

Sborník geologických věd	Hydrogeologie, inž. geologie, 21	Str. 37–54	8 obr.	– tab.	– příl.	ČGÚ Praha 2001	ISBN 80-7075-520-2 ISSN 0036-5289
-----------------------------	-------------------------------------	---------------	-----------	-----------	------------	-------------------	--------------------------------------

Využití Geografického informačního systému při ochraně podzemních vod

The use of Geographic Information System in protection of groundwaters

ZBYNĚK HRKAL¹

Předloženo 22. prosince 2000

1 : 50 000: 04-31, 04-33, 04-34

Key words: GIS, Vulnerability map, Groundwater protection

HRKAL, Z. (2001): Využití Geografického informačního systému při ochraně podzemních vod. – Sbor. geol. Věd, Hydrogeol. inž. Geol., 21, 37–54. Praha.

Výtah: Cílem článku je podat přehled možností, které poskytuje Geografický informační systém na poli ochrany podzemních vod. Čtenář získá přehled o dosavadním využití při tvorbě map zranitelnosti podzemních vod a map rizik. Na konkrétní ukázce mapy zranitelnosti podzemních vod Jizerských hor kyselou depozicí jsou demonstrovány přednosti GISu oproti klasickému zpracování. Dále je na příkladě pánve Beauce ve Francii GIS prezentován jako účinný nástroj při analýze rizik a v procesu stanovení tzv. kritické ekologické zátěže. GIS jako zdroj podkladů při rozhodovacím procesu ochrany podzemních vod, tentokrát z kvantitativního hlediska, je představen v ukázce zpracování vodohospodářských objektů na území severních Čech. Nejvíce prostoru je věnováno ukázkám využití GIS při komplexním zpracování dat přímo i nepřímo ovlivňujících režim a jakost podzemních vod v polické pánvi. V tomto regionu byl speciálně pro účely ochrany podzemních vod vytvořen informační systém umožňující běžnému uživateli PC rychlou analýzu všech bodových i plošných zdrojů znečištění v závislosti na přírodních podmínkách. V článku jsou demonstrovány příklady využití.

¹ Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky, Albertov 6, 128 43 Praha 2

ÚVOD

Ochrana podzemních vod z kvalitativního hlediska vyžaduje v současné době komplexní přístup. Samotný přírodní proces formování chemického složení podzemních vod je nesmírně složitý, představující geochemickou, hydrochemickou a biochemickou interakci mezi horninou a vodou. Do tohoto systému navíc vstupuje člověk, který svou činností často porušuje přírodní rovnováhu takovým způsobem, že jeho negativní zásahy jsou již nevratné.

Z pohledu ochrany zdrojů podzemních vod je proto nesmírně důležité znát úroveň znečištění, se kterou je přírodní prostředí ještě schopno se vyrovnat a eliminovat negativní dopad lidské aktivity. Pochopení všech vzájemných vztahů a působení je však komplikované a množství informací tak velké, že je nutno hledat nové prostředky, které by nám pomohly se v této problematice orientovat.

Jedním takovým pomocníkem mohou být Geografické informační systémy (GIS). Tyto programy jsou schopny nejen vytvářet řadu tzv. informačních vrstev a kartograficky je zobrazovat, ale především podávat objektivní informace o vzájemném vztahu prostorově orientovaných dat.

Účelem tohoto článku je demonstrovat některé z možností, které nám GIS na poli kvalitativní ochrany podzemních vod nabízí. Základem práce jsou výstupy z grantu GAČR 205/970225, které navázaly na předcho-

zí studie realizované s podporou Ministerstva životního prostředí nebo v rámci výzkumné činnosti Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy.

DOSAVADNÍ VYUŽITÍ GEOGRAFICKÉHO INFORMAČNÍHO SYSTÉMU

Stručná historie vývoje Geografického informačního systému

Geografický informační systém (GIS) je zjednodušeně řečeno počítačový program, který umožňuje propojení různých druhů databází s mapovým podkladem. Plochy, linie nebo body na mapě jsou tak v GISu nositelem určité informace. GIS je schopen pracovat s takřka neomezeným množstvím mapových (informačních) vrstev, z nichž každá může být věnována prezentaci určitého jevu. GIS dále umožňuje rychle analyzovat prostorové vztahy mezi jednotlivými sledovanými jevy. GISové programy měly původně sloužit jako nástroj pro tvorbu topografických map umožňujících jejich rychlou aktualizaci. V nejširší veřejnosti GIS proto byl a bohužel velmi často dosud zůstává spojen jen s tvorbou efektních grafických výstupů. Jak se tyto programy vyvíjely, jejich využití se rozšiřovalo na celou řadu dalších oborů a v současné době se s GISem setkáváme jak při projektování staveb, architektonických návrzích, tak jsou aplikovány na řešení přírodovědných problémů.

První GISy (např. firem INTERGRAPH, ARCINO, BENTLEY) představovaly programy, které byly nesmírně náročné jak na ovládání, tak i na technické vybavení. Uživatel byl odkázán na velmi úzkého specialistu v oboru výpočetní techniky, který vykonával požadované operace. Práce však byla často komplikována skutečností, že tento odborník byl zaměřen jen na výpočetní techniku a neměl hlubší vzdělání ve zpracovávaném oboru, v našem případě v hydrogeologii.

V druhé etapě vývoje GISů se na trhu objevily tzv. jednoduché „prohlížečky“, jako byly např. první verze ArcView nebo MAPINFa. Šlo o jednoduché programy (nenáročné na obsluhu) a počítačové vybavení, které umožňovaly uživateli „prohlížet“ data, která byla již dříve zpracována na výkonnějším GISu. Možnost editace dat však byla většinou velmi omezená.

V současné době se obě tyto krajní verze GISů k sobě přibližují. Ovládání špičkových GISů se zjednodušilo a na druhé straně nové generace „prohlížeček“ již umožňují celou řadu analýz při zachování poměrně jednoduchého ovládání. Navíc je k nim možno dokoupit účelové nadstavby, specifické pro daný problém, takže např. z původně jednoduchého GISu ArcView se po vybavení systémem Spatial Analyst nebo 3D Analyst stává špičkový program schopný zpracovávat i ty nejnáročnější úlohy.

VYUŽITÍ GIS PŘI SESTAVOVÁNÍ MAP ZRANITELNOSTI

Vývoj tvorby map zranitelnosti

Využití GIS znamenalo významný posun i při tvorbě map zranitelnosti. Původní pojem zranitelnost podzemní vody kontaminací se objevil poprvé v šedesátých letech v pracích MARGATA (MARGAT 1968). Zranitelnost byla chápána jako nedostatek ochrany, který poskytuje přírodní prostředí vůči šíření znečištění v podzemní vodě, a tak byla i vyjadřována v mapách. Základem těchto map bylo vyjádření základních hydrogeologických faktorů jako jsou hloubka hladiny podzemní vody, propustnosti, rychlosti proudění a vztahu mezi povrchovými a podzemními vodami. Hlavním cílem map zranitelnosti bylo poskytnout odborníkům ve vodním hospodářství, pracovníkům ve správních orgánech a dalším specialistům informace o tom, které prostory je nutno nejvíce chránit.

Postupem doby se názory na vlastní definici pojmu „zranitelnost“ měnily. Původní charakteristika MARGATA (ALBINET – MARGAT 1970) vycházela z představy, že zranitelnost kolektoru vyjadřuje schopnost šíření kontaminace v podzemní vodě za přírodních podmínek. Tato definice byla několikrát modifikována, když například OLMER a ŘEZÁČ (1970) chápali zranitelnost jako stupeň ohrožení, určený přírodními podmínkami a nezávislý na stávajících zdrojích znečištění.

Nový názor na definici zranitelnosti přinesli VILLUM-

SEN et al. (1983). Navrhli, aby jako indikátor zranitelnosti podzemní vody byla brána jakost podzemní vody a zdůraznili dynamiku řady faktorů ovlivňující zranitelnost podzemních vod. Z této ideje vycházela další definice z roku 1987 (BACHMAT – COLLIN). Ta navrhovala charakterizovat zranitelnost jako citlivost kvality podzemních vod na dopad lidské činnosti a vyjadřovala by se změnami jakosti podzemní vody.

Další etapa vývoje map zranitelnosti se vyznačovala snahou o vytvoření obecné metodiky, která by umožňovala srovnatelnost výsledků z různých typů prostředí. Typickou ukázkou takového postupu je metoda DRASTIC, zavedená U. S. Environmental Protection Agency (ALLER et al. 1987). Název DRASTIC je akronymem, reprezentujícím sedm faktorů, ze kterých metodika vychází: Depth to water (hloubka hladiny podzemní vody), net Recharge (infiltrace), Aquifer media (charakter kolektoru), Soil media (typ půdního profilu), Topography (morfologie), Impact of unsaturated zone (vliv nenasycené zóny), hydraulic Conductivity (propustnost). Každý ze zmíněných faktorů je v závislosti na charakteru posuzovaného prostředí zařazen do deseti-stupňové třídy. Navíc je však posuzován individuální vliv každého z faktorů na zranitelnost kolektoru pěti-stupňovou váhou. Nejvýznamnější faktor má přisouzen váhu 5, nejméně významný 1. Konečný index zranitelnosti je výsledkem součtu všech sedmi hodnot DRASTIC.

Zkušenosti s metodou DRASTIC ukázaly na některé její nedostatky. Nejčastěji zmiňovaným problémem je malá přizpůsobivost specifickým podmínkám. Přes některé výhrady k tomuto způsobu zpracování lze konstatovat, že metoda DRASTIC je v současné době nejpopulárnějším způsobem tvorby map zranitelnosti, je však ke škodě věci velmi často aplikovaná jen mechanicky. Řada autorů se však pokusila použité postupy modifikovat. Jako příklad může posloužit metoda SINTACS (CIVITA 1990) (název je akronym, vzniklý z italského překladu DRASTICu).

V případě tvorby map zranitelnosti se využívají následující výhody GISu – možnost tvorby aktuálních map s optimální kombinací informačních rovin a rychlá změna klasifikačních parametrů. Lze tak připravit několik variant map zranitelnosti, které je možno postupně upravovat k dosažení ideálního výsledku. Zatímco „hra“ s různými parametry je velmi operativní a efektivní činnost, nevýhodou aplikace GISu je časově i finančně náročná etapa přípravy dat. Ta totiž předpokládá převedení veškerých použitých podkladů do digitální formy, a to buď v rastrové nebo vektorové podobě. V případě vektorizace pak stojí zpracovatel před obtížnou volbou. Buď může zvolit cestu převedení podkladů do vektorového formátu manuální digitalizací, nebo využít existující automatizované vektorizační programy. Zatímco první varianta je časově velmi náročná, druhá předpokládá velmi dobré technické zázemí spojené s nemalými finančními náklady.

Ukázka využití GIS při tvorbě mapy zranitelnosti podzemních vod Jizerských hor kyselou depozicí

Jako ukázka využití GIS při tvorbě mapy zranitelnosti v Čechách může posloužit mapa zranitelnosti podzemních vod Jizerských hor kyselou depozicí (HRKAL in ALINČE et al. 1998). Tato mapa byla výstupem komplexního hodnocení geofaktorů životního prostředí, které si v rámci programu VaV zadalo Ministerstvo životního prostředí. Cílem tehdejších prací byla syntetická prezentace všech hlavních fenoménů, které mohou zvyšování kyselosti v regionálním měřítku ovlivňovat. Teoretickým základem mapy byly výsledky předcházejících našich i zahraničních studií, jejichž účelem bylo blíže specifikovat faktory ovlivňující intenzitu acidifikace podzemních vod. Prostředkem k tomuto cíli bylo kartografické vyjádření všech dílčích faktorů a jejich převedení do digitální formy. Geografický informační systém umožnil průnikem těchto dílčích map vytvořit výslednou mapu zranitelnosti. Tento projekt je ideálním příkladem pro demonstraci řešení jednoho klasického problému map zranitelnosti – otázky subjektivního vlivu interpreta při využívání klasifikačních kritérií a určování „váhy“ jednotlivých informačních vrstev. Tato ukázka představuje jednu z možností, jak tento subjektivní vliv využitím GISu potlačit.

V následující části uvádím stručnou charakteristiku jednotlivých informačních vrstev, jejichž vzájemná kombinace byla základem pro výslednou mapu (podrobnější informace lze nalézt v publikaci HRKAL a ALINČE 1998):

Morfologie území. Suchá atmosférická depozice hraje v podmínkách severních a východních Čech významnou úlohu. Intenzitu jejího působení zohledňuje analýza morfologie Jizerských hor. GIS vyjádřil na základě údajů o převládajících směrech větru a na základě matematického modelu terénu návětrné svahy. Na toto území dopadá větší množství prachových částic a vliv suché atmosférické depozice je vyšší než na závětrných partiích. Směry větru, především v horských oblastech s velmi členitou morfologií, jsou poměrně variabilní hodnotou. V případě Jizerských hor je však podle údajů ČHMÚ dominantní směr od západu.



