 85054 Agentury pro mezinárodní rozvoj, U. S. Department of State.

Dosavadní uživatelé: Univerzita v Káhiře, v rámci projektu UNDP v Jugoslávii a Řecku, běžně užíván v zahraničí. V ČSFR byl použit ve Stavební geologii, s. p., na úkolech Tlustecký blok (1983), Kvartér plzeňské kotliny (1986), SVÚ – Výzkum vlivu zvýšené míry exploatace podzemních vod na tvorbu jejich zásob (1987), Syntéza české křídly (1987) a na vodárenských zakázkách: Vestřev (1988), ochrany podzemních vod: Mělník-Podvlčí (1986)

a 1988), Lučební závody Kolín (1988), Chvaletice (1988), Stráž pod Ralskem – odkaliště (1989) a jiné.

Autoři a kontakty: L. R. Townley, J. L. Wilson, A. Sa da Costa, Ralph M. Parsons Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA. Listing programu a uživatelský manuál byly získány v rámci výměny vědeckých publikací s citovaným ústavem a kolektivem v roce 1981.

### Aplikace modelu na zakázce Jiřetín – realizace

V rámci úkolu Jiřetín – realizace, jehož cílem bylo posoudit stabilitu svahů Krušných hor při povrchové těžbě uhlí velkolomem ČSA, byl model AQUIFEM 1 použit pro stanovení úrovní hladiny podzemní vody krystalinika v těžené části pánve a na přilehlých svazích.

Modelové řešení bylo provedeno na ploše cca 26 km<sup>2</sup>; obsahovalo zájmové území oblasti Komořan a Jiřetína. To bylo dáno faktem, že řešená oblast je ovlivňována těžbou dolu VČSA současně s lomovou linií dolu Obránců míru. Území bylo zvoleno s ohledem na rozšíření těžby v roce 1985, který byl určen jako výchozí (počáteční) stav řešení.

### Hydrogeologické vstupy

Pro modelování počátečního stavu bylo nutno zpracovat mapy izolinií hladiny podzemní vody v celém zájmovém území spolu s mapami báze uhelné sloje, která v celé pánevní oblasti představuje prakticky nepropustný strop napjatého zvodnění krystalinika a podložních písků. Koeficienty filtrace uhelné sloje jsou zhruba o dva řády nižší než u řešeného kolektoru. Podložní písky podle výsledků hydrodynamických zkoušek mají propustnost vyšší než krystalinikum a jejich hladiny jsou v celém území na prakticky stejné nebo nižší úrovni než hladiny krystalinika. Hydraulicky jsou kolektory krystalinika a podložních písků propojeny, takže při snížení hladin v krystaliniku dojde i k snížení hladin v podložních sedimentech a v důsledku jejich vyšších propustností s větším efektem než v krystaliniku samém. Tato skutečnost opravňovala k modelování společného kolektoru krystalinika a podložních písků v pánevní oblasti řešeného území.

Modelovaný zvodněný kolektor krystalinika a podložních psamitů vystupuje v podloží uhelné sloje v pánevním uložení. Jeho vyšší křídlo vychází na den na svazích Krušných hor; místně je překryto kvartérem s malou mocností. Je dotováno vodou z atmosférických srážek přímo nebo zprostředkovaně přes kvartérní sedimenty. Řešený kolektor má zde volnou hladinu podzemní vody a jeho dílčí odvodňování tvoří potoky v zařízených údolích. Plocha infiltračního území je 8,98 km<sup>2</sup>.

