

Sborník geologických věd	Hydrogeologie, inž. geologie, 21	Str. 63–78	10 obr.	3 tab.	– příl.	ČGÚ Praha 2001	ISBN 80-7075-520-2 ISSN 0036-5289
-----------------------------	-------------------------------------	---------------	------------	-----------	------------	-------------------	--------------------------------------

Modelové řešení zranitelnosti křídového kolektoru

Model solution of vulnerability of the Cretaceous aquifer

BEATRICE PATZELTOVÁ¹

Předloženo 28. března 2001

Key words: Mathematical simulation, Disturbed Cretaceous aquitard and aquifer, Flow model, Transport of contaminants, Bohemia

PATZELTOVÁ, B. (2001): Modelové řešení zranitelnosti křídového kolektoru. – Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol., 21, 63–78. Praha.

Výtah: Tento výzkum se zabývá problematikou zranitelnosti podzemních vod v oblastech sedimentárních struktur, a to v souvislosti s různým stupněm porušení izolátorových hornin plochami diskontinuity tektonického původu. Pomocí matematického modelování byly zkoumány různé vlastnosti puklinově porušených izolátorových hornin a jejich vliv na proudění podzemní vody a na pronikání kontaminantu ze svrchní potenciálně kontaminované zvodně do spodní, vodárensky významné zvodně. Pro účely matematického modelování byla definována obecná struktura sedimentárních komplexů, jejíž návrh vychází ze současné úrovně poznání geologických, hydrogeologických a hydraulických poměrů západní části české křídové pánve. Tato struktura byla prostorově diskretizována a byly sestaveny čtyři varianty matematického modelu. Tři z těchto variant popisují proudění podzemní vody a transport kontaminantů v prostředí porušeném puklinovým pásmem s různými zadanými hodnotami hydraulické vodivosti, čtvrtá varianta – srovnávací – popisuje proudění a transport v prostředí bez porušení puklinami.

¹ 407 60 Brtníky 126/1

ÚVOD

Problematika získávání kvalitní pitné vody jakožto jedné ze základních potřeb člověka je vysoce aktuální jak u nás, tak ve světě. Nejvyššími zdroji pitné vody jsou vody podzemní. Významnými zásobárnami podzemní vody jsou sedimentární struktury. Zde se vlivem rozlohy, mocnosti a střídání propustnějších a méně propustných vrstev vytvořily podmínky pro vznik významných kolektorů, které dávají možnost soustředěných vodárenských odběrů podzemní vody.

S možností vodárenského využití je spojena ochrana zdrojů podzemních vod. Jímací území bývají vzhledem k ploše kolektorů často rozsáhlá a probíhá v nich antropogenní činnost. Jejím vlivem jsou zde mimo jiné vytvářeny různé zdroje znečištění, které mohou ohrozit kvalitu podzemních vod.

V České republice je typickým příkladem pánevní sedimentární struktury česká křídová pánev, a to především její západní část. Česká křídová pánev představuje největší zásobárnu podzemních vod v České republice. Je třeba věnovat velkou pozornost ochraně podzemních vod, protože podstatná část západní křídové pánve je osídlena a průmyslově i zemědělsky využívána.

Struktura západní části české křídové pánve obecně představuje střídání kolektorů, poloizolátorů a izolátorů, přičemž izolátory jsou zásadními prvky přirozené ochrany podzemních vod před možným pronikáním znečištění ze svrchní potenciálně kontaminované zvodně. Celé území je však značně tektonicky postiženo a horniny mohou být porušeny puklinami. Tím

může být narušena přirozená ochranná funkce izolátorů.

Ve svém výzkumu jsem se zaměřila na to, jak mohou antropogenní zdroje znečištění ovlivnit kvalitu podzemních vod ve vodárensky významných územích západní části české křídové pánve, a to v souvislosti s různým stupněm porušení izolátorových hornin plochami diskontinuity tektonického původu. Pomocí matematického modelování byly zkoumány různé vlastnosti puklinově porušených izolátorových hornin a jejich vliv na proudění podzemní vody a na pronikání kontaminantu ze svrchní potenciálně kontaminované zvodně do spodní, vodárensky významné zvodně. Tento výzkum v širším rozsahu byl předmětem doktorské disertační práce (PATZELTOVÁ, 2000).

Pro účely výzkumu byla definována obecná struktura sedimentárních komplexů, která zahrnuje svrchní kolektor s volnou hladinou podzemní vody, izolátor a spodní (bazální) kolektor s napjatou hladinou. Na takto definované obecné struktuře byly pomocí matematického modelování zkoumány vlastnosti puklinově porušeného izolátoru. Ve zkoumané obecné struktuře byl definován podélný prvek, který prochází středem celé obecné struktury v podélném směru, rovnoběžně se směrem proudění podzemní vody. Tento podélný prvek reprezentuje pásmo puklinového porušení horninového prostředí, má relativně vyšší propustnost než okolní prostředí a je tak preferenční cestou pro proudění podzemních vod. V prostředí podélného prvku byly zadávány různé hydraulické vlastnosti odpovídající zvýšené propustnosti puklinového systému a zkoumán vliv těchto různých vlastností na proudění podzemních vod. Pro

porovnání byl sestaven také matematický model stejné struktury, avšak bez tektonického porušení.

V další fázi výzkumu byl zadán zdroj znečištění a zkoumáno šíření kontaminantů v různých podmínkách proudění podzemní vody v saturované zóně, tak jak bylo zjištěno v první fázi výzkumu. Pro porovnání byl též sestaven model transportu kontaminantů v prostředí bez tektonického porušení.

Dále byl diskutován vliv změn různých parametrů modelového řešení na výsledky modelu.

K simulaci problematiky byly použity počítačové programy MODFLOW a MT3D, spojené v komunikačním prostředí Visual Modflow.

TEORETICKÝ ZÁKLAD ZPRACOVÁNÍ PROBLEMATIKY

Model se zohledněním preferenční cesty prezentovaný v tomto výzkumu je jednou z možností zjednodušení simulace proudění a transportu kontaminantů v horninových formacích se systémy puklin. Obecně jsou k řešení této problematiky uváděny tyto konceptuální modely (ANDERSON a WOESSNER, 1992):

1. Ekvivalentní porézní prostředí – rozpukané horninové prostředí je nahrazeno kontinuem, ve kterém je definován reprezentativní elementární objem, charakterizovaný určitými hydraulickými parametry. Kolektor takového prostředí je testován a získávají se tak efektivní hodnoty hydraulické vodivosti, specifické storativity a pórovitosti (SAUVEPLANE, 1984; GINGARTEN, 1982). Využívají se přitom inverzní modely a též údaje o geometrii puklinového systému (CACAS et al., 1990; BERKOWITZ et al., 1988; HSIEH et al., 1985). Po definování efektivních parametrů je užit standardní postup matematického modelování proudění podzemní vody spojitého porézního prostředí (GERHART, 1984). Problémem při aplikaci tohoto přístupu je definování velikosti reprezentativního elementárního objemu potřebného k definování ekvivalentních hydraulických vlastností (CACAS et al., 1990). Někteří autoři (LONG a BILLAUX, 1987; CACAS et al., 1990) uvádějí, že tento přístup vyhovuje v regionálním systému proudění, ale v lokálních podmínkách neposkytuje dobré výsledky.

2. Samostatné pukliny – tento přístup se uplatňuje především v rozpukaných horninách s nízkou hydraulickou vodivostí (krystalinické útvary). Simuluje se průtok samostatnou puklinou mezi paralelními plochami. Tento přístup vyžaduje detailní popis sítě puklin, jejich otevření a propojení a geometrie puklinového systému. Získávat tato data je velmi obtížné. Ke zjišťování těchto údajů se používají se různé testy ve vrtech a stopovací testy (CACAS et al., 1990; DVERSTORP a ANDERSSON, 1989). K dalším autorům zabývajícím se touto problematikou patří WRIHERSPOON et al. (1987), SCHMELLING a ROSS (1989), PIGGOTT a ELSWORTH (1989), TSANG a TSANG (1987, 1988), LONG et al. (1982, 1985), SMITH a SCHWARTZ (1984).

3. Duální pórovitost – tento přístup předpokládá, že

voda protékající puklinami komunikuje s okolním porézním horninovým prostředím. Je nutný popis sítě a geometrie puklin a hydraulických vlastností porézního prostředí. Výzkumy tohoto přístupu se zabývali např. STRELTSOVA-ADAMS (1978), HUYAKORN et al. (1983), HUYAKORN a PINDER (1983), DYKHUIZEN (1990), GLOVER (1987).

Jiný přehled přístupů uvažujících kombinaci darcyovského a preferenčního proudění, a to ve vztahu k transportním procesům, uvádí CÍSLEROVÁ a VOGEL (1998). Principem těchto přístupů je rozdělení oblasti proudění na dvě nebo více podoblastí (domén), z nichž každá reprezentuje odlišnou kategorii poloměru pórů, podléhající se na rychlém, případně pomalém proudění (tzv. mobilní, případně imobilní oblast):

1. Dvě oblasti, jedno kontinuum – uvažuje se difuze mezi mobilní a imobilní oblastí. Výzkumem tohoto problému se zabývali např. BARENBLATT et al. (1960), WARREN a ROOT (1963), COATS a SMITH (1964), VAN GENUCHTEN a WIERENGA (1976).

2. Dvě oblasti, dvě kontinua – uvažuje se advekce a disperze mezi pomalou a rychlou oblastí. Touto problematikou se zabývali např. JARVIS et al. (1991), SKOPP et al. (1981), CHEN a WAGENET (1992), GERKE a VAN GENUCHTEN (1993), VOGEL et al. (1993).

3. Několik oblastí proudění bez vzájemného transportu hmoty – tímto výzkumem se zabývali např. LINDSTROM a BOERSMA (1971), DAGAN a BRESLER (1979), JURY (1982), SIMMONS (1982).

4. Několik oblastí proudění se vzájemným transportem hmoty – zde je možno uvést např. výzkumy autorů STEENHUISE et al. (1990), ROTH a et al. (1990), SKOPPA a GARDNERA (1992), DURNERA a FLÜHLERA (1996).

CHARAKTERISTIKA MODELOVÉHO PROSTŘEDÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, zadání modelového prostředí vychází z poznatků o geologických, hydrogeologických a hydraulických poměrech západní části české křídové pánve jakožto typické sedimentární struktury a nejvýznamnější zásobárny podzemních vod v České republice. Výzkum proudění podzemních vod a transportu kontaminantů byl řešen v teoretické rovině se snahou o možnost zobecnění a uplatnění výsledků pro některé konkrétní oblasti západní části české křídové pánve.

Základní přehled kolektorů západní části české křídové pánve

Západní část české křídové pánve se svou kernou stavbou je charakteristická rozsáhlými hydrogeologickými strukturami, přičemž kolektory uložené nad sebou mají oblasti napájení a odvodnění na různých značně vzdálených místech. Tuto část pánve charakterizuje převaha písčitých sedimentů lužické a jizerské facie, ve kterých

se vytvářejí mocné kolektory souvisle zvodněné na velkém území. Kolektory v české křídové pánvi, a tedy i její západní části, lze rozdělit do čtyř základních skupin (HERČÍK et al., 1987):

1. Bazální křídový kolektor A, vázaný převážně na perucko-korycanské, místy i bělohorské souvrství (spojený kolektor A a B, souhrnně pojmenovaný AB). Zvodnění tohoto kolektoru je s výjimkou okrajových částí pánve výhradně artéské. Propustnost kolektoru A je převážně průlinová, v místech jednotného kolektoru se výrazně uplatňuje puklinová propustnost.

2. Kolektor B, vytvořený v bělohorském souvrství.

3. Kolektor C, vyvinutý zejména v jizerském souvrství, v menší míře také v bělohorském souvrství (spojený kolektor B a C, souhrnně pojmenovaný BC). Je vyvinut převážně v území pravobřežních přítoků Labe, kde váže největší zásoby podzemních vod české křídové pánve. Zvodnění kolektoru C je převážně volné, místy artéské. Propustnost kolektoru C je průlinově-puklinová.

4. Kolektor D, vázaný na teplické a březenské souvrství. Zvodnění je převážně volné. Vlivem rytmické sedimentace flyšoidního typu se kolektor D místy štěpí v řadu dílčích, relativně izolovaných lokálně artéských kolektorů. Propustnost kolektoru D je puklinově-průlinová.