Nadmořská výška území. Tato vrstva nepřímo vyjadřovala objem vlhké atmosférické kyselé depozice. S přibývajícím nadmořskou výškou obecně vzrůstá množství

srážek a tím i vliv vlhké atmosférické depozice na jakost vod.



Vegetační pokryv. Vegetace významným způsobem ovlivňuje dopad atmosférické depozice na acidifikaci vod. Na holinách a loukách se suchá atmosférická depozice nemá za co zachytit a její významná část je větrem odnášena. Vzrostlý les má však značnou plochu, která suchou depozici zachycuje, a ta je poté srážkami smývána do půdy. Na druhé straně nově osázená vegetace je schopna odčerpávat poměrně značné objemy dusíku původem z atmosférické depozice. Tyto jevy jsou vyjádřeny v informační vrstvě „vegetační pokryv“, která vycházela z map lesního pokryvu Jizerských hor. Jako podklad sloužily tzv. porostní mapy s měřítkem 1 : 10 000, které vyjadřovaly stav lesního pokryvu k roku 1992.

— louky bez lesního pokryvu, riziko 0



holiny s řídkce osázeným lesem, riziko 0,5



holiny osázené vzrostlým mladým lesem, riziko 1



oblasti se zachovalým vzrostlým lesem, riziko 3

Z geologického hlediska bylo území rozděleno do dvou oblastí. Za nejvíce zranitelný prostor je nutno považovat převážnou část CHOPAVu budovanou různými typy granitů krkonoško-jizerského masivu. S ohledem na kyselý charakter uvedených horninových typů je oblast žulového plutonu klasifikována nejvyšším stupněm rizika. Pouze nejsevernější část zájmového území spadá do oblasti budované proterozoickými metamorfity, chlorit-sericitickými fylity, amfibolitem a muskovitickými svorem. Místně jsou zastoupeny vložky krystalinického vápence. Toto petrografické složení je z hlediska procesu acidifikace podzemních vod podstatně odolnější, takže mu bylo přisouzeno nízké riziko.

Uvedené čtyři informační vrstvy byly základem pro výslednou mapu zranitelnosti podzemních vod Jizerských hor vůči kyselé depozici. Finální mapa vznikla součtem jednotlivých údajů zranitelnosti plošně vyjádřených na dílčích mapách. Do tohoto procesu je však zaváděn nezanedbatelný subjektivní přístup zpracovatele. Plošná distribuce parametru zranitelnosti (vyplývající například z morfologie) je víceméně objektivní. Přisouzení váhy jednotlivých dílčích vlivů na celkovou zrani-

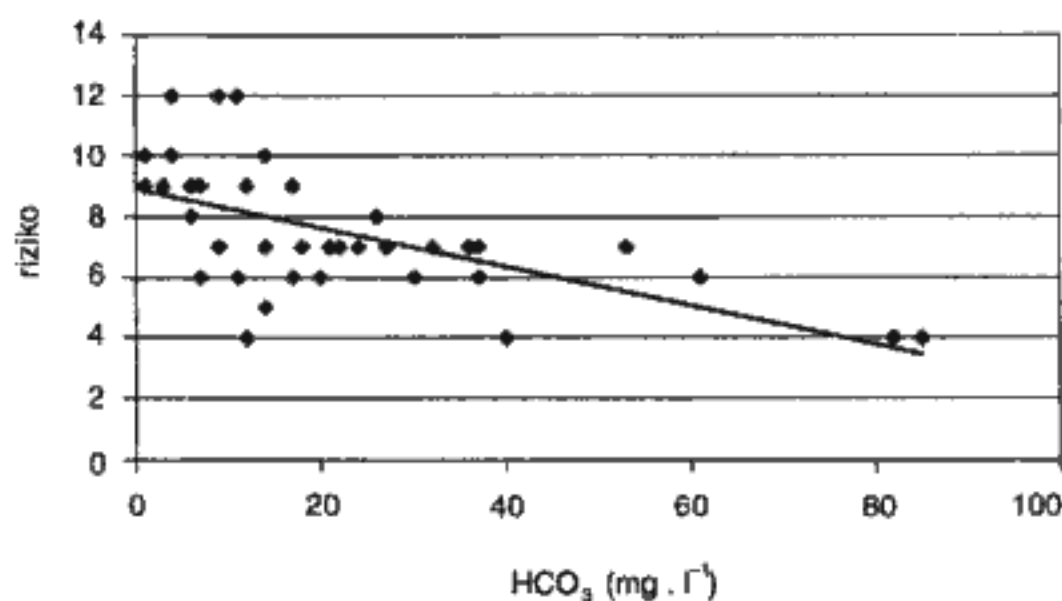
tečnost však zanáší do procesu zpracování značný subjektivní faktor a může výsledek významně ovlivnit.

Zatímco v případě geologie, morfologie a vegetačního pokryvu nebyly pro odlišení různé váhy žádné logické důvody (ve zpracování měly tyto tři informační vrstvy váhu 1), u nadmořské výšky tomu tak bylo. Nadmořská výška totiž v koncepci mapy zranitelnosti podzemních vod vůči acidifikaci zohledňuje vlhkou atmosférickou depozici. Jak však vyplývá z celkové geochemické bilance na většině malých povodí v Čechách, vlhká atmosférická depozice tvoří jen menší část celkové depozice a dominantní úlohu hraje depozice suchá. Tento fakt by proto měl vést k snížení významnosti této informační vrstvy a snížení její váhy.

Na druhé straně však nadmořská výška nepřímo vyjadřuje i dobu kontaktu vody s horninou. Ve vrcholových partiích jsou vzorky vody v podstatě velmi blízké vodě srážkové. Čím dále do údolí, tím je vzájemná interakce voda–hornina delší. Je tedy zřejmé, že vliv nadmořské výšky na výsledek je komplikovanější, protože zohledňuje dva faktory.

Pro snížení subjektivního ovlivnění byly testovány různé varianty výsledné mapy zranitelnosti. Jako kritérium pro ověření, zda mapa zranitelnosti vymezuje skutečně rizikové prostředí pro podzemní vody, byly použity koncentrace HCO_3^- . Teoreticky by prameny v prostředí, které mapa zranitelnosti vymezuje jako nejrizikovější, měly mít v současné době nejnížší alkalitu a měly by být tedy nejvíce postiženy procesem acidifikace. Pomocí GISu byly postupně vytvářeny různé varianty svodné mapy zranitelnosti, které se lišily vahou vrstvy „nadmořská výška“ v rozmezí hodnot 1 až 0,2.

U každé varianty byl stanoven vztah mezi koncentracemi HCO_3^- v pramenním vývěru a odpovídajícími hodnotami zranitelnosti v místě odběru. Jako „optimální“ varianta se nakonec ukázala váha 0,8, při které koeficient korelace mezi obsahy HCO_3^- a příslušnou hodnotou zranitelnosti byl $-0,66$ (obr. 1). Ideálním řešením nalezení optimální kombinace všech parametrů by pochopitelně byl automatický test všech variant, zahrnující postupnou modifikaci vah i ostatních informačních vrstev. Tento postup však bohužel nebyl v silách použitého GISu MAPINFO.



1. Vztah mezi obsahy HCO_3^- v pramenech a příslušnými hodnotami rizik mapy zranitelnosti Jizerských hor (použitá váha mapy „nadmořská výška“ 0,8).

Výsledná mapa zranitelnosti je tedy výsledkem průniku dat o morfologii (váha 1), geologii (váha 1), vegetačním pokryvu (váha 1) a nadmořské výšce (váha 0,8). Mapa používala škálu čtyř úrovní zranitelnosti. Nejvíce zranitelné prostředí (4. stupeň) v rozmezí součtu individuálních rizik 10 až 11,4 bylo území v nejvyšších nadmořských výškách, s velkými srážkovými úhrny, se svahy exponovanými k západu a navíc porostlými souvislým starým lesem. Další dvě úrovně s riziky 9 až 10 (3. stupeň) a 8 až 9 (2. stupeň) představovaly z hlediska celkového rizika jakýsi přechodný prostor. Nejméně zranitelné území s celkovým součtem dílčích rizik menším než 8 (1. stupeň) bylo prostředí s nejnižšími nadmořskými výškami, a tedy i nižšími srážkovými úhrny, se svahy k východu a bez lesního pokryvu.

VYUŽITÍ GIS PŘI ANALÝZE RIZIK

Jak již bylo zmíněno v úvodu, na jakosti podzemních vod se podílí takové množství často nesourodých činitelů, že uvést v soulad lidskou aktivitu s přírodní rovnováhou v dané oblasti je úkol mimořádně složitý. Jednou z možností, jak odhadnout velikost obranné schopnosti přírodního prostředí je určení tzv. únosné ekologické zátěže, veličiny využívající jako testovací kritérium změny kvality podzemních vod. V principu jde o stanovení takového množství negativních, rizikových dopadů, které je ještě schopno přírodní prostředí v daném prostoru eliminovat. Na základě znalosti tohoto faktoru lze připravit několik hypotéz dalšího vývoje kvality podzemních vod, odhalit hlavní zdroje znečištění a s ohledem na úroveň obranné schopnosti daného přírodního prostředí uvést v soulad hospodářské aspekty s hledisky ochrany přírody.

Princip stanovení ekologické zátěže

Jako ukázka stanovení tzv. ekologické zátěže bude sloužit postup použitý v pánvi Beauce ve Francii (HRKAL – TROUILLARD 1994). Způsob stanovení ekologické zátěže vycházel ze čtyř základních typů informací, zobrazených v tzv. základních mapách, z nichž každá představuje určitou skupinu problémů – riziko znečištění, klimatické jevy, zranitelnost prostředí a kvalitu podzemních vod. Jejich vzájemná kombinace umožňuje analyzovat jak časové, tak prostorové změny velkého množství faktorů, které ovlivňují kvalitu podzemních vod (obr. 2).

Všechny sledované jevy jsou převedeny do digitální formy a je možné je pak kartograficky vyjádřit, např. formou izolinií. Každá z těchto informací představuje samostatnou informační vrstvu. V GISu je dané území rozčleněno na drobná políčka (pixely), z nichž každé je nositelem informace o velikosti sledované informace. Po vzájemném překrytí umožňuje tzv. gridová analýza provádět s hodnotami v odpovídajících políčkách nej-

různější matematické operace, včetně stanovení korelací a sledování trendů.

Popisovaný způsob stanovení kritické ekologické zátěže je prezentován ve své „maximalistické“ variantě. Je zřejmé, že celá řada informací není vždy k dispozici. Na druhé straně však jde o systém otevřený, schopný přijímat jakákoliv nová data, např. týkající se půdního profilu, detailnější charakteristiky nesaturované zóny či údaje o některých specifických zdrojích znečištění. V další části je věnována stručná zmínka popisu hlavních informačních bloků celého systému.

MAPA RIZIK

Mapa rizik bere do úvahy všechny bodové či plošné zdroje znečištění zájmové oblasti, potenciální či reálné. Před sestavením svodné mapy rizika je nutný odhad významnosti jednotlivých zdrojů na sledovaný jev. Sledujeme-li například vývoj obsahů olova, pak bude základní mapa „hustoty silniční sítě“ hrát podstatně vyšší úlohu než v případě koncentrací dusičnanů. Systém předpokládá stálý a konstantní vliv všech rizikových faktorů, což přirozeně neodpovídá skutečnosti. Změny v intenzitě plošných zdrojů znečištění, jako například hnojení, jsou však částečně vyjádřeny zohledněním klimatických poměrů. Intenzita srážek, respektive efektivních srážek, je totiž faktor, který se významnou měrou podílí na přenosu znečištění. Jiný postup je třeba použít v případě některých bodových zdrojů znečištění. Například stará skládka odpadu se změní z potenciálního zdroje znečištění ve skutečný teprve v okamžiku náhlého úniku kontaminantu. Proto je nutno tuto skutečnost zohlednit násobením základní mapy koeficientem, který by vyjadřoval pravděpodobnost takovéto události.

MAPA ZRANITELNOSTI

Mapa zranitelnosti se skládá ze tří dílčích map, z nichž každá se vyjadřuje k různým typům faktorů: k jevům vztaženým k povrchu, k nesaturované zóně a k zóně nasycené. Zatímco předchozí mapa rizik představovala výhradně fenomény spojené s lidskou aktivitou, mapa zranitelnosti vyjadřuje jevy přírodní, prakticky neměnné v čase. Jedinou výjimku tvoří dílčí základní mapa zobrazující hustotu drenáže.