Linie vyznačená na obr. 2 jako hranice území s infiltrací srážek představuje okraj části pánevní výplně, tvořené uhelnou slojí a terciárními sedimenty. Přibližně na této linii také přechází zvodnění řešeného kolektoru z volné hladiny podzemní vody na napjatou. Otevření nižšího křídla pánevního systému lomovou těžbou umožňuje vol-

ný výtok podzemních vod modelovaného souvrství v ustáleném proudění na dně lomu. Infiltrace srážkových vod nebyla stanovena přímo na podkladě hydrologické bilance území, ale z analogie podle údajů HMÚ (1931–1960) pro povodí Jiřetínského potoka v profilu Dolní Jiřetín (plocha povodí 26,36 km<sup>2</sup>). Zde specifický odtok 330denní vody (130 l. s<sup>-1</sup>) je 4,93 l. s<sup>-1</sup> · km<sup>-2</sup>, tj. cca 21 % ročního normálu srážek. Přírodní zdroje na aktivní části modelového území činí 44,27 l. s<sup>-1</sup>. To zhruba odpovídá součtu vydatností čerpání vod z lomu Obránců míru, VČSA a jámy VI v období let 1983–1985, uvažujeme-li také přítok kvartérních vod a odvodnění nadloží v těchto objektech. Stanovené přírodní zdroje v modelu byly dále rozděleny podle velikosti srážek a jejich závislosti na nadmořské výšce (z 8 srážkoměrných stanic) do výškových pásem po 100 m a plošně i místně vyjádřeny zadáním do elementů sítě – při uvažování konstantního procenta infiltrace ze srážek 21,15 %. Mocnost zvodnění v modelu byla uvažována v pásmu s volnou hladinou cca 150 m (báze odečtena od hladin). Pod pánevní výplní, kde je napjatá hladina, byla zadána mocnost kolektoru 100 m (báze kolektoru byla odečtena od úrovně báze uhelné sloje). V modelovém řešení byly také uvažovány nepropustné zlomy v pánvi, které zhruba navazují na průběh údolí Jiřetínského potoka (obr. 2), rozdělující proudění podzemní vody na několik proudů. Koeficienty filtrace řešeného kolektoru nebyly zpracovány ve formě izolinií, ale vyneseny do mapy bodově. Tyto hodnoty byly použity při lokálním zadání propustnosti v prvním odhadu řešení v odpovídajících uzlech sítě.

### Okrajové podmínky modelového řešení

Modelové území je dáno rozsahem použitelných hydrogeologických a hydraulických podkladů. Jihozápadní okraj struktury tvoří linie těžby VČSA, kde dochází k odvodňování části struktury na kótě dna lomu ( $H = \text{konst.}$ ). Směrem na S pokračuje okraj modelu kolmo na průběh hydroizohyps krystalinika (nulový přítok z území mimo model –  $q = 0$ ) a přechází pásma zhruba odpovídající hydrogeologické rozvodnici Vesnického potoka, kde se může vyskytovat malý boční přítok do území ( $H = \text{konst.}$ ). Na svazích Krušných hor pak hranice pokračuje na V místy po dílčích rozvodnicích s minimem přítoků ( $H = \text{konst.}$ ), místy napříč údolními vodotečí kolmo na izolinie hladiny podzemní vody ( $q = 0$ ). Omezení modelového území na svazích je dáno rozšířením průzkumu mimo oblast řešené problematiky (pata svahů a pánev s liniemi těžby), které požaduje a financuje investor úkolu. Podmínkou bezchybné aplikace modelu je vymezení okrajů modelového území mimo dosah současné i navrhované deprese, dokumentované minimálními změnami přítoků a zanedbatelnými změnami úrovně hladin. Tyto podmínky byly na celém území splněny (maximální změna přítoků v modelových řešeních činí na okrajích modelu celkově 0,6 l. s<sup>-1</sup>). Západní okraj území je veden ve směru kolmém na izolinii hladiny podzemní vody v těsné blízkosti lomové linie roku 2030, což negativně ovlivňuje