Plochy diskontinuity a zranitelnost podzemních vod

V české křídové pánvi jsou dislokace a pukliny významným prvkem, který ovlivňuje oběh podzemních vod. Podélné (směrné) dislokace, reprezentované hlavními směrnými zlomy, jsou velmi rozsáhlé a sahají do velkých hloubek. Mají význam pro hluboký oběh podzemních vod. Jestliže vznikly radiálními nebo tahovými silami, bývají otevřené (např. poklesové zlomy). Jestliže vznikly tangenciálním tlakem, bývají uzavřenější. Příčné dislokace (příčné zlomy) bývají mělké, avšak rozevřenější a zpravidla propustnější. Jsou významné pro vznik vývěrů podzemních vod, infiltraci a pro intenzivní oběh podzemní vody v malých hloubkách. Podélné dislokace spolu s příčnými se vyskytují v pásmech dlouhých desítky kilometrů a širokých řádově až stovky metrů. Podélné i příčné dislokace jsou doprovázeny systémem puklin. Mohou být od sebe vzdáleny i jen desítky centimetrů. Jejich rozevřenost je max. jednotky centimetrů. Kromě těchto systémů vázaných na zlomové linie se po celém území křídové pánve vyskytují nepravidelné systémy sekundárních puklin. Jejich rozevřenost je maximálně několik milimetrů.

Propustnost puklin a dislokací závisí na charakteru jejich výplně. Dislokace vyplněné brekcí tvrdých křehkých okolních hornin jsou velmi propustné, zatímco dislokace s jílovitou výplní jsou často zcela utěsněné a nepropustné. Tyto typy výplní jsou produktem zvětrávání a transportu. Kromě toho mohou být dislokace a pukliny silicifikovány či limonitizovány, což je pozůstatek

hydrotermálních pochodů souvisejících s neogenní vulkanickou činností.

Dislokace a pukliny vyplněné dobře propustnou výplní jsou významnými lokálními preferenčními cestami pro oběh podzemních vod, a to i v prostředí jinak relativně málo propustných izolátorových hornin. Jejich přítomnost má zásadní vliv na zranitelnost podzemních vod v jinak velmi málo zranitelných kolektorech, překrytých relativně málo propustnými izolátory. Vliv těchto preferenčních cest na zranitelnost níže ležících kolektorů byl předmětem výzkumu.

Tlakové poměry a zranitelnost podzemních vod

Bazální kolektor A (příp. AB) má na většině území napjatou hladinu podzemní vody. Pouze nad erozní bází a na zdvižených okrajích – plochách infiltrace – je hladina volná. Piezometrické napětí v bazálním kolektoru A generálně klesá v souladu s celkovým poklesem průměrné absolutní výšky povrchu od nejvýše položených okrajových výchozů směrem k regionální bázi odvodnění, jíž je údolí Labe. Tyto regionální zákonitosti poklesu napětí pak určují generální směr proudění v bazálním kolektoru A.

Zranitelnost kolektoru A je vzhledem k napjatému zvodnění malá. Výjimkou jsou jednak infiltrační čela s volnou hladinou, kde zranitelnost je obecně vysoká a závisí na funkci nesaturované zóny a na hloubce hladiny podzemní vody, a také místa puklinově porušeného stropního izolátoru při současném nižším piezometrickém napětí, než je napětí svrchní zvodně. Tyto zákonitosti platí též pro oblasti kolektorů C a D, které jsou překryty izolátorovými horninami a mají napjatou hladinu podzemní vody.

Nadložní kolektory BC, C a D, které nejsou překryty izolátory, vytvářejí na povrchu rozsáhlé výchozy. V území výchozů má voda volnou hladinu a zranitelnost kolektorů je obecně vysoká.

STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH PROGRAMŮ

Program MODFLOW byl vyvinut v U. S. Geological Survey v USA (McDONALD a HARBAUGH, 1988). Může být použit pro dvou- i trojrozměrné aplikace. Vstupní procedury jsou generalizovány tak, aby mohly být zadávány různé typy vstupních dat ze separátních vnějších souborů. Program sestává z hlavního programu a série vysoce nezávislých souborů zvaných moduly. Moduly jsou seskupeny do balíčků. Každý programový balíček představuje skupinu modulů, které řeší jednotlivé aspekty simulace.

Program užívá k numerickému řešení rovnice proudění metodu konečných diferencí. Řešená oblast je diskretizována pravoúhlou sítí bloků. Uprostřed bloků jsou

diskrétní body zvané uzly. Parciální diferenciální rovnice popisující proudění podzemní vody je převedena na soustavu algebraických rovnic. Jejich počet je dán zvoleným počtem diskretních bodů. Derivace v řídící rovnici jsou pak nahrazeny konečnými diferencemi. Spojitá funkce je tak vyjádřena aproximačním mnohočlenem. Hodnoty hledané funkce (tj. hladiny podzemní vody) v jednotlivých uzlech jsou tak vypočítávány pomocí hodnot hladin v sousedních uzlech. Pro uzly ležící na hranici je nutno soustavu algebraických rovnic doplnit ještě o rovnice vyjadřující okrajové podmínky. Řešením soustavy rovnic jsou aproximativní hodnoty výšky hladiny v jednotlivých bodech (uzlech) zkoumané oblasti. Velikost odchylky takto získaného řešení od skutečného stavu závisí na zvoleném rozdělení zkoumané oblasti (počtu uzlů), na zadávaných vstupních údajích a na metodě řešení soustavy diferenčních rovnic.

Celá perioda simulace proudění je rozdělena do série tzv. stresových period, ve kterých jsou specifikované parametry konstantní. Každá stresová perioda je rozdělena na sérii časových kroků. V každém časovém kroku je řešena soustava algebraických rovnic a je tak získána hodnota hladiny podzemní vody v každém uzlu na konci každého časového kroku. V rámci výpočtu v každém časovém kroku je hladina pro každý časový krok počítána iterativními metodami. Simulace je tedy prováděna ve třech vzájemně souvisejících smyčkách.

Program MT3D sloužící k simulaci transportu kontaminantů sestavili ZHENG a PAPADOPULOS (1990) v USA. Byl vyvinut pro užití s jakýmkoli modelem proudění, který užívá k řešení metodu konečných diferencí, jako je např. MODFLOW, a je založen na předpokladu, že změny koncentračního pole významně neovlivní proudové pole. Program používá modulární strukturu, podobně jako program MODFLOW. Transportní rovni-

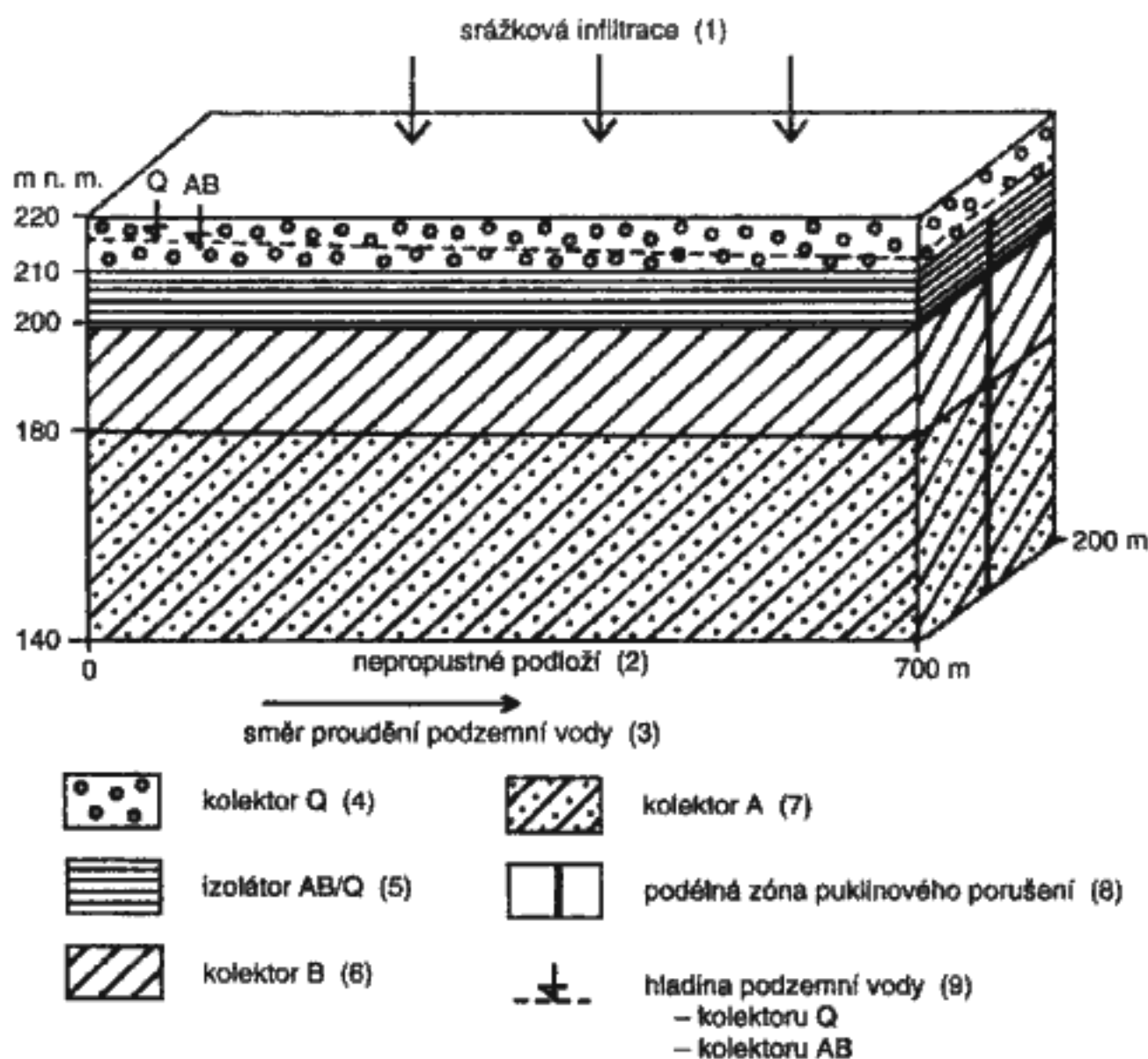
ce je v modelu MT3D řešena numerickou metodou Euler-Lagrangeovou. Eulerova část metody řeší transportní rovnici v pevné síti explicitní metodou konečných diferencí. Tento přístup je vhodný k řešení disperzní a reakční části transportní rovnice. Lagrangeova část metody je použita k řešení advekčního členu transportní rovnice. Transportní rovnice je řešena v pohyblivé síti, a to metodou charakteristik (MOC), modifikovanou metodou charakteristik (MMOC) či hybridem těchto dvou metod.

Simulace modelem MT3D je tedy založena na implicitním řešení hladin, které je poskytováno modelem proudění, a na explicitním řešení transportu kontaminantů. Z tohoto důvodu může být délka časového kroku užitá pro řešení hladiny příliš dlouhá pro řešení transportu. Proto je každý časový krok řešení hladiny rozdělen na menší časové úseky (transportní kroky), během nichž jsou hladiny konstantní.

Program Visual MODFLOW je komunikační prostředí vyvinuté pro praktickou aplikaci simulace proudění podzemních vod a transportu kontaminantů prostřednictvím programů MODFLOW a MT3D. Byl vyvinut ve společnosti Waterloo Hydrogeologic Inc., Ontario, Kanada (GUIGUER a FRANZ, 1994).

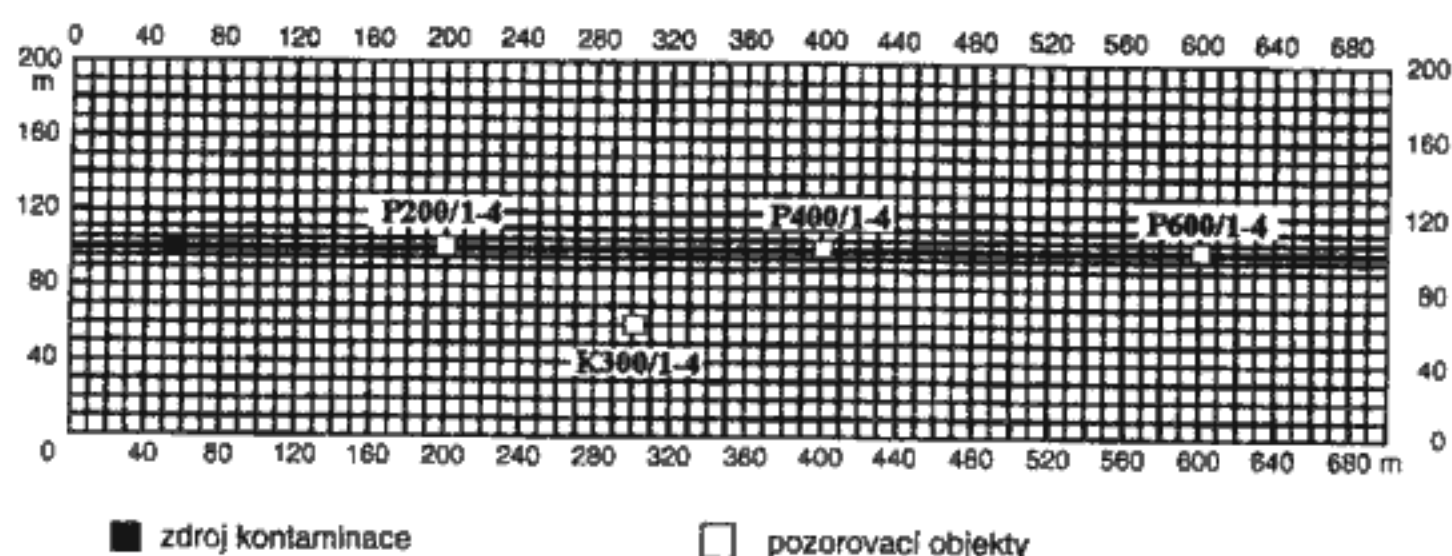
MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

Pro účely matematického modelování byla nejprve definována obecná struktura sedimentárních komplexů. Dále byla tato struktura prostorově diskretizována a byl sestaven matematický model. Definice obecné struktury vychází ze současné úrovně poznání geometrie filtračního prostoru západní části české křídové pánve. Jde o ty-



1. Obecná struktura sedimentárních komplexů pro účely matematického modelování.

2. Prostorová diskretizace (půdorys) a umístění zdroje kontaminace a pozorovacích objektů.



pické střídání horizontálních vrstev s různou propustností. Kvartérní kolektor je od podložního křídového vodohospodářsky významného kolektoru oddělen relativně málo propustným izolátorem. Představa obecné struktury je podána na obr. 1.