Povrchová kritéria rozhodují o možnostech pronikání znečištění do podzemí. Systém pracuje s následujícími dílčími mapami:

a) využití půdy – faktor vyjadřující stupeň nepropustnosti povrchu (zastavěná část terénu), hustotu a typ vegetačního pokryvu;

b) hustota říční sítě – vyjadřuje nepřímo schopnost infiltrace. Nízké hodnoty hustoty hydrografické sítě indikují zlepšení podmínek pro infiltraci, v případě husté říční sítě lze naopak očekávat zvýšenou pravděpodobnost povrchového odnosu znečištění;

c) svahy – členitý terén a prudké svahy způsobují převahu povrchového odtoku před infiltrací, čímž se snižuje možnost vsaku znečištění do kolektoru. Plochy terén se svahy do 5 % je považován za prostředí s převahou podmínek pro infiltraci, naopak v území se svahy nad 10 % převládají podmínky pro povrchový odtok;

d) hustota drenáže – odvodňovací drenáže představují významný prvek, který snižuje možnost vsaku znečištění do kolektoru. Na drénovaných zemědělských plochách pokusné lokality Samšín například Stavební geologie Praha prokázala výrazně nižší koncentrace dusičnanů v podzemních vodách než na totožných územích bez drenáže.

Kritéria nesaturované zóny – transport znečištění v nesaturované zóně se děje především ve vertikálním směru a pro rychlost jeho šíření jsou nejdůležitější dva parametry – mocnost nenasycené zóny a její propustnost. V případě dosažení odpovídající přesnosti digitálního modelu terénu lze získat mapu mocností nesaturované zóny odečtením mapy hydroizohyps od mapy topografické. Data o propustnosti nenasycené zóny jsou poměrně vzácná, a proto se při zpracování vychází z nepřímých údajů odvozených z litologie (podle SUAISE et al. 1990).

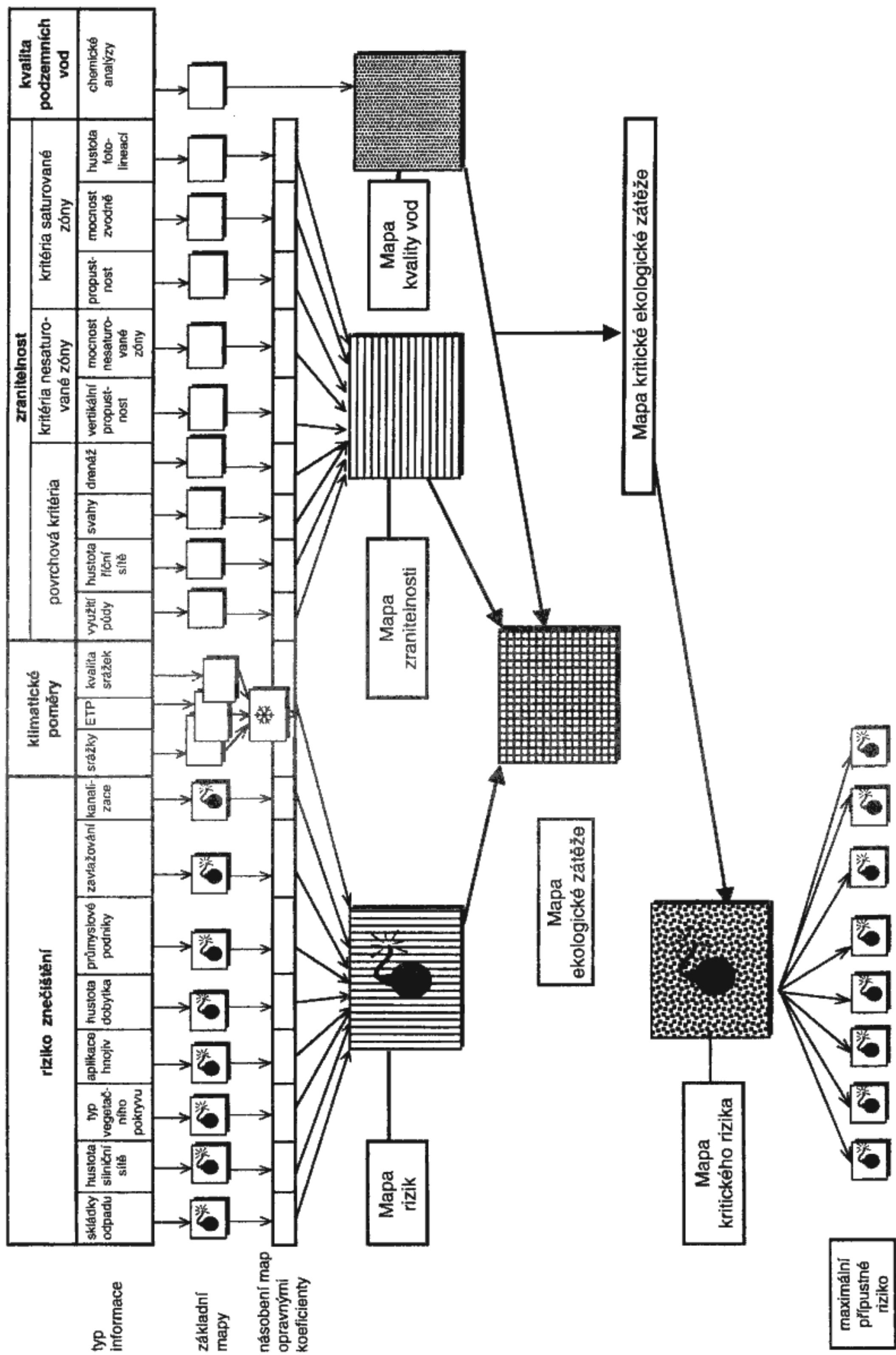
Kritéria nasycené zóny – z parametrů, které rozhodují o šíření znečištění v nasycené zóně je rozhodující propustnost kolektoru. Samočistící schopnost, či lépe řečeno možnost ředění znečištění stoupá s mocností zvodně. Toto hodnotu lze orientačně získat odečtením mapy morfologie báze kolektoru od mapy piezometrické. Konečně pro vyjádření preferenčních cest šíření znečištění byla zahrnuta do této části zpracování i mapa hustoty fotolineací. Zóny se zvýšenou hustotou těchto prvků představují území tektonicky porušená s potenciálně zvýšenou propustností.

MAPA KVALITY PODZEMNÍCH VOD

Aby bylo možné ověřit dopad lidské činnosti na kvalitu podzemních vod a určit podíl jednotlivých negativních aktivit je nutno získat představu o vývoji chemického složení podzemních vod, přesněji řečeno o časových a prostorových změnách těchto kationtů a aniontů, které mohou sloužit jako indikátor znečištění. Hlavním cílem je získat představu o lokalizaci zón, kde dochází ke kvalitativní degradaci, a o území, která nejsou postižená. Časová řada chemických analýz by pokud možno měla odpovídat období, které je pokryto historickými údaji o vývoji rizikových fenoménů na povrchu.

MAPA EKOLOGICKÉ ZÁTĚŽE

Kombinace map rizika znečištění a zranitelnosti je základem mapy „ekologické zátěže“, která podává obraz o prostorovém rozmístění různých typů rizik s ohledem na místní obranu schopnost prostředí. Vysoké hodnoty



2. Schéma procesu stanovení kritického rizika.

na této mapě charakterizují oblasti, kde je velká hustota rizikových faktorů v místech velmi zranitelných. Naopak zóny s nízkými hodnotami reprezentují území bez rizikové činnosti velmi rezistentní na znečištění.

MAPA KRITICKÉ EKOLOGICKÉ ZÁTĚŽE

Konfrontace mapy „ekologické zátěže“ s mapou „vývoje kvality podzemních vod“ umožňuje stanovit hodnotu tzv. „kritické ekologické zátěže“, hodnotu představující maximální úroveň součtu rizik a zranitelnosti, která v daných podmínkách nezpůsobuje růst znečištění podzemních vod. Prakticky je tato hodnota stanovena jako průměrná hodnota „ekologické zátěže“ v zónách, kde za sledované období nedošlo k růstu znečištění. Toto prostředí je tedy buď odolné vůči dopadu negativní antropogenní činnosti, nebo je úroveň rizikové činnosti pod úrovní místní zranitelnosti.

MAPA KRITICKÉHO RIZIKA

Na základě výše uvedených znalostí je možné odvodit velikost tzv. „kritického rizika“. Matematicky tato veličina představuje rozdíl kritické ekologické zátěže a hodnoty zranitelnosti. Jinými slovy to znamená maximální přijatelný součet všech místních „rizik“, který s ohledem na lokální zranitelnost nepřevyší kritickou ekologickou zátěž. Znalost „kritického rizika“ umožňuje připravit několik možných variant kombinací dílčích přípustných rizik.

Zkušenosti s popisovaným systémem v oblasti Beauce

Výše uvedený způsob využití GISu byl testován ve Francii v pánvi Beauce ležící severně od města Orléans (HRKAL – TROUILLARD 1994). Tato sedimentární struktura, tvořená místy až zkrasovělými terciárními vápenci, přecházejícími v méně propustné jílovité vrstvy, je považována za jednu z nejvýznamnějších vodohospodářských oblastí Francie. Vzhledem k mimořádně intenzivní zemědělské výrobě je to však současně prostředí, kde dochází k častým střetům zájmů ochrany životního prostředí na jedné straně a antropogenní činnosti na straně druhé. Jedním z nejvýznamnějších problémů tohoto území jsou dusičnany v podzemních vodách, jejichž koncentrace v některých oblastech překročily limit pro pitnou vodu.

Geografický informační systém SynArco měl analyzovat všechny místní zdroje znečištění s ohledem na zranitelnost prostředí, ve kterém působí a zohlednit přitom i časový faktor. Zpracování velkého množství dat výše zmíněnou metodou umožnilo podat přehled o časoprostorových změnách intenzity působení jednotlivých rizikových fenoménů a objektivně posoudit jejich

dopad na kvalitu podzemních vod. Na základě získaných zkušeností bylo, s ohledem na lokální přírodní podmínky, určeno pro jednotlivé dílčí správní jednotky několik variant kombinací maximálních přípustných rizik. Takové doporučení například konstatovalo, že kolektor v posuzované části zájmového území má tak malou odolnost proti znečištění, že je zde nutno omezit živočišnou výrobu. Tu je možné naopak přemístit do jiné oblasti, která je podstatně méně zranitelná a navíc místní intenzita zdrojů kontaminace je na nízké úrovni. Pro praxi to znamenalo, že odpovědné orgány získaly materiály, na základě kterých mohou ovlivňovat zemědělskou politiku, v ohrožených oblastech přednostně investovat do budování čistíren odpadních vod, případně usměrňovat odpadové hospodářství.

INFORMAČNÍ SYSTÉMY JAKO ZDROJ PODKLADŮ PRO ROZHODOVACÍ PROCES

Jako ukázka využití Geografického informačního systému v procesu rozhodování státní správy může posloužit způsob zpracování regionální vodohospodářské bilance množství podzemních vod, zpracované Výzkumným ústavem vodohospodářským (HRABÁNKOVÁ et al. 2000). Účelem těchto prací je zpracování centrální bilance podzemních vod na regionální úrovni systémem, který by poskytoval údaje u využívaných zdrojích podzemních vod z celé České republiky. Základ systému tvoří dvě dílčí databáze:

1. Objekty podzemní vody

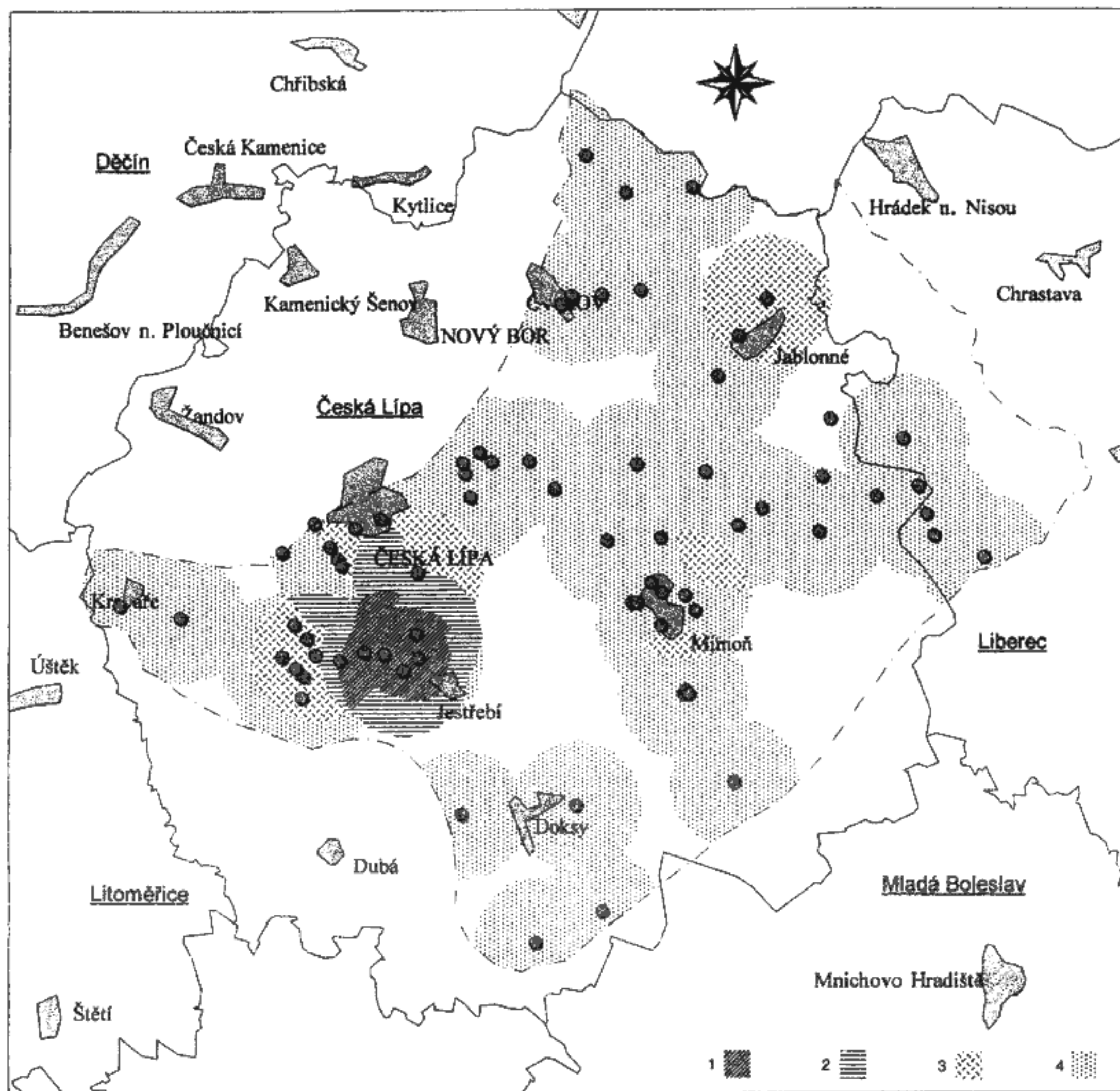
Tato databáze obsahuje 12 703 údajů o využívaných objektech (vrtech, studnách, zářezích a pramenních jímkách), které jsou převážně ve správě bývalých podniků Vodovodů a kanalizací. Přesnost situace digitalizovaných objektů podzemní vody je adekvátní měřítku 1 : 50 000.

2. Jímací území

Jímací území je ve své podstatě množinou využívaných objektů podzemní vody, technicko-provozně propojených v jeden celek. Protože tento útvar nemá žádné podchytilné hranice, je v GISu charakterizován fiktivním bodem, který je v případě, že se jímání realizuje pouze na jediném objektu, s tímto objektem totožný. Pokud však jímací území zahrnuje více objektů, je tento fiktivní bod vytvořen v těžišti polygonu, jehož obrys je tvořen příslušnými objekty. Ze zmiňovaných 12 703 využívaných objektů podzemní vody uvedeným postupem vzniklo 3726 jímacích území, ke kterým byla připojena databáze základních charakteristik jímacího území. K této vrstvě je možno připojit databázi, charakterizující jakost směsného vzorku vody jímacího území.

Uvedené databáze byly propojeny v GISu MAPINFO do topografického podkladu. Pro prostorové analýzy byl systém doplněn o některé další informační vrstvy v polygonovém charakteru. Šlo o hranice:

- hydrologických povodí až do úrovně 4. řádu,
- ochranných pásem,



3. Podíl jednotlivých míst odběru na celkovém odebíraném množství v rajonu 464. 1 – 25 až 45 %, 2 – 10 až 25 %, 3 – 5 až 10 %, 4 – do 5 %; plná čára – hranice okresů, čerchovaná čára – hranice hydrogeologických rajonů, kolečka – místa odběrů.

- okresů,
- hydrogeologických rajonů.

Takto pojatá tematická náplň GISu umožní zájemci nejen rychlý přístup ke všem požadovaným datům, ale především celou řadu analýz. Jako ukázka může posloužit grafická prezentace intenzity využití jednotlivých odběrů uvnitř hydrogeologického rajonu, respektive grafické vyjádření podílu jednotlivých odběrů na celkovém odebíraném množství. Výsledek takového modelového řešení pro hydrogeologický rajon 464 „Křída horní Ploučnice“ je znázorněn na obrázku 3. V okolí míst odběrů byly vyneseny kruhy o průměru 3 km. Každé z těchto ploch byla přiřazena hodnota, vyjadřující procentuální podíl konkrétního odebíraného množství v roce 1990 z celkového odebíraného objemu

v daném rajonu. GIS provedl průnik těchto ploch. To znamená, že v místech, kde jednotlivé polygony ležely nad sebou, vznikla plocha jediná, charakterizovaná součtem všech atributů z původních dílčích ploch. V praxi to znamená, že nejvyšší dosažitelná hodnota by činila 100 %. Tento případ by mohl nastat, kdyby v daném rajonu byl veškerý odběr realizován například jen ve třech místech odběru, situovaných těsně vedle sebe.

UKÁZKY VYUŽITÍ GIS V POLICKÉ PÁNVI

Polická křídová pánev patří mezi nejvýznamnější vodohospodářské struktury v České republice. Detailní výzkum, který zde probíhal v letech 1994–1997 (KRÁSNÝ

et al. 1997a), mimo jiné prokázal, že přes vyhlášená ochranná pásma a řadu legislativních opatření vedoucích k zamezení znečišťování zdrojů podzemních vod došlo na některých lokalitách ke zhoršení jakosti jímáných vod. Charakteristickým rysem této pánevní struktury je velmi komplikovaný oběh podzemní vody s výskytem řady kolektorů a izolátorů, a s mimořádným množstvím podkladových materiálů. Jde jak o údaje geologické a hydrogeologické povahy, tak i o data o zdrojích znečištění. Šlo tedy o ideální prostředí pro aplikaci GIS jako nástroje pro objektivní zpracování těchto údajů. Proto byla tato oblast vybrána jako prostředí pro realizaci prací na grantu GAČR 205/970225, jejichž cílem bylo:

- posoudit stupeň rizika stávajících zdrojů znečištění a zohlednit zranitelnost přírodního prostředí,
- poskytnout odpovědným pracovníkům nástroj s údaji pro optimalizaci průmyslové a zemědělské činnosti z pohledu ochrany zdrojů podzemních vod.

Stručná charakteristika přírodních poměrů v zájmovém území

Polická pánev leží v severovýchodních Čechách na hranicích mezi Českou republikou a Polskem. Celková plocha pánve je cca 248 km² a nadmořské výšky se obvykle pohybují v rozmezí 400 až do 800 m. Geomorfologie území je zásadním způsobem ovlivněna geologickou stavbou. Charakteristickým rysem jsou denudační zbytky kvádrových pískovců, zachovaných v centrální části pánve, kde podél zlomů došlo ke vzniku rozsáhlých skalních měst s bizarní morfologií.

Z geologického hlediska je jako polická pánev označována křídová výplň rozsáhlejší asymetrické vnitrosudetské pánve budované horninami karbonu, permu a triasu. Maximální mocnost křídové sedimentace (cenoman až svrchní turon) je 450 až 500 metrů. Pro polickou pánev je typická přítomnost několika psamitických těles, oddělených vápnitými jílovci až slínovci a prachovci. Psamity vytvářejí v zájmovém území tři víceméně oddělené kolektory. Izolační vlastnosti mezilehlých izolátorů však jsou často velmi proměnlivé. Z hlediska regionálního proudění podzemní vody to znamená různou míru vertikálního přetékání mezi kolektory.

Naprosto převládajícím typem porozity všech hornin v polické pánvi je porozita puklinová. Tato skutečnost způsobuje značnou variabilitu kolektorských vlastností. V optimálním případě se uvádí hodnota transmisivity v rozmezí 1700–2500 m² · den⁻¹. Geometrie hydrogeologických těles a proudění podzemní vody je zásadním způsobem ovlivněna průběhem významných zlomů. Zlomy plní v zájmovém území dvojí funkci.

Za prvé zlomy podmiňují vznik prostředí s extrémně zvýšenou propustností vytvářející preferované cesty pro proudění podzemní vody a současně umožňující i intenzivní vertikální přetékání mezi kolektory. Druhou va-

riantou, s opačnou funkcí, je tvorba nepropustné hranice, která je způsobena přerušením spojitosti kolektorů z obou stran zlomu. Značný stupeň oddělení jednotlivých kolektorů vedl v polické pánvi k tvorbě několika hydraulicky samostatných zvodněných systémů. Proudění podzemní vody vytváří trojrozměrný, velmi komplikovaný systém, který spočívá v kombinaci víceméně horizontálního proudění jednotlivými kolektory a ve vertikálním přetékání napříč mezilehlými izolátory. V rozsahu jednotlivých kolektorů existuje častá hydraulická spojitost, takže může docházet k vzájemnému ovlivnění podzemní vody na velké vzdálenosti.

V rámci pánve lze vyčlenit jednak hlubší regionální proudění od míst infiltrace k zónám regionální drenáže, jednak proudění lokální v připovrchové zóně zvětralin. Přírodní zdroje podzemních vod v polické pánvi tvoří 1215 l · s⁻¹ a z tohoto objemu bylo v letech 1990–1996 průměrně odebíráno 279 l · s⁻¹. Tyto odběry jsou v současné době realizovány na 11 jímácích oblastech. Další odběry mají již jen lokální význam a obvykle nepřevyšují 1 l · s⁻¹.

Z hlediska ochrany jakosti podzemních vod je největším problémem rostlinná a živočišná výroba, v jejíž důsledku překročily na některých lokalitách koncentrace dusičnanů 50 mg · l⁻¹. Dalším problémem jsou dosud jen ojedinělé nálezy indicií průmyslové výroby, chlorovaných uhlovodíků a ropných látek.

Metodika zpracování

POUŽITÝ SOFTWARE

Technické vybavení administrativní sféry, která má rozhodující vliv na výše zmíněnou problematiku, se v poslední době značně zlepšilo. Bohužel znalosti obsluhy z valné části velice složitých programů typu ARCINFO a INTERGRAPH neumožňují jejich provoz, a tak odborníci v této oblasti většinou pracují i nadále tradičními metodami. Projektované práce si proto kladly za cíl použít pro zpracování dat a především pro jejich analýzu takový software, který by umožnil další využití všech informací i pracovníkům, kteří mají pouze základní znalosti programů v systému Windows. Proto byl použit program SITEGIS, který je v podstatě nadstavbou GISu MAPINFO. MAPINFO je typickou ukázkou střední úrovně GISu, umožňující práci jak s rastrovým, tak i vektorovým podkladem a zároveň řadu plošných analýz. Nadstavba SITEGIS propojila MAPINFO do jediného bloku s programy SURFER, EXCELL a databází ACCESS. Tento způsob propojení programů tak výrazně obohatil možnosti analýzy dat, počínaje klasickou gridovou analýzou až po 3D zpracování, např. morfologie terénu. Tyto formy zpracování byly jinak vyhrazené jen vyspělejším grafickým informačním systémům, jako jsou např. Intergraph MGE a ARCINFO, které však většinou vyžadují náročné hardwarové zázemí pracovní stanice. Uživatel progra-

mu SITEGIS mohl využívat pro něj důvěrné známé prostředí Windows na běžném PC. Pro zcela rutinní typy prací systém umožnil i způsob ovládání formou jednoduchých „masek“.

POSTUP ZPRACOVÁNÍ DAT

Základem zpracování bylo utřídění všech dostupných informací, jejich formální sjednocení a převedení do jednotného systému databází v programu ACCESS. Veškeré mapové podklady (hydrogeologická mapa zohledňující i výstupy modelového řešení proudění, geologická mapa a topografická mapa) byly digitalizovány, případně převedeny z rastrové do vektorové formy. Jako další tematický podklad sloužily výsledky zpracování morfologie formou matematického modelu terénu.

Propojení všech databázových informací s mapovými podklady umožnilo tvorbu prvních dílčích syntetických map, jako byla např. mapa zranitelnosti, rizik, vývoje znečištění atd. Bližší informace o těchto mapách jsou obsahem dalších kapitol.