## Postupy těžby v letech 1990–2030

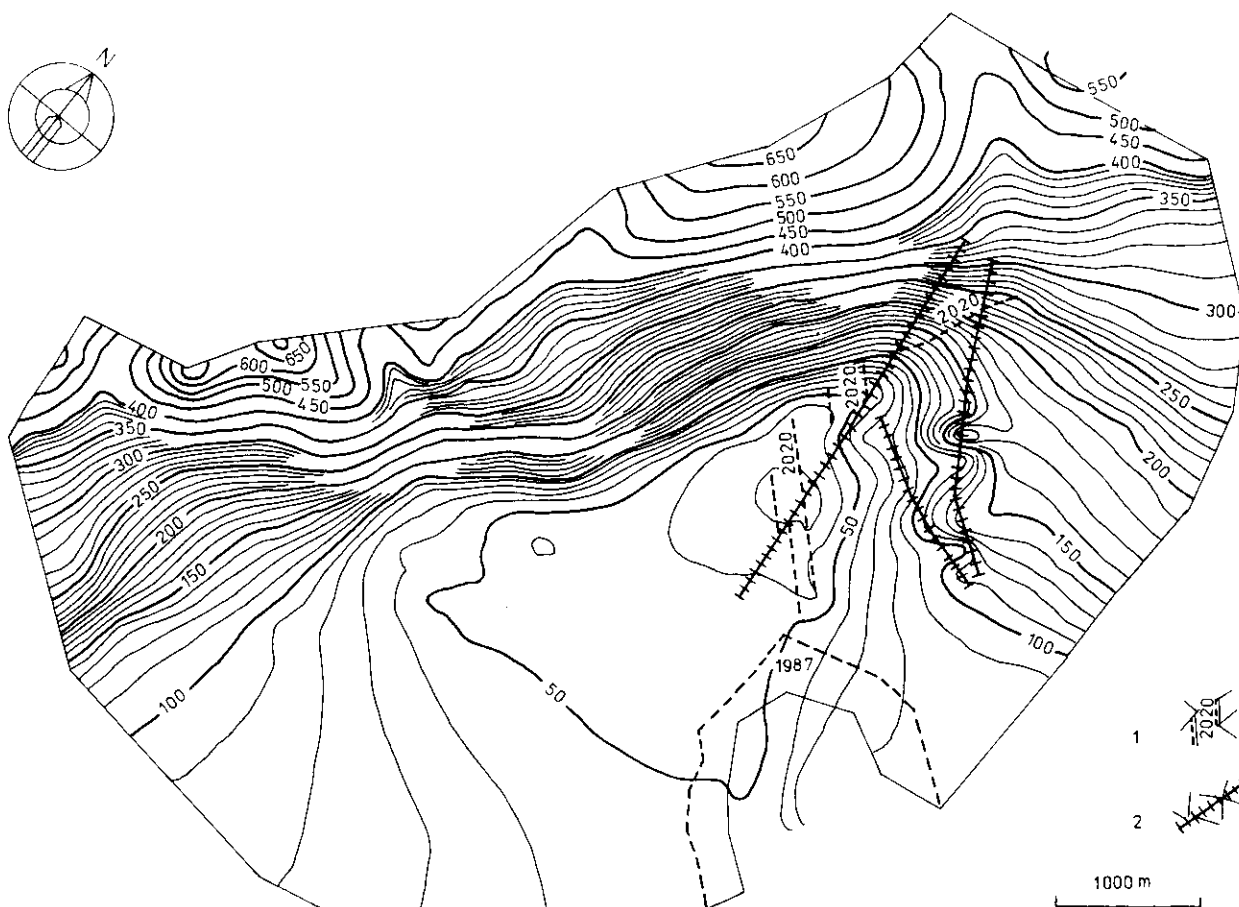
Další varianty modelového řešení měly za úkol stanovit ovlivnění zájmového území při postupu lomu podél svahů Krušných hor a vliv přirozeného odvodňování v lomových liniích na hladiny krystalinika v přilehlých svazích. Možnost umělého odvodňování svahů byla vyloučena pro vysoké finanční nároky na výstavbu odvodňovacího systému (např. podélné odvodňovací štoly) a malou efektivnost jeho účinku (nízké propustnosti horninového prostředí ve svazích a s nimi související případné velké množství vrtů a velká snížení hladin), kterou umocňuje existence puklinových systémů. Varianty řešení postupu těžby byly modelovány jako ustálený stav proudění podzemní vody, protože model při řešení neustáleného proudění v čase vylučuje možnost změny počtu okrajových podmínek (počet uzlů se zadáním úrovně hladin v liniích těžby).