V obecné struktuře jsou definovány tyto vrstvy:

Kvartér – 10 m mocné souvrství terasových sedimentů štěrkového charakteru s písčitou výplní. Volná hladina podzemní vody. Označeno jako kolektor Q.

Křídový izolátor – 10 m mocné souvrství tvořené spongility. Izolátor označen AB/Q.

Křídový kolektor – 20 m mocné souvrství tvořené jemnozrnnými pískovci. Kolektor označen B. Hladina podzemní vody napjatá.

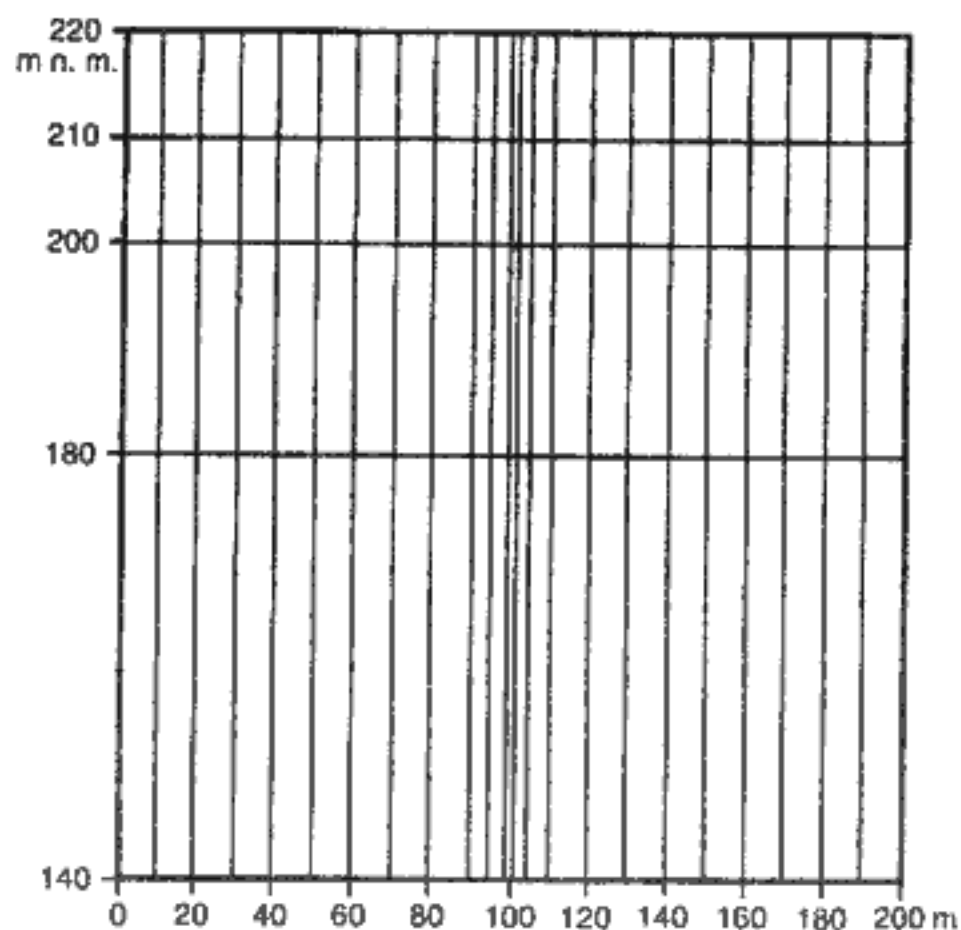
Křídový kolektor – 40 m mocné souvrství tvořené pískovci. Kolektor označen A. Hladina podzemní vody napjatá. Kolektory A a B mají jednotné zvodnění a lze je považovat za jeden bazální křídový kolektor (AB).

Krystalinikum – podloží křídý, považováno za nepropustné.

Hladina podzemní vody křídového kolektoru je napjatá, s negativní výtlakovou výškou. Ta je v levé části struktury zadána níže než volná hladina nadložní kvartérní zvodně a při puklinově porušeném izolátoru je tak splněna možnost přetékání vody ze svrchní do spodní zvodně. Na pravém okraji struktury se hydraulické výšky hladin obou kolektorů vyrovnávají.

Pro účely zkoumání rozsahu zranitelnosti křídové zvodně je v obecné struktuře definován podélný prvek procházející středem struktury podélně celým jejím územím. Tento prvek s řádově jinou propustností reprezentuje pásmo puklin porušujících křídový izolátor a kolektor a představuje tak preferenční cestu pro přetékání podzemních vod ze svrchní zvodně do spodní. Orientace podélného prvku je zvolena rovnoběžně se směrem proudění podzemních vod.

Prostor výše definované obecné struktury byl diskretizován pravoúhlou sítí na 70 sloupců po 10 m, 20 řádků po 10 m a 4 vrstvy o tloušťce 40 m (kolektor A), 20 m (kolektor B), 10 m (izolátor AB/Q) a 10 m (kolektor Q) v rozmezí 140 až 220 m n. m. Následně byly v rozmezí řádků 90 až 110 přidány elementy a vytvořen podélný prvek o šířce 2 m. Vrstvy jsou uloženy horizontálně beze sklonu. Odpovídá to umístění zkoumané problematiky proudění do oblasti nádrže, kde směr proudění podzemní vody je určován konfigurací hladiny ve spádu



3. Prostorová diskretizace (příčný řez).

k drenážním bázím, bez přímé závislosti na prostorovém uložení kolektoru (NAKLÁDAL et al. in HERČÍK et al., 1987).

Prostorová diskretizace je znázorněna na obr. 2 (v půdorysu) a na obr. 3 (v příčném řezu).

Zadání hydraulických vodivostí vychází ze zhodnocení hydraulických parametrů, které byly určeny v rámci různých průzkumů v širších oblastech, které svou konfigurací vrstev a typu zvodnění odpovídají výše definované obecné struktuře. Jde o práce regionálního charakteru (HAZDROVÁ, 1980, 1983; HERČÍK et al., 1987) a práce lokálního charakteru (např. průzkum PAZOURKA et al., 1994). Přehled hydraulických parametrů regionu západní části české křídové pánve podle různých autorů je podán v tab. 1.

Na základě výše uvedených poznatků o hydraulických vlastnostech hornin byly při tvorbě modelu zadány následující hydraulické vodivosti ($v \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$):

1. vrstva (kolektor Q):

$$k_x = 1 \cdot 10^{-4}, k_y = 1 \cdot 10^{-4}, k_z = 2 \cdot 10^{-5}$$

2. vrstva (izolátor AB/Q):

$$k_x = 1 \cdot 10^{-7}, k_y = 1 \cdot 10^{-7}, k_z = 1 \cdot 10^{-8}$$

3. vrstva (kolektor B):

$$k_x = 5 \cdot 10^{-5}, k_y = 5 \cdot 10^{-5}, k_z = 5 \cdot 10^{-6}$$

4. vrstva (kolektor A):

$$k_x = 6 \cdot 10^{-5}, k_y = 6 \cdot 10^{-5}, k_z = 6 \cdot 10^{-6}$$

Třetí a čtvrtá vrstva jsou považovány za jeden zvod-

Tabulka 1. Přehled hydraulických parametrů regionu západní části české křídové pánve podle různých autorů

autor	hydraulické parametry – střední hodnota T ($m^2 \cdot s^{-1}$) nebo k ($m \cdot s^{-1}$)				
	kvartér (kolektor Q)	křídový izolátor (izolátor AB/Q)	křídový kolektor (kolektor AB)		krystalinikum (nepropustné podloží)
			zvlášť A	zvlášť B	
HAZDROVÁ et al., 1980	$T = 2,4 \cdot 10^{-4}$ až $6,4 \cdot 10^{-3}$ odpovídající $k = 3,4 \cdot 10^{-5}$ až $9,1 \cdot 10^{-4}$	k je řádu 10^{-7}	$T = 1,1 \cdot 10^{-3}$, odpovídající $k = 5,5 \cdot 10^{-5}$	$T = 2,5 \cdot 10^{-3}$, odpovídající $k = 6,25 \cdot 10^{-5}$	k je řádu 10^{-7} až 10^{-9}
HAZDROVÁ et al., 1983	$T = 2,4 \cdot 10^{-3}$, odpovídající $k = 3,4 \cdot 10^{-4}$	–	$T = 5,1 \cdot 10^{-5}$ až $1,5 \cdot 10^{-3}$, odpovídající $k = 8 \cdot 10^{-7}$ až $2,5 \cdot 10^{-5}$		k je řádu 10^{-7} až 10^{-9}
NAKLÁDAL et al. in HERČÍK et al., 1987	–	–	max. $T = 3,6 \cdot 10^{-3}$, odpovídající $k = 6 \cdot 10^{-5}$, min. $T = 3,7 \cdot 10^{-5}$, odpovídající $k = 6 \cdot 10^{-7}$		–
PAZOUREK et al., 1994	$k = 1,5 \cdot 10^{-4}$	k je řádu 10^{-6} až 10^{-8}	$k = 2,3 \cdot 10^{-4}$ až $9,6 \cdot 10^{-6}$	$k = 1,1 \cdot 10^{-5}$ až $6,6 \cdot 10^{-5}$	–

něný kolektor (AB), jejich hydraulické vodivosti se liší jen nepatrně.

Dále byly zadány 3 různé hodnoty hydraulické vodivosti v místě podélného prvku. Tyto hodnoty vyjadřují zvýšenou propustnost danou porušením křídového izolátoru a kolektoru systémem puklin. Podélný prvek reprezentuje zjednodušení, kdy proudění podzemní vody systémem puklin v tektonickém pásmu je nahrazeno prouděním v prostoru o šířce 2 metry. Vzhledem k nahrazení systému puklin podélným pásmem jsou tomuto zjednodušení přizpůsobeny i hydraulické vodivosti. Ty byly zadány v rozmezí $1 \cdot 10^{-2}$ až $1 \cdot 10^{-4} m \cdot s^{-1}$ ve směrech horizontálních a v rozmezí $2 \cdot 10^{-3}$ až $2 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-1}$ ve směru vertikálním, vždy s odlišností jednoho řádu, a byly tak sestaveny tři varianty modelu proudění podzemní vody (hodnoty v $m \cdot s^{-1}$):

varianta 1 : $k_x = 1 \cdot 10^{-2}$, $k_y = 1 \cdot 10^{-2}$, $k_z = 2 \cdot 10^{-3}$

varianta 2 : $k_x = 1 \cdot 10^{-3}$, $k_y = 1 \cdot 10^{-3}$, $k_z = 2 \cdot 10^{-4}$

varianta 3 : $k_x = 1 \cdot 10^{-4}$, $k_y = 1 \cdot 10^{-4}$, $k_z = 2 \cdot 10^{-5}$

Model varianty 1 má nejpříznivější propustnost podélného prvku jakožto preferenční cesty, model varianty 3 má v tomto případě nejméně příznivou propustnost, stejnou jako je propustnost kvartérního kolektoru.

Pro porovnání vlivu preferenční cesty na proudění podzemní vody byla sestavena varianta 4, ve které není uvažována odlišná propustnost v prostředí podélného prvku.