Následující schéma charakterizuje postup prací při tvorbě informačního systému polické pánve a obsahuje přehled všech dílčích databází a mapových podkladů, které systém obsahuje:

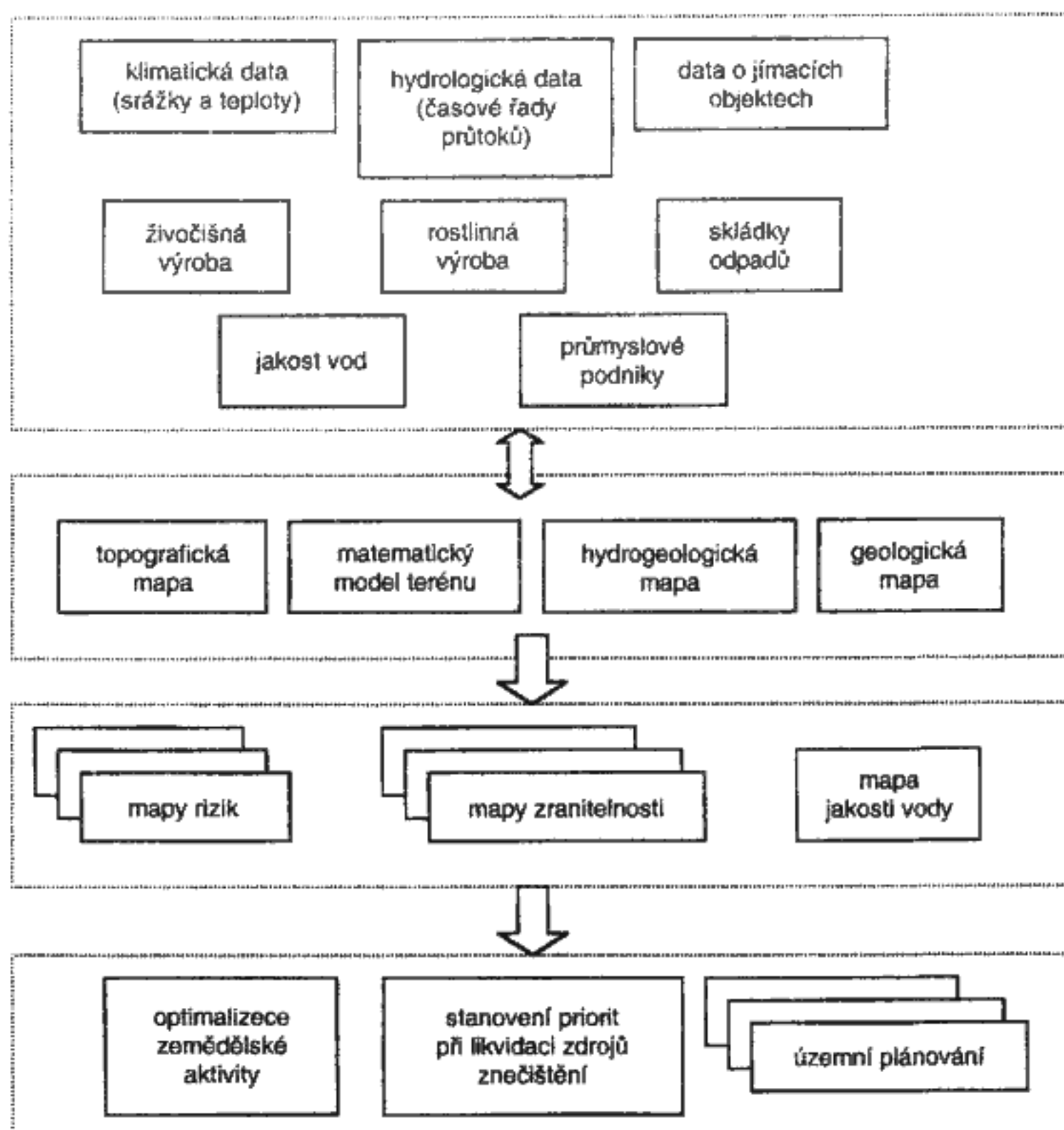


Schéma tvorby informačního systému v polické pánvi.

TVORBA DÍLČÍCH SYNTETICKÝCH MAP

Po zpracování primární dokumentace bylo možno přikročit k tvorbě prvních interpretací, z nichž jako základní se jevíly mapy rizik a mapy zranitelnosti.

Dřívější „klasické“ mapy rizik a zranitelnosti vznikaly kartografickým zpracováním několika fenoménů, které v konečné fázi vyjádřily např. obrannou schopnost kolektoru vůči šíření kontaminace nebo plošné rozmístění rizikových složek. Vždy však šlo o statický pohled, teprve GIS přinesl do procesu zpracování dynamický faktor. Tuto skutečnost lze demonstrovat na následujícím příkladu. Chceme-li vyjádřit riziko znečištění nitráty, pak je zemědělské aktivitě nutno přisoudit vyšší váhu než skládkám průmyslových odpadů. Obdobně je tomu při znázornění zranitelnosti vůči šíření pesticidů. Ta vyplývá z jiných parametrů než při posuzování zranitelnosti na chlorované uhlovodíky a tuto skutečnost zohlední GIS kombinací různých typů dílčích map, resp. přisouzení různých úrovní významnosti.

MAPY ZRANITELNOSTI

Původní idea mapy zranitelnosti vycházela z tradiční představy MARGATA (1968). Základem těchto map zra-



nitelnosti bylo zobrazení vybraných faktorů, jako hloubka hladiny podzemní vody, propustnost, rychlost proudění a vztah mezi povrchovými a podzemními vodami.

Z obdobných principů vychází v současné době nejčastěji používaný metodický postup sestavování map zranitelnosti DRASTIC (ALLER et al. 1987). DRASTIC umožňuje (v závislosti na místních poměrech) pomocí koeficientů a systému váhových faktorů zdůraznit nebo potlačit některé faktory ovlivňující výslednou zranitelnost. Pro jeho aplikaci často hovoří srovnatelnost výsledků s jinými analogickými terény.

Výsledky, které byly získány mechanickým použitím metody DRASTIC, se však ukázaly pro potřeby polické pánve jako zcela nevhodné. Například hloubka hladiny podzemní vody, stejně jako morfologie, hraje v případě zranitelnosti hlubších kolektorů podřadnou úlohu. Naopak v polické pánvi stěžejní faktory, jako je vymezení infiltračních oblastí a preferenčních zón oběhu podzemní vody DRASTIC nezohledňoval. Ze stejných důvodů – příliš komplikovaných hydrogeologických poměrů – nebylo reálné ani využití výše zmíněné metody z pánve Beauce.

S přihlédnutím k velmi komplikovaným hydrogeologickým poměrům zájmového území se zpracování zranitelnosti polické pánve rozdělilo do dvou měřítkových úrovní.

První byl regionální pohled na zranitelnost podzemních vod v rámci celé pánevní struktury. Regionální mapa zranitelnosti zahrnovala následující oblasti, kterými kontaminace může zasáhnout hlubší kolektory. Tyto zóny byly vymezeny na základě regionální studie KRÁSNÉHO et al. (1997a):

- zóny infiltrace regionálně významných kolektorů,
- zóny regionální drenáže podzemních vod, které často představují území přímé hydraulické spojitosti povrchových a podzemních vod,
- úseky vodních toků, u nichž dochází ke ztrátám jejich průtoku a k infiltraci do hlouběji položených kolektorů,
- dna údolí vodních toků se spojitostí povrchových vod a podzemních vod významných kolektorů,
- úseky zlomů s prokazatelným nebo předpokládaným vertikálním propojením různých kolektorů.

V mapě byla zohledněna i představa o rychlosti přenosu kontaminantů v závislosti na skutečné rychlosti proudění podzemní vody (zanedbány byly fyzikálně-chemické interakce mezi případným kontaminantem, vodou a horninou). Tyto podklady byly převzaty do GISu z matematického modelu proudění (ČURDA in KRÁSNÝ et al. 1997b).

Druhým pohledem bylo detailní zpracování zranitelnosti v bezprostředním okolí jímaných zdrojů s ohledem na výskyt zdrojů kontaminace ohrožujících mělkou připovrchovou zónu. V tomto případě se zájmové území schematizovalo do podoby hydrogeologického masivu a detailní mapa zranitelnosti vycházela z podobných principů jako DRASTIC. Výsledná detailní mapa zrani-

telnosti vznikla superpozicí následujících informačních vrstev:

- morfologie terénu (matematický model terénu), zohledňující jednak hydraulický sklon, jednak možnosti infiltrace,
- typ kvartérního pokryvu,
- údaje o tektonice (zóny preferenčního proudění podzemní vody).

MAPY RIZIK

Mapa znázorňující rizikové aktivity v regionálním pohledu v prostoru celé polické pánve pracovala s dvěma typy zdrojů kontaminace – bodovými a plošnými. Jako příklad typického bodového zdroje znečištění může posloužit skládka odpadu. Hnojené pole je typickou ukázkou plošného zdroje kontaminace. V průběhu zpracování byly tyto zdroje znečištění dále členěny do dvou skupin, na zdroje reálného znečištění a zdroje potenciálního ohrožení. Zatímco v případě přehnojovaného pole se nespotebované hnojivo jednoznačně dostává do kolektoru, sklad ropných látek při dodržení všech bezpečnostních pravidel nepředstavuje přímé ohrožení jakosti podzemních vod. Ze zkušenosti však vyplývá, že při dlouhodobém provozu takového skladu je větší či menší havárie jen otázkou času a k drobným úkapům docházelo v minulosti víceméně pravidelně. Některé zdroje znečištění již nelze zařadit tak jednoznačně. Veřejné komunikace, na kterých může dojít při přepravě různých materiálů k havárii a úniku kontaminace by měly patřit mezi potenciální zdroje ohrožení. Současně se však v zimním období silniční síť stává prokazatelným reálným zdrojem přímého znečištění vlivem solení vozovek. Výsledná mapa rizik se skládala z následujících podkladů:

- silniční a vlakové komunikace – komunikační síť je nutno považovat za potenciálně nebezpečný prostor, kde s ohledem na možnost nejrůznějších druhů havárií hrozí možnost úniku kontaminace do podzemních vod. Tato skutečnost byla zohledněna digitalizací silniční a vlakové sítě v prostoru polické pánve;
- skládky odpadů – GIS pracoval s databází zohledňující veškeré technické parametry skládek odpadů (např. plocha a objem skládky, typ odpadu, způsob deponování a zabezpečení) a dále údaje o přírodních poměrech v bezprostředním okolí skládky a data o blízkosti jímaných zdrojů vod. Zájemce o detailnější informace o použitých klasifikačních kritériích a o charakteristiku jednotlivých deponií odkazují na studii KRÁSNÉHO et al. (1997a).

V prostoru polické pánve bylo celkem evidováno 79 skládek odpadů s objemem větším než 10 m³. Plošně jsou tyto skládky rozmístěny poměrně rovnoměrně po celém zájmovém území, i když zvýšenou hustotu nacházíme především v údolí vodních toků přímo v Teplicích nad Metují. Z uvedeného počtu 79 deponií odpadů jsou jen dvě řízené skládky v Polici nad Metují. Technické zabezpečení všech skládek je na velmi nízké úrovni. Jen

11 skládek je oplocených, ale i tyto deponie jsou prakticky bez dozoru. S výjimkou zmíněných řízených skládek ostatním chybí těsnění, monitoring i drenáž průsakových vod. Z celkového počtu evidovaných objektů však v naprosté míře převládají drobné skládky s objemem do 500 m³.

V následujícím přehledu podávám stručný komentář k jednotlivým evidovaným charakteristikám skládek ovlivňujících jejich rizikovitost:

- *průmyslové podniky* – tato „informační vrstva“ zobrazovala údaje o současných průmyslových provozech v polické pánvi, charakteru výroby a produkci odpadů. Slabinou těchto informací byla neúplnost dat o zrušených podnicích. Zatímco po likvidaci zdroje zemědělské činnosti odezní důsledky v průběhu několika let, v případě průmyslové činnosti hrozí nebezpečí šíření kontaminace podstatně delší dobu. K databázi průmyslových podniků byla přičleněna rovněž data týkající se skladů ropných látek;
- *rostlinná výroba* představuje především nevhodnou aplikací hnojiv jeden z nejvýznamnějších problémů nejen v prostoru polické pánve, ale ve vodním hospodářství obecně. Pro účely této studie jsme vycházeli z údajů, které laskavě poskytli pracovníci odboru životního prostředí okresního úřadu Náchod. Základem se staly statistické údaje o průměrném množství použitých hnojiv v kg · ha⁻¹ zemědělské půdy v letech 1978 až 1991. Tyto informace se týkaly N, P₂O₅, K₂O a čistých živin a vztaženy byly na plochu jednotlivých statků. Protože mapy zemědělské půdy v jednotlivých statcích neexistovaly ani v digitální, ani v tradiční mapové podobě (v době zpracování nebyla k dispozici ani digitální mapa využití krajiny České republiky CORINE), údaje o použitých objemech hnojiv byly vztaženy v GISu na následující plochy. Z digitalizovaných rajonů jednotlivých statků byla vyčleněna území, kde hnojení nebylo možno realizovat. Šlo o plochy lesů, zastavěná území a plochy v těsném okolí silnic a železnic. Dále byla vyčleněna území se sklonem svahů větším než 15°. Zbylý prostor byl považován za území, kam bylo možno v rámci jednotlivých statků hnojivo používat. Plochy takto vymezené „zemědělské“ půdy se od údajů o skutečných plochách zemědělsky využívaných ploch lišily jen v rozmezí do 10 %. Větším problémem, který je s ohledem na nedostatek podkladů neřešitelný, je nemožnost rozlišit v regionálním měřítku louky a pastviny od orné půdy. V detailu v měřítku 1 : 10 000 se lze k reálnému stavu přiblížit využitím map plánu rozvozu tekutého hnoje, tyto podklady však zohledňují jen jednu část údajů o plošné distribuci hnojiv. Na obr. 4 jsou znázorněny změny v množství aplikace nejproblematictější složky hnojiv, hnojiv dusíkatých. Ze srovnání průměrné hodnoty 80. let a roku 1991 vyplývají výrazné kvantitativní rozdíly, charakteristické všeobecným poklesem. Při interpretaci těchto dat je však třeba mít na zřeteli časovou heterogenitu obou souborů;