Porovnání výpočtů při ustáleném a neustáleném proudění jsme ověřili zvláštním výpočtem při změnách lomové linie mezi rokem 1985 a 1990. Řešení prokázalo, že snížení hladiny na úroveň blízkou ustálenému stavu nastane dříve než za deset let (maximální rozdíl hladin v prostoru před linií těžby v roce 1990 činí v roce 2000 zhruba 5 cm oproti ustálenému stavu proudění). Jestliže uvažíme ply-

nulý postup lomu v cca desetiletých mezidobích mezi řešeními, budou vypočtené ustálené hladiny v prostoru kolem těžební linie v řešeném čase nižší než skutečné, ale s minimální odchylkou (maximálně několik metrů v předpolí lomu).

Varianty řešení úrovně hladin byly provedeny pro stavy roků 1990, 2000, 2012, 2020 a 2030 podle podkladů investora o postupu dobývacích řezů. Při modelovém řešení se počítá s postupem lomové těžby od linie roku 1985 do linie roku 2030. Uvažuje se o úplném odtěžení celé plochy pod pánevním pokryvem, s výjimkou pilíře pod zámekem Jezeří, a o plošné drenáži pod výsypkami. Při výpočtu ovlivnění úrovně podzemní vody k určitému datu se proto zadává snížení hladiny v celém těžebním prostoru za řešenou linií. Ve všech uzlech sítě, kde vychází piezometrická úroveň hladiny výše než je báze uhelné sloje, je snížení vyjádřeno 1. okrajovou podmínkou ( $H = \text{konst.}$ ) na úrovni báze sloje v daném uzlu. Současně je v těchto uzlech vypočteno množství odvodněné podzemní vody. Otevřená lomová linie v řešených časech je vykreslena na obr. 2.

Výpočty prokázaly, že maximální ovlivnění hladin i největší přítoky podzemních vod krystalinika do těžebního prostoru (cca  $30 \text{ l. s}^{-1}$ ) nastanou v roce 2020, kdy se linie lomu dostane do nejhluběji uložené části uhelné



3. Izolinie hladiny podzemní vody krystalinika v roce 2020. 1 – linie lomové těžby ( $H = \text{konst.}$ ), 2 – nepropustná zlomová linie.

sloje (na kótu 25 m n. m.). Na okraji pánve bude na svazích Krušných hor dosahovat snížení hladin v profilu I od 30 m (v období roku 2012) do 40 m v letech 2020-2030. V profilu II budou hladiny krystalinika nejvíce ovlivněny těžbou v období kolem roku 2020. Pokles hladiny na okraji pánve bude činit až 100 m od současného stavu. Snížení hladiny podzemní vody v profilu IIa zmenšuje vliv Jiřetínského potoka, který komunikuje s kolektorem krystalinika. Největší snížení by činilo cca 18 m v roce 2020. V doplňkové variantě bylo uvažováno snížení hladiny v údolí Jiřetínského potoka na okraji pánve čerpací clonou na úrovni 305 m n. m. To se příznivě projevilo na průběhu izolinií podzemní vody v úpatí svahů a přispělo k zajištění stability svahu. Profil III bude nejvýznamněji ovlivněn těžbou až v období 2020–2030, kdy dojde na okraji pánve ke snížení hladiny o cca 27 m.

Všechny varianty výpočtů jsou v závěrečné zprávě doloženy mapami izolinií hladiny podzemní vody spolu s přehledem ovlivnění povrchových toků a změn přítoků podzemní vody do linií těžby. Pro ukázkou je na obr. 3 zobrazen průběh izolinií hladiny krystalinika pro stav roku 2020.