Pro účely matematického modelování bylo předpokládáno, že pro proudění v podélném prvku platí Darcyho zákon.

V souhrnu lze říci, že hodnoty hydraulické vodivosti v jednotlivých vrstvách v horizontálním směru (k_x a k_y) byly zadány shodně, ve vertikálním směru (k_z) byly zadány hodnoty nižší (v 1. vrstvě pětkrát nižší, ve 2., 3. a 4. vrstvě desetkrát nižší). Odpovídá to poznatkům o snížené propustnosti ve směru kolmém k vrstvám, v závislosti na litologickém vývoji a vzájemné poloze zrn různých velikostí v jednotlivých vrstvách (ŠILAR et al., 1992, HERČÍK et al., 1987).

Hodnoty hydraulické vodivosti v prostředí podélného prvku byly zadány shodně v horizontálním směru (k_x a k_y), ve vertikálním směru (k_z) byly zadány hodnoty pět-

krát nižší. Vertikální propustnost v prostředí puklin nemusí být vždy nižší než horizontální, jako je tomu u okolních vrstev křídových útvarů či kvartéru. Snížená vertikální propustnost puklinového prostředí, která zde byla uvažována, může být způsobena např. přirozenou kolmatací či tím, že se pukliny s hloubkou spínají a klesá tak jejich propustnost (HERČÍK et al., 1987). Jiná možnost hodnot k_z je diskutována dále.

Dále byly ve všech čtyřech variantách modelu zadány stejné okrajové podmínky, a to dva druhy: konstantní výška hladiny podzemní vody a infiltrovaný podíl srážek.

Konstantní výška hladiny podzemní vody byla zadána na levém a pravém okraji území modelu. Je tak vyjádřen směr proudění a spád hladiny podzemní vody. Směr proudění je rovnoběžný s osou x (podélná strana modelu). Gradient potenciálu proudění v křídovém kolektoru byl zvolen 0,005, což odpovídá podmínkám proudění v oblastech nádrže křídových zvodní (HERČÍK et al., 1987; PAZOUREK et al., 1994). Gradient potenciálu proudění v kvartérním kolektoru byl zvolen srovnatelný s gradientem křídové zvodně, a to 0,006.

Konstantní výška hladiny podzemní vody byla zadána v první, ve třetí a čtvrté vrstvě. V první vrstvě je volná hladina podzemní vody, ve třetí a čtvrté je hladina napjatá. Je uvažována jednotná úroveň piezometrické výšky spojeného kolektoru AB.

Přehled tlakových poměrů a zadaných konstantních výšek hladin podzemní vody je podán v tabulce 2.

Tabulka 2. Přehled zadaných konstantních výšek hladin

číslo vrstvy	hladina podzemní vody	zadaní konstantních hladin (m n. m.)	
		levý okraj	pravý okraj
1.	volná	217	212,5
3. a 4.	napjatá	216	212,5

Jako součást okrajových podmínek byl dále zadán infiltrovaný podíl srážek, a to na první vrstvu. Hodnota infiltrace byla zvolena 64 mm za rok, což odpovídá $2 l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$.

Pro účely bilančního hodnocení průtoku podzemní

vody modelem a přetoku podzemní vody mezi jednotlivými vrstvami při různé propustnosti puklinového pásma byly ve všech variantách shodně zadány čtyři výpočtové bilanční zóny. Tyto zóny jsou totožné s vymezením vrstev 1 až 4.

Proudění bylo simulováno jako ustálené s konečným časem 7300 dnů (tj. 20 let). Byly řešeny čtyři varianty proudění, které se od sebe liší pouze zadáním jiných hydraulických vlastností v místě podélného prvků. Varianty 1 až 3 tak simulují proudění v puklinově porušeném prostředí s různou propustností v místě puklinového systému, varianta 4 simuluje proudění bez porušení prostředí puklinovým pásmem.

VÝSLEDKY MODELU PROUDĚNÍ A ZHODNOCENÍ ZRANITELNOSTI

Jako výsledky jednotlivých variant modelu bylo získáno množství výstupů, které znázorňují proudění podzemní vody formou hydroizohyps a hydroizopiez, barevného rozlišení či šipek znázorňujících gradienty či vektory rychlosti proudění, a to vše pro každou modelovou vrstvu či jakýkoliv příčný nebo podélný řez modelovým územím. Dále byly získány celkové bilance proudění modelovým územím pro každou variantu. Jako příklad grafických výstupů jsou zde prezentovány obr. 4 až 8.

Na obr. 4 až 7 jsou znázorněny některé výstupy z modelu varianty 2. Obr. 4 znázorňuje proudění podzemní vody v 1. vrstvě – kolektoru Q. Z tohoto obrázku je dob-

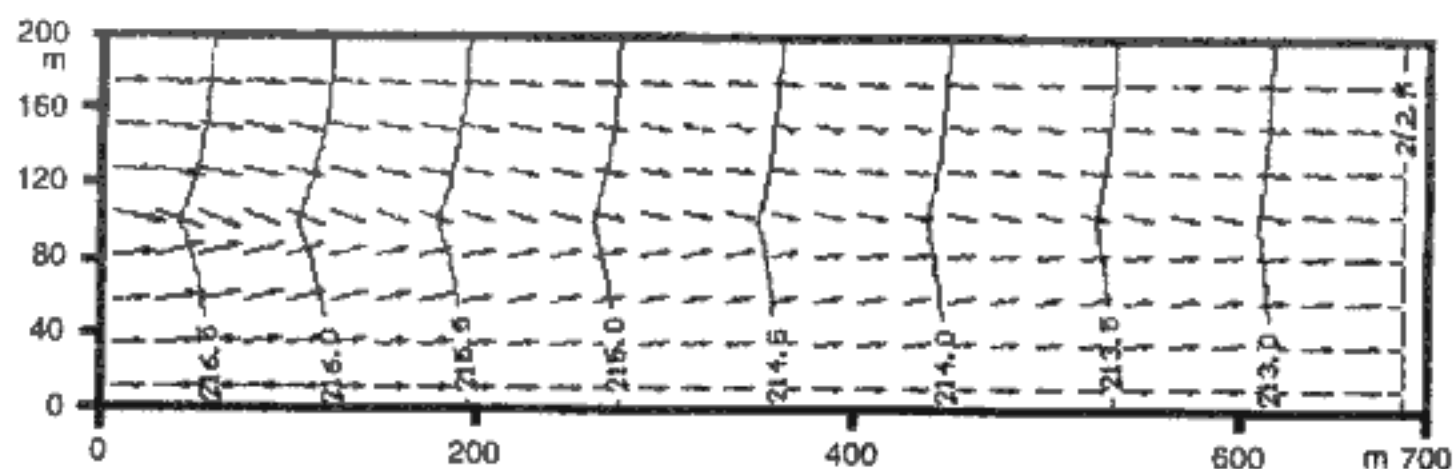
ře patrný drenážní účinek preferenční cesty. Obr. 5 a obr. 6 znázorňují proudění ve 3. a 4. vrstvě – kolektoru AB. Zde je patrný dotační účinek preferenční cesty. Obr. 7 znázorňuje proudění podzemní vody v příčném řezu (řez je veden před středem modelového území ve vzdálenosti 300 m od jeho levého okraje). Z tohoto obrázku je též patrný drenážní účinek preferenční cesty v 1. vrstvě (překrývající se šipky směřující k preferenční cestě), zrychlené proudění preferenční cestou (velké svislé šipky) a dotační účinek preferenční cesty ve 3. a 4. vrstvě (šipky naznačující směr proudění od preferenční zóny do kolektoru).

Obr. 8 znázorňuje pro porovnání proudění podzemní vody ve variantě 4 (bez puklinového porušení), a to v 1. vrstvě. Proudění je zcela rovnoměrné. Stejný charakter proudění je též ve 3. a 4. vrstvě.

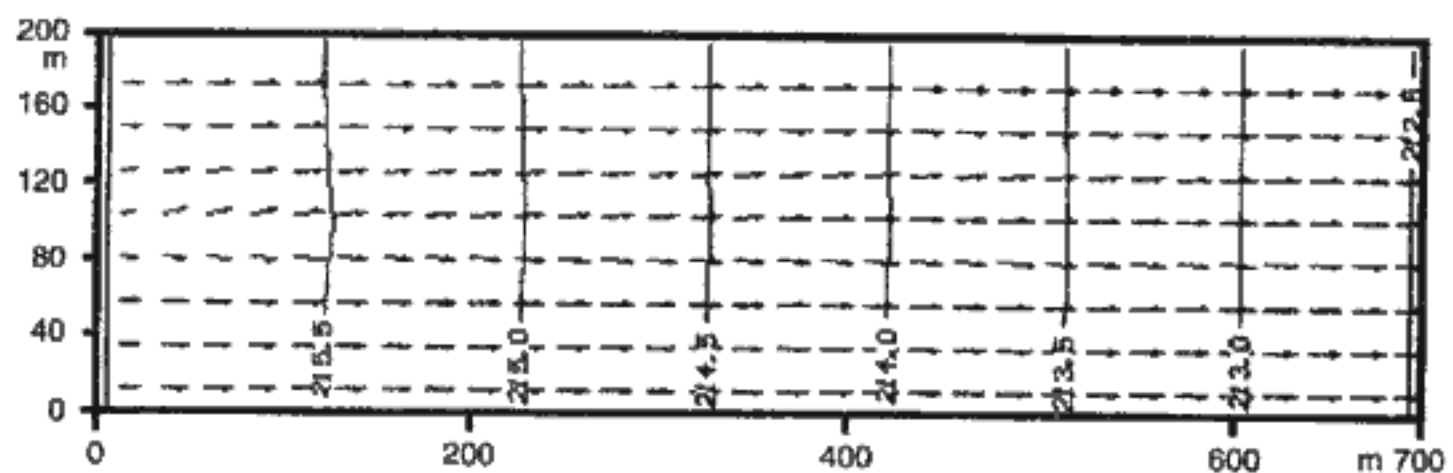
Z výsledků matematického modelování proudění podzemní vody vyplývá, že v podmínkách horizontálně uložených nezpevněných (kvartérních) a zpevněných (křídových) sedimentárních souvrství je při neporušeném izolátoru a určitých tlakových poměrech (piezometrická výška křídového napjatého kolektoru je o málo nižší než výška volné hladiny kvartérního kolektoru) spodní (křídový) kolektor prakticky nezranitelný (varianta 4). Proudění podzemní vody je horizontálního charakteru. Směr, sklon a rychlosti proudění jsou dány rozdílem hydraulických potenciálů v místě napájení a odvodnění kolektorů a propustností horninového prostředí.

V případě, že horninové prostředí je porušeno systémem puklin, který tvoří pásmo se zvýšenou propustnos-

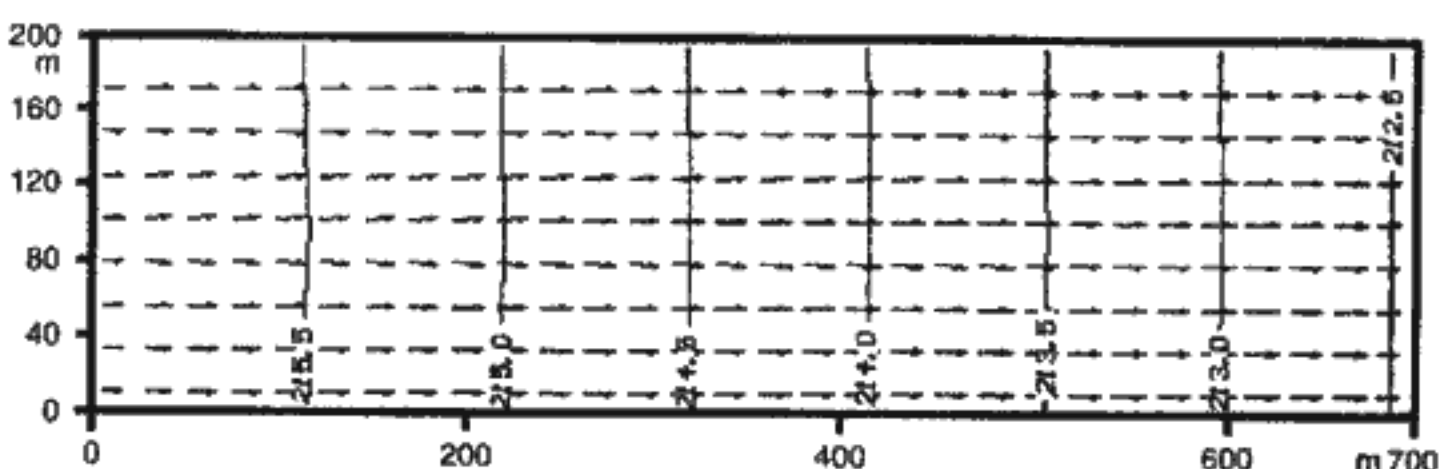
4. Model proudění (varianta 2) – 1. vrstva.