- *živočišná výroba* – charakteristika živočišné výroby vycházela ze zhodnocení bodových zdrojů znečištění Vodních zdrojů Praha (KNĚŽEK 1973). Z této práce bylo možno převzít údaje o způsobu ustájení a počtech dobytka, ovcí a vepřů. Na tuto práci navazovala studie Agrostavu Hronov (RUBÍNOVÁ 1992), která předchozí údaje aktualizovala ke stavu k roku 1991. Na základě těchto podkladů bylo možno kartograficky vyjádřit změny v živočišné výrobě za posledních dvacet let. Ze srovnání množství stájí v zájmovém území vyplývá výrazný úbytek. Nejvíce se snížil počet chlévů pro dobytek mezi Lachovem a Teplicemi nad Metují a dále u Dolního Adršpachu (obr. 5). Tyto údaje by mohly vést k úvaze o snížení ekologické zátěže. Likvidovány však byly pouze drobné kravíny s chovem do 100 kusů dobytka a v řadě případů byl chov skotu nahrazen chovem prasat. Pokud se přepočtou počty dobytka, prasat a ovcí chované v roce 1973 a v roce 1991 na průměrné objemy dusíku na hektar, rozdíly nejsou pro plochu celé polické pánve nijak výrazné. Rozmístění lokalit s nejvyšší zátěží zůstává v podstatě totožné. Lze tedy konstatovat, že v regionálním měřítku nedošlo v polické pánvi z hlediska živočišné výroby za posledních 20 let k zásadnímu obratu.

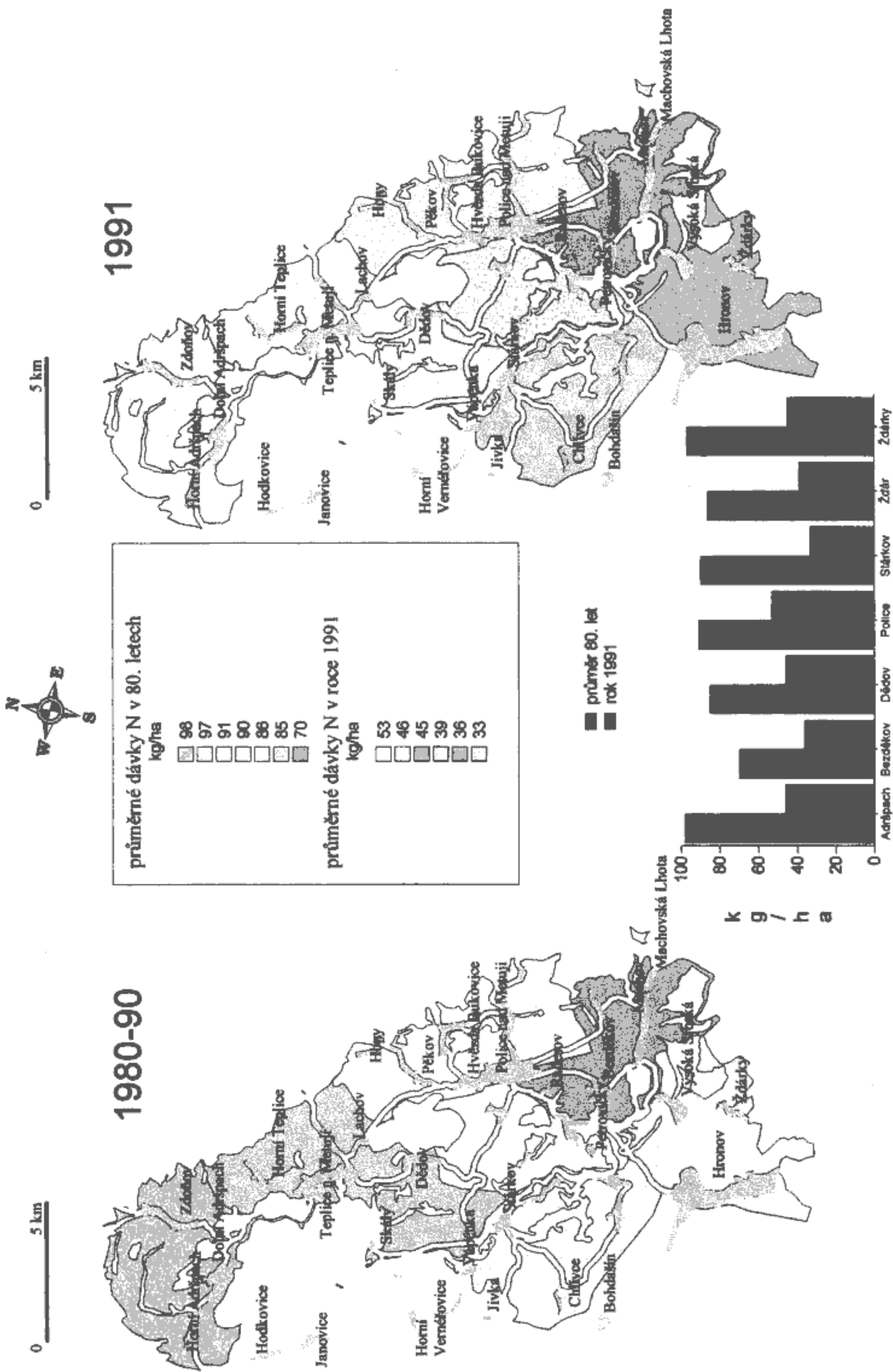
V rámci celé struktury lze vymezit zhruba čtyři oblasti s produkcí dusíku přesahující 20 t · ha⁻¹. Jde o prostor mezi Dolním Adršpachem a Zdoňovem, mezi Bohdašínem a Pěkovem, okolí Police nad Metují a Velkých Petrovic.

Výše uvedené dílčí podkladové mapy byly základem svodných map rizik (obr. 6). První mapou byla signální mapa rizik, kde při průniku jednotlivých dílčích vrstev byl všem dílčím rizikovým aktivitám přisouzen stejný váhový faktor 1. Bodové zdroje znečištění se v mapě projeví elipsou, protaženou ve směru proudění podzemní vody. Tato mapa uživatele upozorňuje na prostor, kde dochází ke kumulaci různých nebezpečných činností bez jejich bližší specifikace.

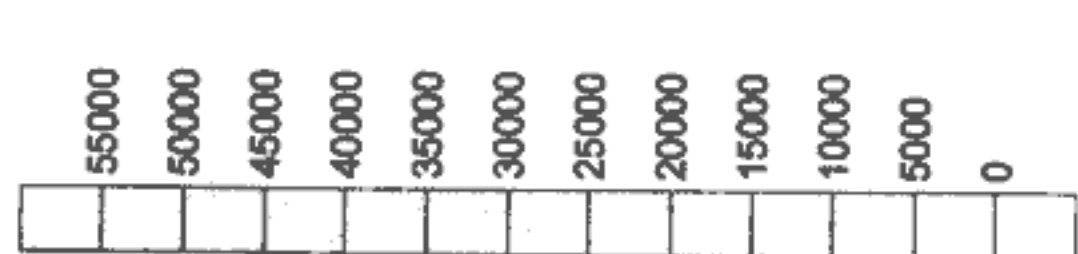
Další mapou byla mapa obecného ohrožení. Zde již je vnášen subjektivní přístup zpracovatele. Všechny rizikové činnosti byly rozčleněny do tří tříd podle jejich lokálního vlivu, např. rostlinná výroba podle produkce nitrátů, skládky podle objemu, stupně zajištění a typu odpadu, atd. U bodových zdrojů byla velikost rizika znečištění vyjádřena plochou elipsy a jejím atributem.

Konečně třetím typem map byly mapy vybraných rizik, které vznikly superpozicí pouze vybraných dílčích map, a ty byly ještě násobeny různými váhovými koeficienty. Například mapa rizik kontaminace nitráty se skládala z dílčích map rostlinné výroby (váha 1), živočišné výroby (váha 0,8), polních hnojišť (váha 0,5), skládky odpadů (váha 0,2).

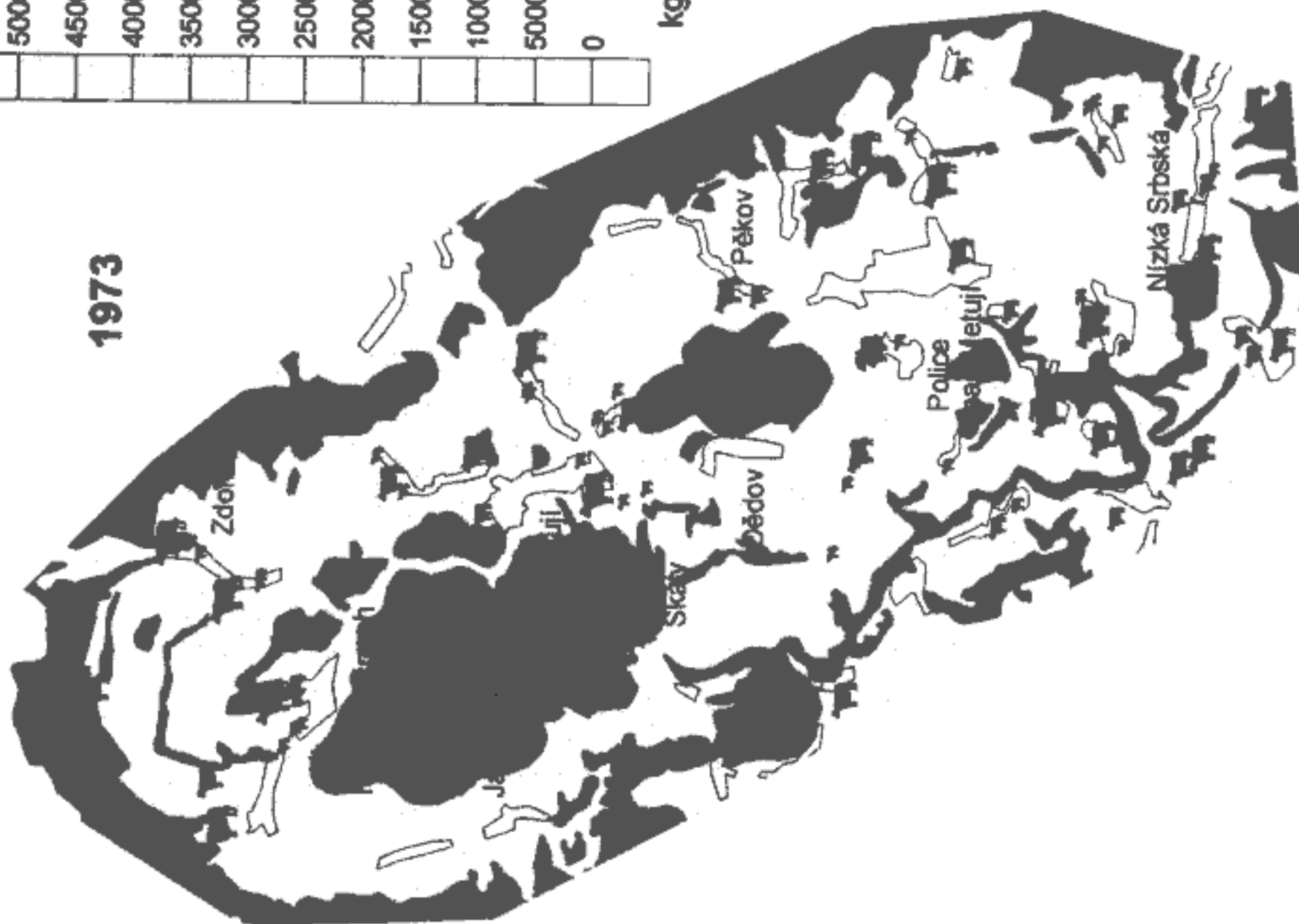
Pro účely detailní analýzy byly údaje o vybraných zdrojích znečištění doplněny o revizní analýzy půd v jejich okolí, které měly potvrdit nebo vyloučit, jde-li o zdroje znečištění potenciální či reálné.