## Závěr

Simulační matematický model AQUIFEM 1 se při aplikaci na zakázce Jiřetín – realizace osvědčil. Modelové řešení ovlivnění hladiny krystalinika zájmového území bylo jedinou možností, jak zhodnotit míru účinků těžby na hladiny podzemní vody v daném prostoru. Upřesnění modelového řešení a posouzení jeho objektivit může být výhledově provedeno v dalších letech podle porovnání se skutečným ovlivněním hladin v síti pozorovacích vrtů při pokračující těžbě dolu VČSA.

Obecně lze po zkušenostech s použitím modelu AQUIFEM 1 (cca 20 modelových řešení) říci, že velmi dobře vystihuje popis proudění podzemní vody v jednovrstevném kolektoru s průlinovou nebo i všesměrně puklinovou pórovitostí, při zohlednění všech běžných přírodních i umělých vlivů (infiltrace srážek, vliv vodních toků, tektonika, vliv odběrů apod.). Omezeně je použitelný i pro dvouvrstevný kolektor, kde u přilehlé (nemodelované) vrstvy předpokládá konstantní úroveň hladiny, neovlivněnou změnami hladin řešeného kolektoru. Je však možno zadat předpokládané změny hladiny sousedního kolektoru v čase. Komunikace mezi sousedními zvodněmi je definována úrovněmi hladin a parametry dělicího poloizolátoru.

Doplnění, která se provedla v a. s. Aquatest SG (automatické zahuštění sítě v okolí vybraných uzlů pro popis hladiny v blízkosti jímacích vrtů, výpočet vektorů rychlosti a proudnic v okolí uzlů spolu s výpočtem doběhových dob vodních částic), rozšíří aplikaci modelu i pro použití na zakázkách orientovaných na ochranu zdrojů podzemní vody a posuzování možnosti jejich kontaminace.

Model AQUIFEM 1 se tak stává univerzálním modelem pro běžné zakázky regionálního i lokálního rozsahu v hydrogeologické praxi.

*K tisku doporučil V. Homola*

## Literatura

- TOWNLEY, L. R. - WILSON, J. L. (1980): Description of and user's manual for a finite element aquifer flow model AQUIFEM 1. – Report No. 252, MIT, Massachusetts.
- WILSON, J. L. - TOWNLEY, L. R. - SA DA COSTA, A. (1979): Mathematical development and verification of a finite element aquifer flow model AQUIFEM 1. – Report No. 248, MIT, Massachusetts.

## Prognosis of groundwater level decrease due to the progressing open pit coal mining at the foot of the Krušné hory Mts. – groundwater flow model AQUIFEM 1

*(Summary of the Czech text)*

JOSEF HORÁK

Received October 1, 1990

The mathematical model AQUIFEM 1 by L. R. Townley, J. L. Wilson and A. Sa da Costa from the Massachusetts Institute of Technology has been applied in regional and local projects performed by the Stavební geologie, Prague since 1983. The two-dimensional model solves groundwater flow under the conditions of phreatic, confined and semiconfined groundwater levels by the finite elements method (grid of triangular elements) – see fig. 1. Three types of boundary conditions can be used for simulation:  $H = \text{const.}$ ,  $q = \text{const.}$  and  $q = f(H)$  and additional input information in area and time, such as rainfall infiltration, local anisotropy of the aquifers, semipermeable or unpermeable tectonic faults and others. The programming language is FORTRAN IV and the original code is IBM-PC compatible.

The model AQUIFEM 1 has been used in ca 20 hydrogeological projects concerning regional hydrogeology, groundwater protection (a proposal for setting pits, hydraulic barriers), evaluation of local sources of groundwaters and evaluation of interaction between ground and surface waters.

The project Jiřetín was aimed at evaluation of the effect of surface brown-coal mining by the ČSA Giant Open Mine on the stability of the Krušné hory Mts. slopes. The model AQUIFEM 1 was used to determine the attitude of groundwater

level in consideration profiles and its changes caused by mining in the period 1990–2030. Crystalline aquifer was modelled in the area of Komořany and Horní Jiřetín (26 km<sup>2</sup> total area) with respect to the initial state in 1985 defined by the mining profile of the Obránců míru and ČSA Mines.