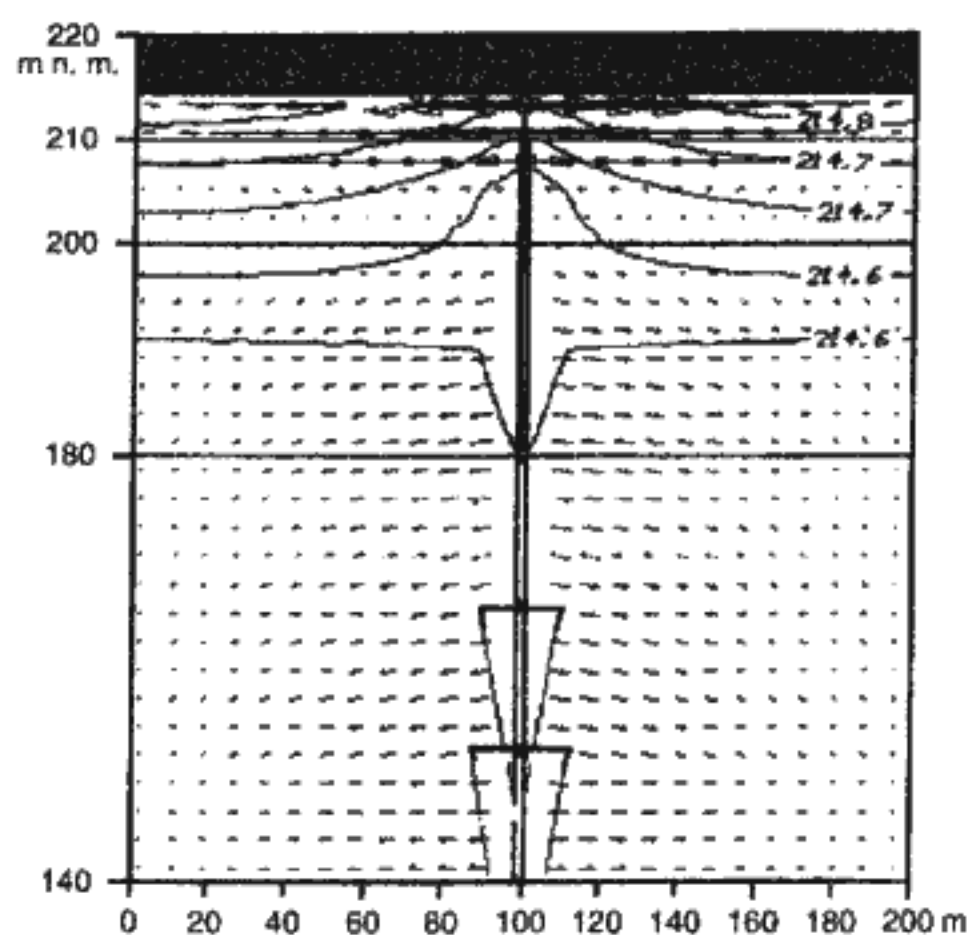


5. Model proudění (varianta 2) – 3. vrstva.



6. Model proudění (varianta 2) – 4. vrstva.





7. Model proudění (varianta 2) – příčný řez.

tí, vznikají preferenční cesty proudění. Při rozdílných hydraulických potenciálech obou zvodní, kdy hydraulická výška spodní (křídové) zvodně je nižší než hydraulická výška svrchní (kvartérní) zvodně, a při ostatních parametrech, které byly zadány, dochází k přetékání vody preferenční cestou ze svrchní zvodně do spodní (varianty 1 až 3).

Ve všech třech případech zadávané hydraulické vodivosti v prostředí preferenční cesty se projevuje drenážní účinek této cesty v kolektoru Q. Tento účinek klesá se snižující se hydraulickou vodivostí prostředí preferenční cesty.

V prostředí izolátoru AB/Q tvoří preferenční cesta při zadáných tlakových poměrech podmínky pro přetok podzemní vody ze svrchního kolektoru do spodního (křídového) kolektoru a zranitelnost spodního kolektoru je vysoká.

V prostředí kolektoru AB se projevuje dotace vodou přiváděnou preferenční cestou. Velikost dotace a její hloubkový dosah závisí na propustnosti preferenční cesty v kombinaci s tlakovými poměry obou kolektorů. Čím více se k sobě přibližují hydraulické výšky obou zvodní, tím klesá dotační účinek preferenční cesty.

Charakter proudění podzemní vody v prostředí preferenční zóny při daných tlakových poměrech se odlišuje v závislosti na její propustnosti. Při největší zadané hodnotě hydraulické vodivosti je proudění převážně horizontální a dosahuje nejvyšších rychlostí. Při střední

zadané hodnotě hydraulické vodivosti převládá horizontální složka vektoru rychlosti proudění nad vertikální složkou více než při nejmenší zadané hodnotě hydraulické vodivosti. Ve spodní části preferenční zóny je ve všech případech proudění pouze horizontální.

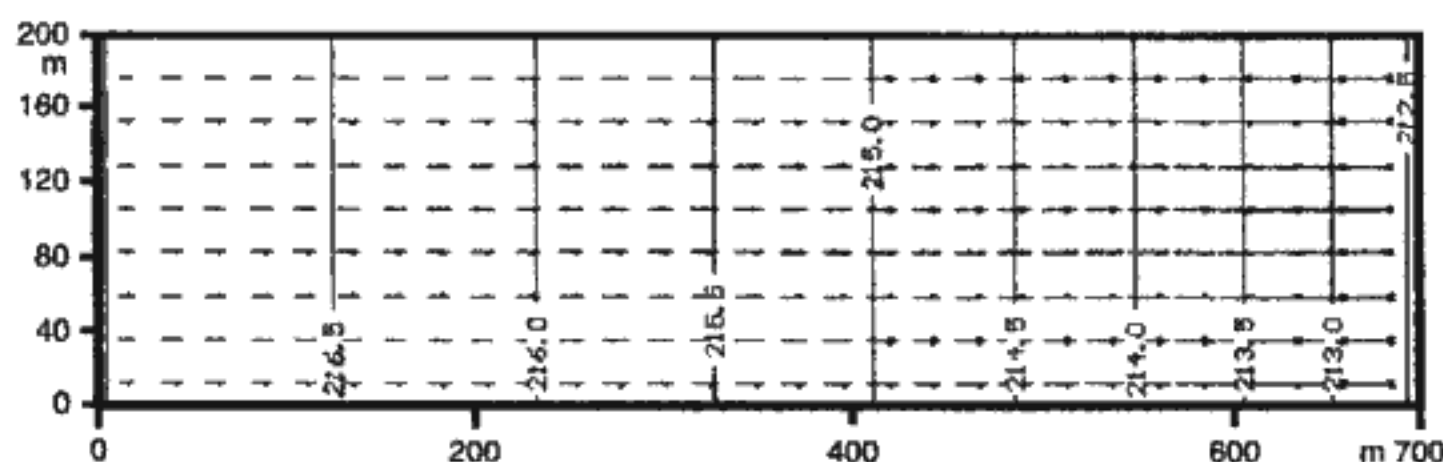
Pro každou variantu proudění byly modelem vypočteny bilance proudění v jednotlivých zadáných zónách a celkové bilance proudění modelovým územím. Bilance proudění mezi jednotlivými zónami kvantifikují vertikální přetoky mezi vrstvami. Celkový přehled bilancí pro jednotlivé varianty modelu je uveden v tab. 3. Hodnoty jsou z $\text{m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$ přepočteny na $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ se zaokrouhlením na dvě desetinná místa. Schematický přehled bilancí jednotlivých bilančních zón – modelových vrstev – je uveden na obr. 9.

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ TRANSPORTU KONTAMINANTŮ

Po realizaci modelu proudění byl sestaven matematický model transportu kontaminantů. Pro všechny čtyři předchozí varianty modelu proudění bylo použito stejných zadávaných transportních parametrů. Varianty 1 až 3 simulují transport kontaminantů v prostředí porušeném puklinovým pásmem, varianta 4 slouží jako srovnávací (prostředí bez porušení puklinovým pásmem).

Modelování transportu kontaminantů, podobně jako modelování proudění podzemní vody, představuje vždy určité zjednodušení celého procesu. U transportu kontaminantů jde o to vhodným způsobem kvantifikovat a popsat jednotlivé složky transportu. Ve skutečnosti se jedná o velice složitý komplexní proces závisící na mnoha faktorech, které nelze vždy přesně popsat a vystihnout. Problémem při identifikaci parametrů u reálných přírodních systémů je jejich značná časová a prostorová variabilita. Pro účely matematického modelování v tomto výzkumu byla přijata určitá zjednodušující kritéria jak co se týká parametrů a jejich vztahu k modelovanému území, tak i co se týká samotného modelovaného území. Podélné pásmo puklin charakterizované zvýšenou propustností je zohledněno pouze z hlediska proudění, ne však z hlediska odlišnosti transportních parametrů. Dále byla předpokládána platnost Darcyho zákona v prostředí zvýšených hydraulických vodivosti prostředí preferenční cesty. Jiné způsoby proudění a s tím související transportní procesy nebyly uvažovány.

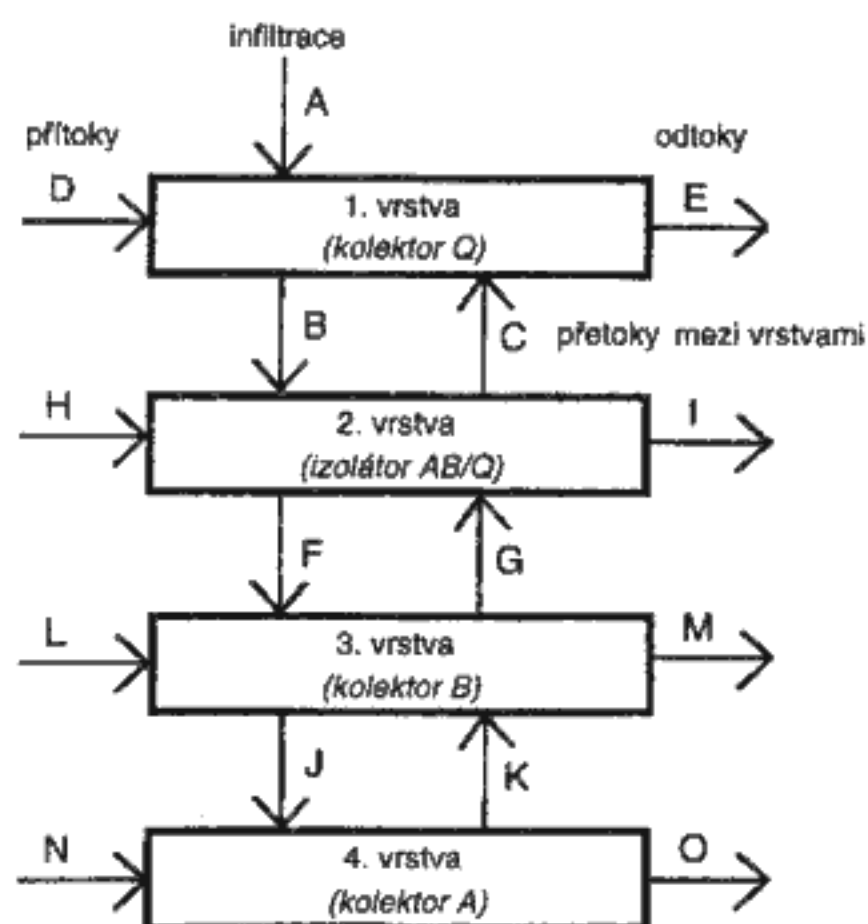
V rámci specifikace okrajové podmínky byl zadán



8. Model proudění (varianta 4), 1. vrstva.

zdroj kontaminace. Byl zvolen zdroj s konstantní koncentrací. Takovým zdrojem může být např. nezabezpečená skládka. Plošná velikost zdroje byla stanovena 10 x 10 m a zdroj byl zadán do tří elementů svrchního kolektoru (1. vrstvy). Zdroj byl umístěn nad preferenční cestu, aby tak byla postižena nejnepříznivější situace z hlediska možnosti kontaminace podzemní vody. Ve směru osy x byl zdroj kontaminace umístěn v rozmezí 50 až 60 metrů od levého okraje modelového území. Konstantní koncentrace zdroje byla zadána $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, což představuje stoprocentní koncentraci v místě zdroje. Doba působení zdroje kontaminace byla zadána ve shodě s celkovým časovým omezením modelu, tj. 20 let. Umístění zdroje s konstantní koncentrací je znázorněno na obr. 2.