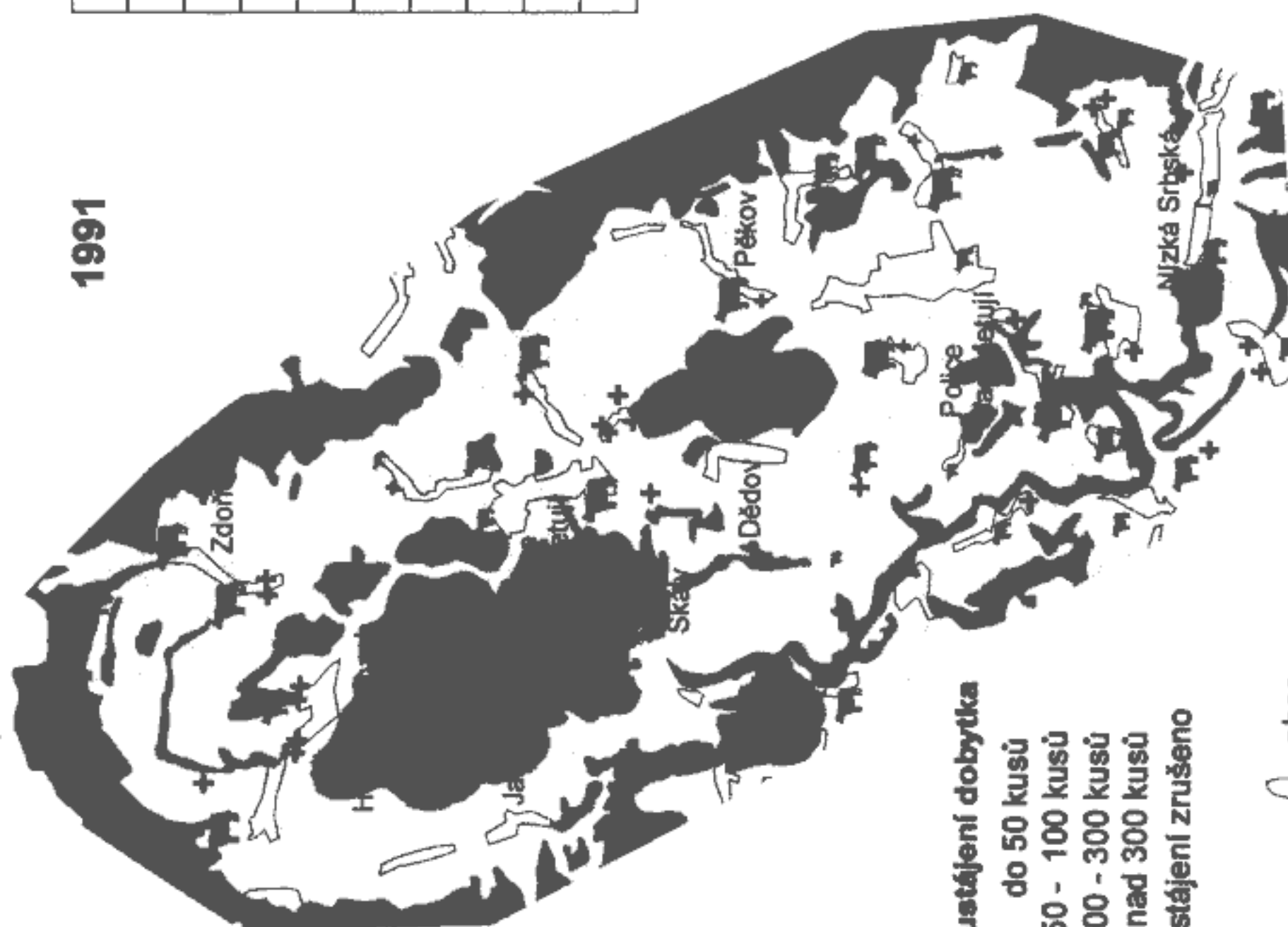
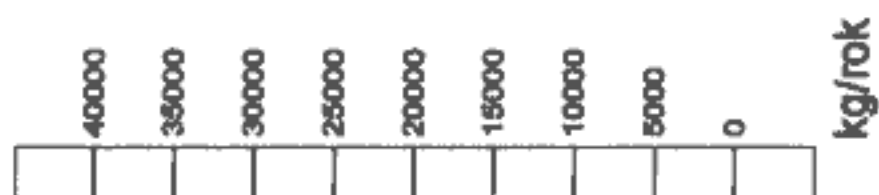
4. Průměrné dávky dusíku v hnojení v polické pánvi v 80. letech a v roce 1991.



1973



1991

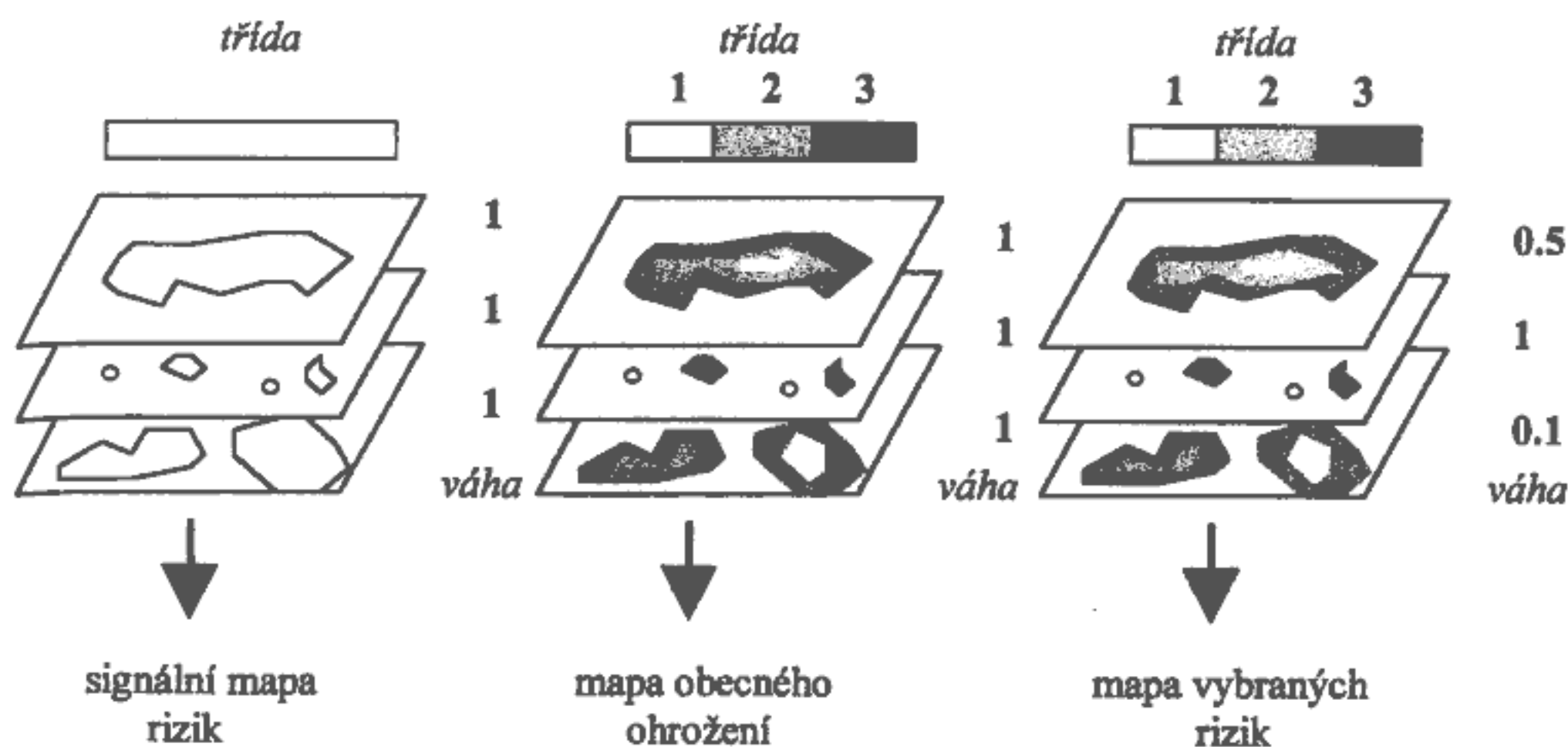


lokality ustájení dobytka

- do 50 kusů
- 50 - 100 kusů
- 100 - 300 kusů
- nad 300 kusů
- + ustájení zrušeno

lesy obce

5. Vliv hustoty ustájeného dobytka na produkci dusíku v polické pánvi.



6. Schéma tvorby map rizik v polické pánvi.

MAPY VÝVOJE JAKOSTI PODZEMNÍCH VOD

Vývoj chemismu podzemních vod v čase svým způsobem představuje určitý druh mapy zranitelnosti, jak ji poprvé definují např. VILLUMSEN et al. (1983) nebo BACHMAT a COLLIN (1987). Tito autoři zdůrazňují dynamiku řady faktorů ovlivňujících zranitelnost podzemních vod a navrhuji vyjadřovat zranitelnost jako velikost změn kvality podzemních vod v důsledku lidské činnosti. Sledování jakosti vody nám v praxi funguje jako test ověřující velikost obranné schopnosti horninového prostředí. Zjistíme-li, že zdroje kontaminace leží ve velmi citlivé oblasti a přesto jímáné vody jsou zcela čisté, pak obranná schopnost prostředí je dosud na dostatečně vysoké úrovni. Sledování plošných a časových změn jakosti podzemních vod současně umožnilo lépe specifikovat zdroje znečištění. GIS umožnil připravit několik map znázorňujících časoprostorové změny chemismu podzemních vod (obr. 7). Při těchto analýzách byla využita tzv. gridová analýza, postup, který byl donedávna vyhrazen jen GISům nejvyšší třídy. Princip této metody je následující:

Sledované fenomény, o kterých se předpokládá, že by mohly mít vzájemnou souvislost, jsou zobrazené v samostatných mapách. V případě polické pánve šlo například o změny koncentrací dusičnanů a plochy s různou intenzitou zemědělské činnosti. Mapy jsou rozčleněny do gridové sítě a každý grid je nositelem příslušné informace – údaje o obsahu dusičnanů v minulosti a v současnosti a informace o intenzitě zemědělské činnosti. GIS poté stanoví objektivní závislost mezi sledovanými parametry. Odečtením údajů „dusičnany v minulosti a v současnosti“ např. získáme představu o rozsahu prostředí, kde došlo k nárůstu a kde k poklesu znečištění (obr. 7). Mechanické stanovení vztahu mezi nad sebou ležícími gridy „dusičnany“ a „hnojení“ však v případě polické pánve nebylo možné, protože situaci komplikuje

je složitý oběh podzemní vody. Jak je zřejmé z předchozího textu, zdroje znečištění se v polické pánvi nemusí projevit v místě svého výskytu, ale v oblasti drenáže podzemních vod. Proto bylo nutno vzít v úvahu rovněž další parametry, především směry proudění podzemní vody a výskyt drenážních a infiltračních oblastí.

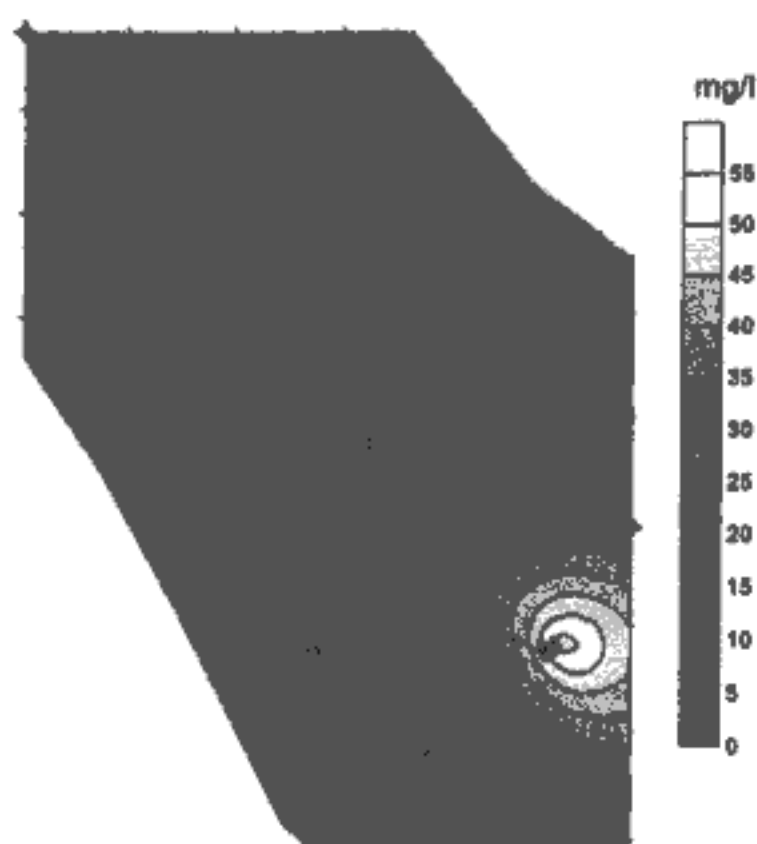
Příklad využití – analýza rizik v okolí jímacího území v Teplicích nad Metují

Jako ukázka použití popisovaného systému může posloužit analýza rizik v okolí jímacího území v Teplicích nad Metují. Na této lokalitě je zachyceným pramenem a třemi vrty jímáno množství vody okolo $90 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Tyto vody pocházejí ze dvou nejhlubších kolektorů a jejich kvalita byla považována za jednu z nejlepších v celé pánvi. Přesto lze konstatovat, že za posledních dvacet let je zaznamenán dvojnásobný nárůst nitrátů a chloridů, který již v současné době překročil normu pro tzv. „kojeneckou“ vodu. Výraznější snížení hladiny podzemní vody v jímáných vrtech navíc zvyšuje podíl přítoku z mělkého, velmi zranitelného kvartérního kolektoru. Tím stoupá nebezpečí kontaminace ropnými látkami a různými typy chlorovaných uhlovodíků z průmyslových provozů v městě Teplicích.