Maps of crystalline aquifer groundwater levels at the initial state and maps of coal seam basis, which forms an unpermeable aquitard of the aquifer, were processed as input data in the given area.

At the slopes of the Krušné hory Mts., where the crystalline complex exhibits a free groundwater surface, the infiltration of rainfall was determined at 4.93 l. s<sup>-1</sup>. km<sup>-2</sup> (total 44.27 l. s<sup>-1</sup>) and the drainage of surface water into surface streams was also considered. In the basin, where the crystalline complex is overlain by Mesozoic and Tertiary deposits and has a confined groundwater level, the infiltration of rainfall was not considered and communication with surface streams does not exist there. The thickness of groundwater aquifer at the slopes of the Krušné hory Mts. is estimated at 150 m (measured from groundwater level) and that in the basin 100 m (measured from coal seam base). The model also simulates unpermeable fault lines which are the continuation of the Jiřetín brook valley in the basin.

Margins of the model territory in mountain slopes were defined by boundary condition  $q = 0$  individual hydrogeological divides or at the line perpendicular to groundwater level isolines with a condition  $H = \text{const.}$  at the margin course parallel with hydroisohypses. The model solution proved that the boundaries of the model territory were designed outside the range of provoked groundwater level depressions. Lines of mine in the initial stage were defined by a boundary condition  $H = \text{const.}$  together with pumping stations in the mine foreland which keep down the water at a constant level (see fig. 2.).

Hydraulic parameters of the crystalline aquifer expressed by the filtration coefficient range between 10<sup>-5</sup> and 10<sup>-8</sup> m . s<sup>-1</sup> (69 documentation points according to hydrodynamic tests). The model range of the input data of the filtration coefficient is the same. Areal development of permeability is documented by a map attached to the project report together with the verified levels of the initial state (1985) for comparison with the course of hydroisohypses drawn on the basis of terrain measurements.

Additional variants of solution simulated the process of mining in the years 1990–2030 and its influence on the groundwater levels of the crystalline complex. Solutions were modelled for a steady state groundwater flow in the following time periods: 1990, 2000, 2012, 2020, 2025 and 2030. Simultaneously, a steady state period was verified according to unsteady state groundwater flow and was calculated to be less than 10 years (maximum difference between the steady state groundwater flow and the state after 10 years is 5 cm in the foreland of the coal-mine). The results of the model can be considered representative during continuous mining. Maximum influence on water levels and maximum inflows into the mining area (ca 30 l. s<sup>-1</sup>) can be expected around the year 2020 when the mine line would run through the deepest part of the seam (at the elevation point 25 m above sea level). The course of groundwater levels is shown in fig. 3. All variants of the solution are documented by maps of isolines of groundwater levels and balance of inflows into the mining area in the project report.

The application of the AQUIFEM 1 model at the project Jiřetín has proved to be suitable. The results of model solution can be verified in practice at assessing the monitoring net of levels in boreholes during the coming years. At present, the Aquatest SG Inc. has complemented the model to broaden its applicability namely in the field of groundwater protection (automatic increase of the model network density in the vicinity of selected points – water intake wells, calculation of velocity vectors and streamline together with calculation of water particles time distribution).

The experience with application of AQUIFEM 1 simulation mathematical model permits to state that the model is universally suitable for hydrogeology and reflects very well natural situation under conditions of two-dimensional groundwater flow.

*Přeložila T. Hlavatá*

#### Explanation of text-figures

1. Section defining a hypothetical aquifer.
2. Model grid with boundary conditions. 1 – line of mining ( $H = \text{const.}$ ), 2 – unpermeable fault line, 3 – boundary of the area with rainfall

- infiltration – margin of the basin filling, 4 – boundary condition  $H = \text{const.}$ , 5 – boundary condition  $q = 0$ , 6 – boundary condition  $q = f(H)$ .
3. Isolines of the crystalline aquifer in the year 2020. 1 – line of mining ( $H = \text{const.}$ ), 2 – unpermeable fault line.