Pro účely sledování vývoje koncentrace kontaminantu v různých částech modelového území byly zadány čtyři pozorovací objekty. Tři z nich jsou umístěny v místě preferenční cesty, kde se předpokládalo největší šíření kontaminantů, a jeden je umístěn mimo preferenční cestu. V každém z pozorovacích objektů byly zadány 4 pozorovací úrovně, které jsou umístěny ve středu každé vrstvy. Označení pozorovacích objektů je charakterizováno písmenem (P = objekt umístěný v preferenční cestě, K = objekt umístěný mimo preferenční cestu), troj-



9. Schematický přehled bilancí jednotlivých vrstev.

místním číslem (udává v metrech umístění objektu ve směru osy x) a číslem za lomítkem (udává číslo vrstvy, ve které je umístěna pozorovací úroveň). Umístění pozorovacích objektů je znázorněno na obr. 2.

Tabulka 3. Přehled bilance proudění pro jednotlivé varianty v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$

vrstva (podle obr. 9)	označení bilance (podle obr. 9)	model				
		varianta 1	varianta 2	varianta 3	varianta 4	
1.	A	0,28	0,28	0,28	0,28	
	B	1,43	1,36	0,68	0,13	
	C	0,02	0,01	0,01	0,00	
	D	1,53	1,46	0,91	0,55	
	E	0,40	0,39	0,51	0,70	
	A + C + D	1,83	1,75	1,20	0,83	
	B + E	1,83	1,75	1,19	0,83	
2.	F	1,90	1,35	0,68	0,13	
	G	0,49	0,00	0,00	0,00	
	H	0,00	0,00	0,00	0,00	
	I	0,00	0,00	0,00	0,00	
	B + G + H	1,92	1,36	0,68	0,13	
	C + F + I	1,92	1,36	0,68	0,13	
3.	J	0,71	0,79	0,39	0,08	
	K	0,01	0,00	0,00	0,00	
	L	3,32	0,89	0,85	0,99	
	M	4,04	1,46	1,13	1,04	
	F + K + L	5,23	2,25	1,52	1,12	
	G + J + M	5,23	2,25	1,52	1,12	
4.	N	6,27	2,30	2,23	2,39	
	O	6,97	3,09	2,62	2,47	
	J + N	6,98	3,09	2,62	2,47	
	K + O	6,98	3,09	2,62	2,47	
1. + 2. + 3. + 4. (celková bilance proudění modelem)		A + D + H + L + N = = E + I + M + O	11,40	4,94	4,26	4,21

V další fázi sestavování matematického modelu byly zadány parametry hydrodynamické disperze. Šlo o specifikaci koeficientu molekulární difuze a parametrů mechanické disperze – podélné disperzivity a příčné horizontální a vertikální disperzivity. Pro celou oblast modelu bylo uvažováno, že mechanický disperzní proces je zcela dominantní (Pecletovo číslo $Pe > 10^4$ – podle DOMENICA a SCHWARTZE, 1990 in ČÍSLEROVÁ a VOGEL, 1998). Proto byl koeficient molekulární difuze definován jako nulový. Zadání podélné disperzivity vychází z poznatku, že její hodnota v reálných podmínkách je obtížně stanovitelná. Hodnoty podélné disperzivity zjištěné v laboratoři jsou řádově nižší než hodnoty měřené v terénu. Problémem při kvantifikaci hodnot podélné disperzivity je tzv. měřítkový efekt, kdy se zvyšujícím se měřítkem testu vzrůstají i hodnoty podélné disperzivity. Závislost hodnot podélné disperzivity na měřítku testu udává např. GELHAR (1985). Další komplikace v kvantifikaci disperze je způsobena existencí zón s vysokou hydraulickou vodivostí (DESBARATS, 1990; ANDERSON, 1992). Pro účely matematického modelování v tomto výzkumu byly zadány následující hodnoty:

- podélná disperzivity = 10 m,
- podíl horizontální příčné disperzivity a podélné disperzivity = 0,1,
- podíl vertikální příčné disperzivity a podélné disperzivity = 0,01.

Tyto hodnoty byly zadány shodně pro všechny vrstvy.

Co se týká popisu a kvantifikace chemických reakcí, byl zvolen rovnovážný popis. Byla uvažována lineární sorpce. Jako kvantifikace procesu byla zadána první sorpční konstanta (tj. distribuční koeficient pro lineární sorpci), a to v hodnotě $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (shodně pro všechny vrstvy). Tato hodnota vychází ze zhodnocení distribučních koeficientů různých chemických sloučenin prezentovaných jako kontaminanty podle MERCERA, SKIPPA a GIFFINA (1990). Chemické reakce probíhající v horninovém prostředí jsou velice složitým procesem, obtížně kvantifikovatelným tak, aby byly zohledněny veškeré jeho složky. Volba mezi rovnovážným a kinetickým popisem závisí na charakteru reakce. Při rozhodování je důležitým faktorem rychlost reakce ve vztahu k fyzikálnímu transportnímu procesu. Ve většině případů je volba popisu omezena nedosažitelností dat potřebných ke stanovení parametrů.

Zohlednění advekce bylo charakterizováno matematickou metodou výpočtu transportní rovnice. Po vyzkoušení všech možností voleb matematických metod byla zvolena modifikovaná metoda charakteristik (MMOC).

Charakter řešení matematického modelu byl stanoven jako neustálený, počáteční čas 0, konečný čas 7300 dnů (tj. 20 let – stejně jako u modelu proudění). Dále byl po vyzkoušení různých možností stanoven maximální počet transportních kroků, a to 15 000.

Transport kontaminantů byl simulován se stejnými daty pro každou z variant modelu proudění. Varianty 1 až 3 tak představují model transportu kontaminantů

v prostředí porušeném puklinovým systémem, varianta 4 představuje pro srovnání model transportu kontaminantů v prostředí bez puklinového pásma.

VÝSLEDKY MODELU TRANSPORTU A ZHODNOCENÍ ZRANITELNOSTI

Jako výsledky matematického modelování transportu kontaminantů bylo získáno velké množství obrazových a grafických výstupů. Pro každou z variant jde o znázornění šíření kontaminantů v každé vrstvě a v jakémkoli příčném či podélném řezu, a to pro každý ze zadaných časových kroků. Dále byly pro každou z variant obdrženy grafické závislosti časového vývoje koncentrace kontaminantu pro každou ze zadaných pozorovacích úrovní v každém pozorovacím objektu. Tyto grafické výstupy nejlépe umožňují porovnání šíření kontaminačního mraku pro jednotlivé varianty modelu v celém časovém úseku simulace. Jako příklad takovýchto výstupů jsou zde prezentovány grafy v obr. 10, které znázorňují časový vývoj koncentrace v pozorovacím objektu P200/1–4 pro každou variantu modelu. Tento pozorovací objekt je v porovnání s ostatními pozorovacími objekty umístěn nejbližší zdroji kontaminace, a to v místě preferenční cesty. Koncentrace v grafech jsou udány v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, ale vzhledem ke způsobu zadání zdroje kontaminace ($100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} = 100\%$ koncentrace) tyto hodnoty vyjadřují též procento koncentrace zdroje.

První uvedený graf v obrázku 10 (varianta 1) ukazuje postupný nárůst koncentrace kontaminantu v 1., 2. a 3. vrstvě, přičemž nejrychlejší a největší nárůst nastal v preferenční zóně v prostředí 2. vrstvy.

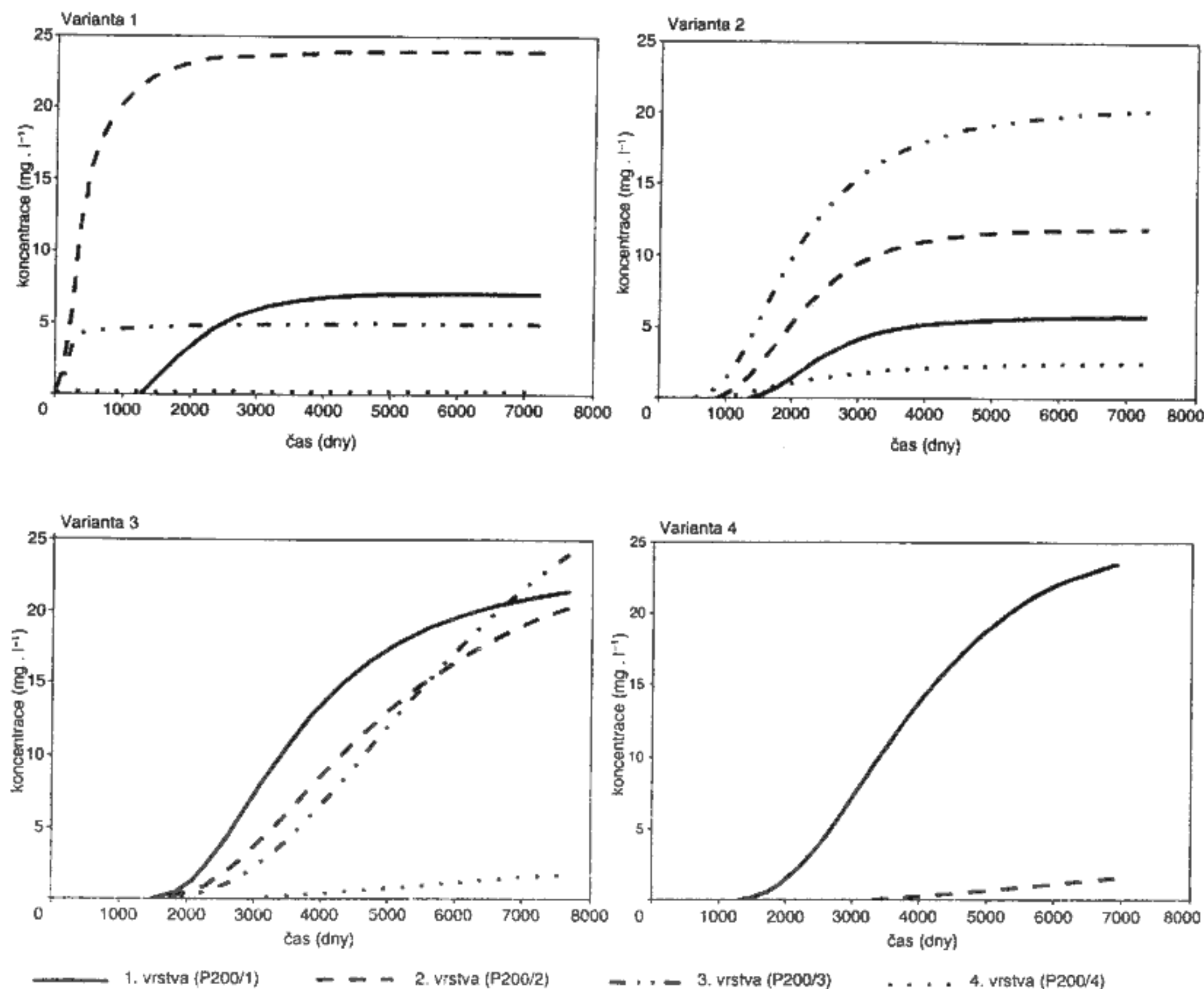
Druhý graf v obr. 10 (varianta 2) ukazuje postupný nárůst koncentrace kontaminantu ve všech čtyřech vrstvách, přičemž největší nárůst nastal ve 3. vrstvě.

Třetí graf v obr. 10 (varianta 3) ukazuje v porovnání s předchozími dvěma variantami pomalejší nárůst koncentrace. Koncentrace vzrůstá především v 1., 2., a 3. vrstvě.

Čtvrtý graf v obr. 10 (varianta 4) ukazuje, že v modelu prostředí bez puklinového porušení dochází k nárůstu koncentrace kontaminantů především v 1. vrstvě a v delším časovém období mírně také ve 2. vrstvě.

Ze všech grafických a obrazových výstupů modelů var. 1 až 3 vyplývá, že podélný prvek reprezentující pásmo puklinového porušení izolátoru AB/Q má zásadní vliv na šíření kontaminantů ze zdroje kontaminace do spodního kolektoru (AB). V případě podélného prvku s největší zadanou hodnotou hydraulické vodivosti (var. 1) dochází k šíření kontaminantu rychleji a do větších vzdáleností od zdroje ve směru proudění podzemní vody než ve variantách 2 a 3.

Se snižující se hodnotou hydraulické vodivosti prostředí podélného prvku (var. 2 a 3) se kontaminanty šíří pomaleji a do menších vzdáleností od zdroje kontaminace, avšak do větších šířek než ve var. 1, a to jak ve svrchním kolektoru (Q), tak i ve spodním kolektoru (AB).



S pomalejším šířením kontaminace zároveň vzrůstají koncentrace v zasaženém prostoru, a to v obou kolektorech.

V případě prostředí, které není porušeno puklinovým pásmem (var. 4), se kontaminanty šíří především ve svrchním kolektoru Q a zčásti pronikají i do izolátorových hornin. V zadaném časovém úseku nedošlo k rozšíření kontaminantů do spodního kolektoru AB.

Z výsledků matematického modelování transportu kontaminantů je zřejmé, že při zadaných parametrech transportních procesů propustnost preferenční cesty významně ovlivňuje šíření kontaminačního mraku a tím i zranitelnost spodního křídového kolektoru.

DISKUSE

Způsob řešení problematiky puklinově postižených formací sedimentárních struktur prezentovaný v tomto výzkumu je pouze jednou z možností přístupu k této problematice. V rámci zvoleného řešení formou zohlednění preferenční cesty bylo přijato určité zjednodušení, a to

platnost Darcyho zákona pro proudění v prostředí preferenční cesty. Tato podmínka nemusí být v reálných podmínkách vždy splněna, ale v mnoha případech lze její splnění předpokládat.

Co se týká samotné obecné struktury, která byla základem pro sestavení matematického modelu proudění podzemní vody a transportu kontaminantů, její definice a prostorová a časová diskretizace představují pouze jednu z více možností, které mohou nastat v reálných podmínkách západní části české křídové pánve a jiných obdobných sedimentárních komplexů. Každý zadávaný parametr matematického modelu, od mocností vrstev, přes hydraulické parametry, okrajové podmínky, orientaci preferenční cesty až po volbu různých kombinací transportních parametrů, může ovlivnit způsob proudění podzemní vody a transport kontaminantů a tím i zranitelnost spodního kolektoru. V dalších odstavcích je diskutována možnost vlivu zadávaných parametrů na výsledky výzkumu.

Vymezení modelových vrstev – je známo, že výsledky modelového řešení může ovlivnit vymezení modelových vrstev a celkové navržení modelové sítě. V rámci

specifikace vrstev vymezených v tomto výzkumu byla vyzkoušena možnost rozdělit čtvrtou geologickou vrstvou (kolektor A), která je nejmocnější, na dvě modelové vrstvy o stejných mocnostech a jinak stejných vlastnostech. Pravidelnější modelová síť však výsledek simulace nijak neovlivnila.

Volba mocností jednotlivých vrstev – v rámci poznatků o geologických a hydrogeologických poměrech západní části české křídové pánve by bylo v matematickém modelu možno zadávat jiné mocnosti jednotlivých vrstev. Zranitelnost spodního kolektoru závisí v tomto ohledu též na jeho mocnosti – mocností je dána plocha styku preferenční cesty s kolektorem a tím je částečně ovlivněno množství vody, které může vtékat z preferenční cesty do kolektoru. Významnou roli zde mají také hodnoty hydraulických vodivostí obou prostředí.

Orientace preferenční cesty – v kombinaci s ostatními faktory též zásadním způsobem může ovlivnit výsledek. Byla vyzkoušena orientace preferenční cesty kolmo na směr proudění při jinak stejných zadaných parametrech a bylo zjištěno, že v takovém případě preferenční cesta nijak neovlivní proudění podzemní vody v porovnání s modelem proudění var. 4 (bez puklinového porušení). To ovšem platí pouze za předpokladu, že kolmo orientovaná preferenční cesta není průběžně napojena např. na drenážní prvek tvořící pro model okrajovou podmínku. V takovém případě by naopak docházelo k výraznému ovlivnění proudění podzemních vod a transportu kontaminantů preferenční cestou.

Hydraulické vlastnosti jednotlivých vrstev – také mohou významně ovlivnit proudění i transport. V daném případě může zejména hydraulická vodivost spodního kolektoru významně ovlivnit velikost dotace vodou přiváděnou preferenční cestou ze svrchních vrstev.

Hydraulická vodivost v prostředí preferenční cesty – v tomto ohledu lze zkoumat případ (kromě zadání zcela jiných hodnot), kdy hodnota hydraulické vodivosti ve vertikálním směru je stejná či dokonce vyšší než ve směrech horizontálních. Je to případ, který může v puklinových systémech zcela reálně nastat. Tento problém byl též zkoumán sestavením varianty 2a. Pro variantu 2 byly ponechány všechny zadané parametry a změněna pouze hodnota hydraulické vodivosti ve vertikálním směru v prostředí preferenční cesty. Tato hodnota byla zadána $k_z = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy dvakrát vyšší, než jsou hodnoty hydraulické vodivosti v horizontálních směrech k_x a k_y ve var. 2 a desetkrát vyšší než hodnota k_z ve var. 2. Z výsledků modelu proudění a porovnání bilancí pro varianty 2 a 2a vyplývá, že ve var. 2a je pouze nepatrně zvýšeno vertikální proudění i celkový průtok modelovým územím oproti var. 2. Lze tedy konstatovat, že zvýšená vertikální propustnost preferenční zóny při jinak stejných parametrech nemá zásadní vliv na zvýšení zranitelnosti kolektoru AB.

Okrajové podmínky – vzájemný poměr hydraulických výšek obou kolektorů může ovlivnit proudění vody preferenční cestou. Byl zkoumán pouze problém, kdy hydraulická výška spodního kolektoru je nižší než hydrau-

lická výška svrchního kolektoru. Případy opačného poměru hydraulických výšek či jejich stejné úrovně v celém modelovém území nebyly zkoumány – zpravidla nejsou pro zranitelnost podzemních vod významné (výjimku mohou představovat případy, kdy má kontaminant významně vyšší hustotu než voda – např. chlorované uhlovodíky). Pro posouzení vlivu rozdílu hydraulických výšek obou kolektorů byla sestavena varianta 2b. V této variantě byly ponechány všechny parametry stejné jako ve var. 2, vyjma okrajových podmínek – hydraulických výšek. Ty byly zadány takto:

1. vrstva: 218 m n. m. (levý okraj), 214,5 m n. m. (pravý okraj),

3. a 4. vrstva shodně: 213,5 m n. m. (levý okraj), 210 m n. m. (pravý okraj).

Byl tak zvýšen rozdíl hydraulických výšek svrchního a spodního kolektoru. Z výsledků modelu a porovnání bilancí obou variant vyplývá, že ve var. 2b dochází k výrazné převaze vertikálního proudění preferenční zónou a hlubšímu dosahu dotace spodního kolektoru AB, a tím i vyšší zranitelnosti spodního kolektoru.

Jímání podzemních vod – může též významným způsobem ovlivnit režim hydrogeologické struktury. Při modelování proudění a transportu na konkrétní lokalitě je proto důležité pečlivě shromáždit údaje o jímání a v modelu je zohlednit.

Co se týká transportu kontaminantů, opět lze v teoretickém případě měnit všechny zadávané parametry a zkoumat jejich vliv na transport kontaminantů v různých vzájemných kombinacích s různě změněnými parametry modelu proudění. V tomto výzkumu byla problematika proudění i transportu řešena obecně, s možností aplikace na konkrétní oblasti (viz Závěr). Zjišťování vlivu různých obměn transportních parametrů v kombinacích s obměnami parametrů proudění přesahuje rámec možností tohoto výzkumu. Pro porovnání vlivu preferenční cesty na šíření kontaminantů byl pouze zkoumán vliv umístění zdroje kontaminantů mimo preferenční zónu, a to pro jinak stejné parametry proudění i transportu varianty 3. Byla tak sestavena varianta 3a, ve které byl zdroj kontaminantů stejného charakteru jako u var. 3 umístěn mimo preferenční cestu. Z výsledků modelu vyplývá, že v první vrstvě drenážní účinek preferenční cesty ovlivňuje směr šíření kontaminačního mraku. Ve druhé a třetí vrstvě jsou kontaminanty transportovány až do prostředí preferenční cesty a po jejím dosažení se zde šíří výrazně rychleji než v okolním prostředí.

Z výše uvedeného výčtu vyplývá, že problematiku předkládanou v tomto výzkumu by bylo možno zkoumat v mnoha různých kombinacích parametrů proudění i transportu. Parametry, které byly zvoleny v tomto výzkumu, jsou jednou z mnoha možností, rovnocenných s jinými možnostmi, a odpovídají reálným přírodním podmínkám v některých oblastech západní části české křídové pánve. Výsledky práce lze aplikovat také v jiných sedimentárních strukturách, které svými geologickými a hydrogeologickými poměry odpovídají zde řešené obecné struktuře.

ZÁVĚR

Problematiku proudění podzemní vody a transportu kontaminantů řešenou v tomto výzkumu v rámci definované obecné struktury lze aplikovat v takových oblastech sedimentárních struktur, které mají podobné uspořádání vrstev, hydraulických parametrů a tlakových poměrů jako zde řešená obecná struktura. V podmínkách západní části české křídové pánve jsou to oblasti, ve kterých svrchní kolektor (křídový nebo kvartérní) má volnou hladinu podzemní vody a izolátorem je oddělen od spodního, křídového kolektoru s napjatou hladinou podzemní vody, přičemž hydraulická výška spodního kolektoru je na nižší úrovni než hydraulická výška svrchního kolektoru, a vodohospodářský zájem je soustředěn na spodní kolektor. Jde o některé oblasti hydrogeologických rajonů 443 Jizerský izolátor, 451 Křída severně od Prahy, 453 Roudnická křída, 454 Ohárecká křída, 461 a 462 Křída Dolního Labe po Děčín – levý a pravý břeh, 465 Křída Dolní Ploučnice a Horní Kamenice. Například v rajonech 453 a 454 je vyvinut kolektor cenomansko-spodnoturonského stáří – kolektor AB. Je zastoupen písčitými sedimenty a pískovci s jednotným zvodněním. Celková zvodněná mocnost kolektoru AB v oblasti rajonu 453 je 10–110 m, v oblasti rajonu 454 je to 0–60 m. V nadloží je vyvinut (místy nepravidelně) izolátor – prachovce a jílovce svrchnoturonsko-coniackého stáří (NAKLÁDAL in OLMER, KESSL et al., 1990). Na velké části území těchto rajonů je vyvinut také kvartérní kolektor. Je tvořen terasovými sedimenty šterkového charakteru s písčitou či jílovitou výplní. Území rajonů 453 a 454 je značně tektonicky postiženo – probíhá zde oherský zlom doprovázený paralelními zlomovými pásmy (pooherské a roudnické zlomové pásmo) a dalšími systémy sekundárních dislokací a puklin. V obou rajonech jsou soustředěny vodárenské odběry využívající podzemní vodu kolektoru AB (jímací území Čepel, Louny, Libochovice). V celém území probíhá intenzivní antropogenní činnost a problematika zranitelnosti je zde vysoce aktuální.

Dalším příkladem vodohospodářsky významné oblasti, ve které lze očekávat podobné procesy preferenčního proudění, je oblast ústecké a děčínské termální anomálie ve výše jmenovaných rajonech 462 a 465. Kolektory této oblasti mají velké rozdíly hydraulických výšek mezi svrchní (potenciálně kontaminovanou) zvodní a spodní (vodohospodářsky využívanou) zvodní. Také toto území je značně tektonicky postiženo (děčínské zlomové pole).

Na základě výsledků matematického modelování lze souhrnně konstatovat, že výskyt puklinových systémů jakožto preferenčních cest proudění je za podmínek nevyrovnaných tlakových poměrů (hydraulická výška spodní napjaté zvodně je nižší než hydraulická výška svrchní zvodně s volnou hladinou) a při určitých hydraulických parametrech rozhodujícím faktorem ovlivňujícím zranitelnost spodního křídového, vodohospodářsky významného kolektoru. Zadané parametry

odpovídají některým z vodohospodářsky významných oblastí západní části české křídové pánve. Vzhledem k četnosti výskytu puklinových systémů v celém území pánve nelze problematiku preferenčních cest zanedbat.

K tisku doporučil S. Čurda

Literatura

- ANDERSON, M. P. – WOESSNER, W. W. (1992): Applied groundwater modeling-simulation of flow and advective transport. – Academic Press, Inc., San Diego, California.
- BARENBLATT, G. I. – ZHELTOV, I. P. – KOCHINA, I. (1960): Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. – J. Appl. Mech., 24.
- BERKOWITZ, B. – BEAR, J. – BRAESTER, C. (1988): Continuum models for contaminant transport in fractured porous formations. – Wat. Resour. Res., 24 (8).
- CACAS, M. C. et al. (1990): Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. The flow and transport model. – Wat. Resour. Res., 26 (3).
- ČÍSLEŘOVÁ, M. – VOGEL, T. (1998): Transportní procesy. – Vydavatelství ČVUT, Praha.
- COATS, K. H. – SMITH, B. D. (1964): Dead-end pore volume and dispersion in porous media. – Soc. Petr. Eng. J., 4.
- DAGAN, G. – BRESLER, E. (1979): Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale. – Soil Sci. Soc. Am. J., 43.
- DESBARATS, A. J. (1990): Macrodispersion in sand-shale sequences. – Water Resources Research, 26 (1).
- DOMENICO, P. A. – SCHWARTZ, F. W. (1990): Physical and chemical hydrogeology. – Wiley.
- DURNER, W. – FLUHLER, H. (1996): Multi-domain models for pore-size dependent transport of solutes in soils. – Geoderma, 70.
- DVERSTORP, B. – ANDERSSON, J. (1989): Application of the discrete fracture network concept with field data: possibilities of model calibration and validation. – Wat. Resour. Res., 25 (3).
- DYKHUIZEN, R. C. (1990): A new coupling term for dual – porosity models. – Wat. Resour. Res., 26 (2).
- GELHAR, L. W. – MANTOGLOU, A. – WELTER, C. – REHFELDT, K. R. (1985): A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media. – Electric Power Research Institute, California.
- GERHARD, J. M. (1984): A model of regional ground-water flow in secondary-permeability terrane. – Ground Wat., 22 (2).
- GERKE, H. H. – VAN GENUCHTEN, M. T. (1993): A dual-porosity model for simulating the preferential movement of Water and solutes in structured porous media. – Wat. Resour. Res., 29.
- GINGARTEN, A. C. (1982): Flow test evaluation of fractured reservoirs. – Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., 189.
- GLOVER, K. C. (1987): A dual porosity model for simulating solute transport in oil shale. – Wat. Resour. Invest. Rep., 86–4047.
- GUIGUER, N. – FRANZ, T. (1994): User's manual for Visual MODFLOW. – Waterloo Hydrogeol. Inc. Waterloo.
- HAZDROVÁ, M. et al. (1980): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1 : 200 000, list 02 Ústí nad Labem. – Ústř. úst. geol. Praha.
- HAZDROVÁ, M. et al. (1983): Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1 : 200 000, list 12 Praha. – Ústř. úst. geol. Praha.
- HERČÍK, F. et al. (1987): Hydrogeologická syntéza české křídové pánve. – Staveb. geol., n. p. Praha.
- HSIEH, P. A. – NEUMAN, S. P. – STILES, G. K. – SIMPSON, E. S. (1985): Field determination of three-dimensional hydraulic

- conductivity tensor of anisotropic media. Methodology and application to fractured rocks. – *Wat. Resour. Res.*, 21 (11).
- HUYAKORN, P. S. – LESTER, B. H. – FAUST, C. R. (1983): Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers. – *Wat. Resour. Res.*, 19 (4).
- HUYAKORN, P. S. – PINDER, G. F. (1983): *Computational Methods in Subsurface Flow*. – Academic Press.
- CHEN, C. – WAGENET, R. J. (1992): Simulation of water and chemicals in macropore soils, part 1 and 2. – *J. Hydrol.*, 130.
- JARVIS, N. – JANSSEN, P. E. – DIK, P. – MESSING, I. (1991): Modeling water and solute transport in macroporous soil. Model descriptions and sensitivity analysis. – *J. Soil Sci.*, 42.
- JURY, W. A. (1982): Simulation of solute transport using a transfer function model. – *Wat. Resour. Res.*, 18.
- LINDSTROM, F. T. – BOERSMA, L. (1971): A theory on the mass transport of previously distributed chemicals in a water saturated sorbing porous medium. – *J. Soil Sci.*, 111.
- LONG, J. C. – BILLAUX, D. M. (1987): From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure. – *Wat. Resour. Res.*, 23 (7).
- LONG, J. C. – BILMOUR, P. – WITHERSPOON, P. A. (1985): A model of steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures. – *Wat. Resour. Res.*, 21 (8).
- LONG, J. C. – REMER, J. S. – WILSON, C. R. – WITHERSPOON, P. A. (1982): Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. – *Wat. Resour. Res.*, 18 (3).
- MCDONALD, M. G. – HARBAUGH, A. W. (1988): *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Reference Manual*. – U. S. Geological Survey. Denver.
- MERCER, J. W. – SKIPP, D. C. – GIFFIN, D. (1990): *Basics of pump and treat groundwater remediation technology*. – EPA/600/8-90/003. Oklahoma.
- NAKLÁDAL, V. et al. in HERČÍK, F. et al. (1987): Hydrogeologická syntéza české křídové pánve – Bilanční celek 4. – *Staveb. geol.*, n. p. Praha.
- OLMER, M. – KESSL, J. et al. (1990): *Hydrogeologické rajóny*. – Výzkumný ústav vodohospodářský. Praha.
- PATZELTOVÁ, B. (2000): Vliv puklinově porušeného izolátoru na zranitelnost podzemních vod zkoumaný pomocí matematického modelování v podmínkách západní části české křídové pánve. – *Doktorská disertační práce*, Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- PAZOUREK, J. et al. (1994): *Ledčice – štěrkopísky, závěrečná zpráva*. – Aquatest. Praha.
- PIGGOTT, A. R. – ELSWORTH, D. (1989): Physical and numerical studies of a fracture system model. – *Wat. Resour. Res.*, 25 (3).
- ROTH, K. – FLÜHLER, H. – ATTINGER, W. (1990): Transport of a conservative tracer under field conditions: Qualitative modeling with random walk in a double porous medium. – *Field-Scale Flux in Soils*. Basel.
- SAUVEPLANE, C. (1984): Pumping tests analysis in fractured aquifer formations: state of the art and some perspectives. In: ROSENSHEIM, J. – BENNETT, G. D.: *Groundwater Hydraulics* – American Geophysical Union. Washington D. C.
- SCHMELLING, S. G. – ROSS, R. R. (1989): *Contaminant transport in fractured media: models for decision makers*. – EPA/540/4-89/004.
- SIMMONS, C. S. (1982): A stochastic-convective transport representation of dispersion in one-dimensional porous media systems. – *Wat. Resour. Res.*, 18.
- SKOPP, J. – GARDNER, W. R. (1992): Miscible displacement: An interacting flow region model. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45.
- SKOPP, J. – GARDNER, W. R. – TYLER, E. J. (1981): Solute movement in structured soils: Two-region model with small interaction. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45.
- SMITH, L. – SCHWARTZ, F. W. (1984): An analysis of fracture geometry on mass transport in fractured media. – *Wat. Resour. Res.*, 20 (9).
- STEENHUIS, T. S. – JACKSON, C. D. – KUNG, S. K. J. – BRUTSAERT, W. (1990): A numerical model for preferential solute movement in structured soils. – *Geoderma*, 46.
- STIBITZ, M. (1988): Možnosti využití numerického modelování pohybu chemických kontaminantů v podzemní vodě. – *Kandidátské minimum*, Ústř. úst. geol. Praha.
- STRELTSOVA-ADAMS, T. D. (1978): Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. – *Advances in Hydrosci.*, 11.
- ŠILAR, J. et al. (1992): *Všeobecná hydrogeologie*. – Skriptum Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- TSANG, Y. W. – TSANG, C. F. (1987): Channel model of flow through fractured media. – *Wat. Resour. Res.*, 23 (3).
- TSANG, Y. W. – TSANG, C. F. (1988): Flow and tracer transport in fractured media: a variable aperture channel model and its properties. – *Wat. Resour. Res.*, 24 (12).
- VALENTOVÁ, J. (1994): *Hydraulika podzemní vody*. – Skriptum ČVUT. Praha.
- VAN GENUCHTEN, M. T. – WIERENGA, P. J. (1976): Mass transfer studies in sorbing porous media. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40.
- VOGEL, T. – VAN GENUCHTEN, M. T. – ZHANG, R. – ČÍSLEROVÁ, M. (1993): Effect of the shape of the soil hydraulic properties near saturation on numerical simulation of variably-saturated water flow. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- WARREN, J. E. – ROOT, P. J. (1963): The behavior of naturally fractured reservoirs. – *Soc. Petr. Eng. J.*, 3.
- WITHERSPOON, P. A. – LONG, J. C. – MAYER, E. L. – MYER, L. R. (1987): A new seismic-hydraulic approach to modeling flow in fractured rocks. In: *Solving Groundwater Problems with Models*, National Water Well Association. – Dublin, Ohio.
- ZHENG, C. – PAPADOPOULOS, S. S. (1990): *MT3D-A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reaction of contaminants in groundwater systems. Reference Manual*. – The U. S. EPA. Oklahoma.

Model solution of vulnerability of the Cretaceous aquifer

(Summary of the Czech text)

BEATRICE PATZELTOVÁ

Received March 28, 2001

This project received to what extent the antropogenic sources of contaminants may affect the quality of groundwater in tapping areas with regard to various degree of erosion of aquitard rocks due to discontinuity planes of tectonic origin. Mathematical simulation was applied to study various properties of aquitard rocks disturbed by fissures and their influence on groundwater flow and transport of contaminants from the upper into the lower aquifer. A general structure of sedimentary complexes has been defined for the purpose of the mathematical simulation (Fig. 1). This definition is based on the present level of knowledge of the geologic and hydrogeologic conditions of the western part of the Bohemian Cretaceous Basin. The general structure includes the upper aquifer with free groundwater surface (marked Q), aquitard (marked AB/Q) and the lower (basal) confined aquifer (marked AB). The hydraulic head of the lower aquifer is lower than that of the upper aquifer which allows the water to flow from the upper groundwater body into the lower groundwater body. A longitudinal element in the general structure has been also defined (Figs. 2 and 3). It shows relatively higher permeability than the adjacent environment which the groundwaters prefer to flow through. Various hydraulic properties enter the longitudinal element. These properties correspond to enhanced permeability of the fissure system. Four variants of mathematical model have been devised – variants 1 to 3 design the groundwater flow in the environment with a variant permeability of the fissure system, variant 4 designs a reference model without any fissures.

A source of contamination and four observation points were entered in the next phase of investigation. The location of the source of contamination and distribution of observation points in the model are shown in Fig. 2. Spreading of contaminants has been studied under various conditions of groundwater flow in saturated zone as established during the first stage of investigation.

The MODFLOW and MT3D software in Visual Modflow modeling environment were used to simulate various conditions.

Numerous outputs were obtained as results of individual model variants which illustrate groundwater flow expressed in form of hydroisohypses, various color shades and arrows showing vectors of flow rate, all for each layer or any transverse or longitudinal section. In addition, total balances of flow in model area and zone budgets of flow for each variant were also obtained (Fig. 9, Tab. 3). Figs. 4 to 8 represent examples of some outputs.

As follows from mathematical simulation of groundwater flow, the lower (Cretaceous) aquifer is practically invulnerable (variant 4). It is under conditions when horizontally laying loose (Quaternary) and solid (Cretaceous) sedimentary sequences show no deformation of the aquitard having certain pressure regime (piezometric head of Cretaceous confined aquifer is lower than the head of free surface of groundwater table in Quaternary aquifer). The groundwater flow is of horizontal character. The direction, gradient and flow rates are derived from the difference between hydraulic potentials in the places of infiltration and drainage of the aquifers and from permeability of the relevant rock environment.

In the case, the rock environment is disturbed by a system of fissures which constitutes a zone of higher permeability, then preferential zones of flow originate. At different hydraulic heads of both groundwater bodies, when the hydraulic head of the lower (Cretaceous) groundwater body is lower than that of the upper (Quaternary) groundwater body, the water flows via preferential zone from the upper to the lower groundwater body (variants 1 to 3).

In all three cases of entered hydraulic conductivity in the environment of preferential zone, there can be observed the drainage effect of this zone in aquifer Q. The effect is being reduced with decreasing hydraulic conductivity of rocks in preferential zone.

In the aquitard AB/Q, the preferential zone under given pressure regime creates conditions for overflow of groundwater from the upper aquifer into lower (Cretaceous) aquifer of which the vulnerability is very high.

The lower aquifer is obviously supplied with water drained via preferential zone. The extent and depth of doping depends on permeability of preferential zone in combination with the pressure regime in both aquifers. The closer are hydraulic heads of both groundwater bodies, then the doping effect via preferential zone decreases.

Once the model of groundwater flow was designed, established and simulated, then a mathematical model of transport of contaminants was created. The same entered parameters of transport of contaminants were applied to all four model variants of groundwater flow. Variants 1 and 3 simulate a transport of contaminants in environment disturbed by fracture zone, the variant 4 serves as a reference variant (environment not disturbed by fracture zone).

A number of outputs in form of plots and graphic illustrations were obtained as a result of mathematical simulation of transport of contaminants. Each of the outputs illustrate the spreading of contaminants in each layer and in any longitudinal or transverse section and for each entered time level. Plots of graphic dependence of temporal development