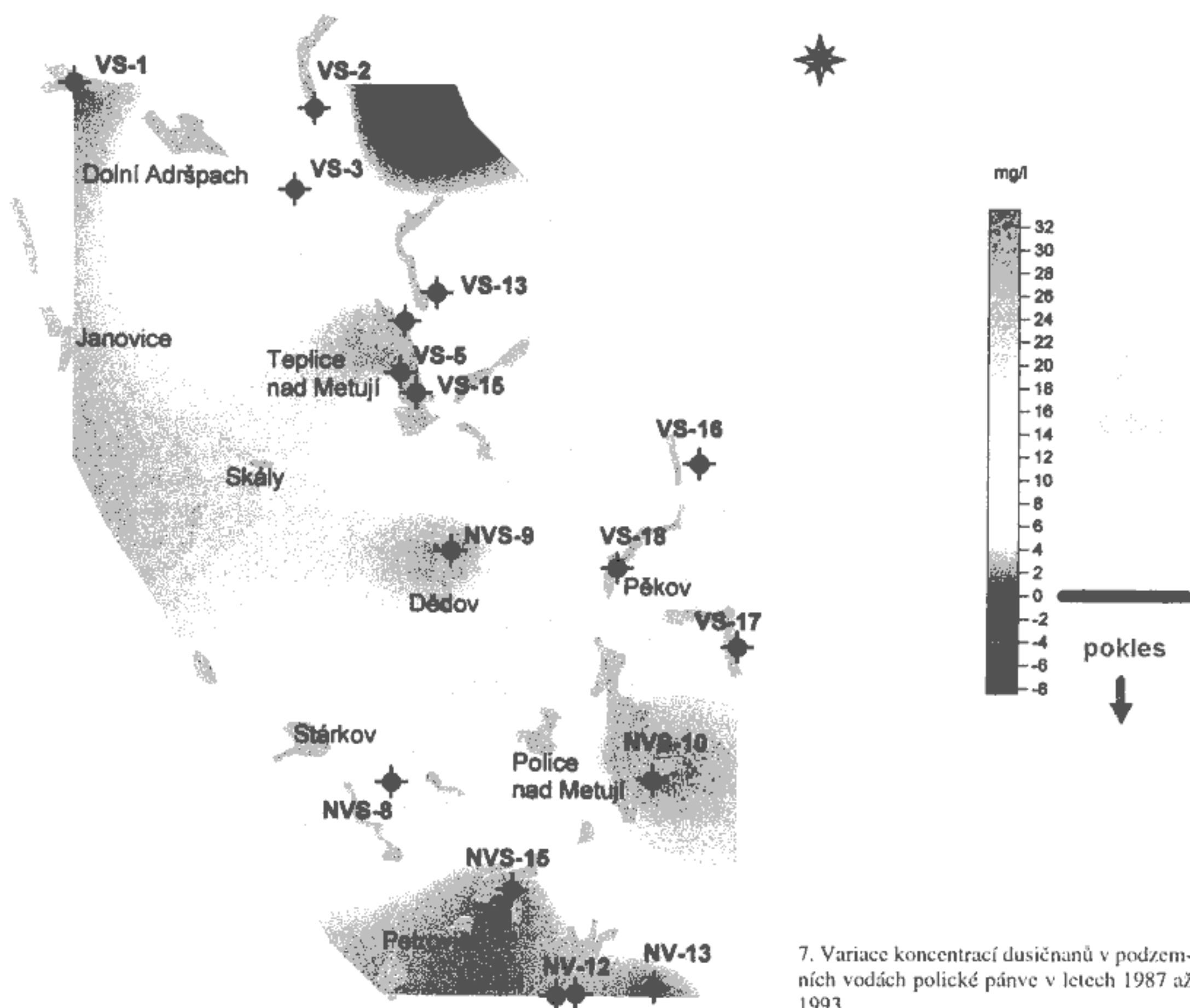
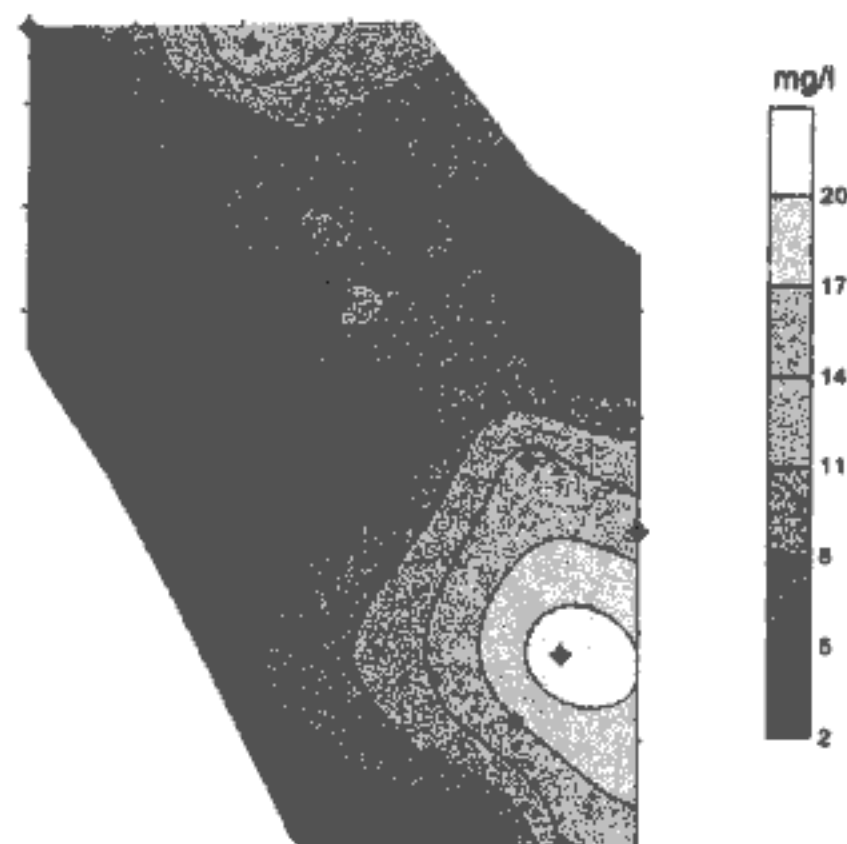
Jak vyplývá z regionální mapy zranitelnosti severní části polické pánve (obr. 8), jímací území Teplice leží ve velmi citlivé oblasti. Křížení zlomových systémů sice na jedné straně způsobilo mimořádně vysoké vydatnosti, na druhé straně však umožňuje poměrně velmi rychlé šíření kontaminace. Jako nejzranitelnější oblasti se jeví výchozové partie cenomanského a turonského kolektoru na severním okraji pánve a dále zlomové linie s prokázaným významným drenážním účinkem.

Srovnání výsledků regionální mapy zranitelnosti a signální mapy rizik prokázala, že značná část rizikové

koncentrace dusičnanů v roce 1993



koncentrace dusičnanů v roce 1987

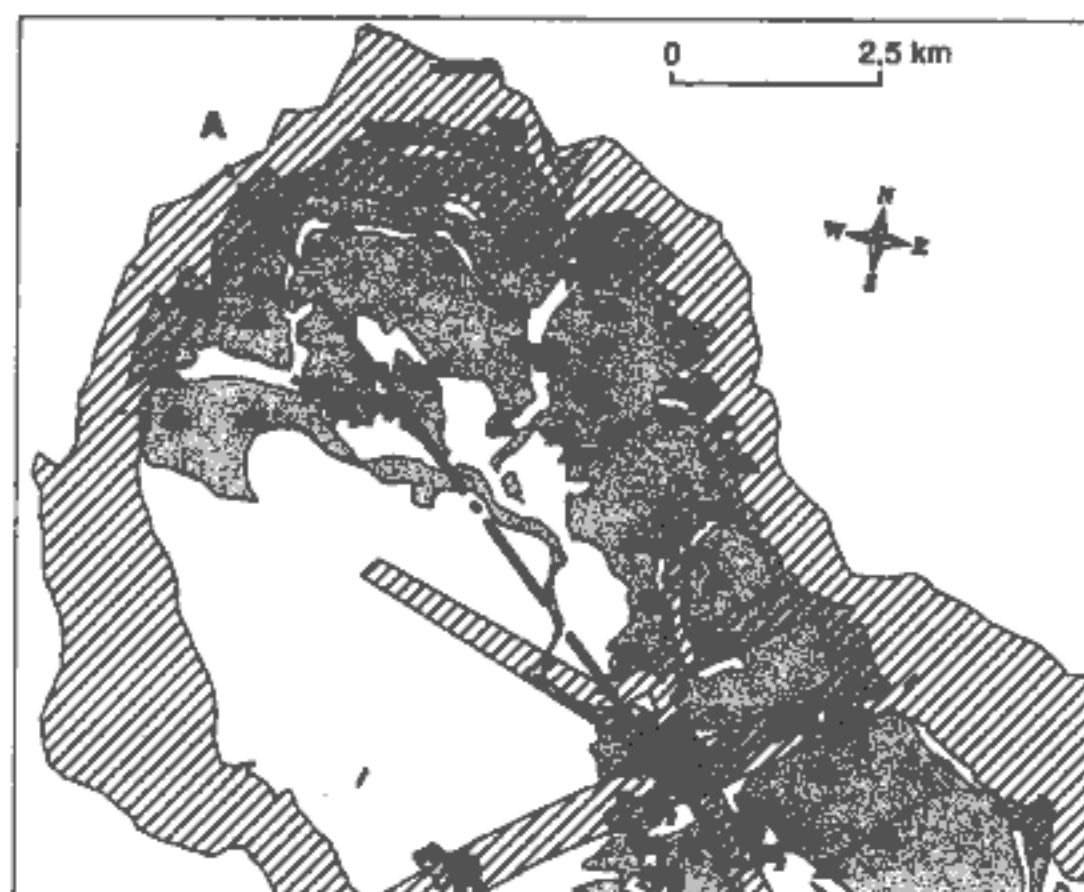


7. Variace koncentrací dusičnanů v podzemních vodách polické pánve v letech 1987 až 1993.

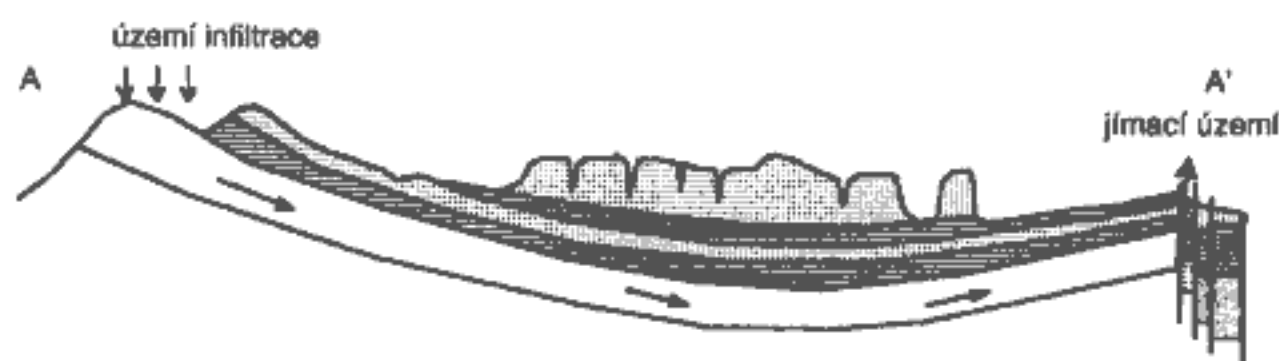
aktivita je situována právě do těchto nejcitlivějších oblastí.

Z mapy rizik zohledňujících časový vývoj dusičnanové kontaminace vyplynulo, že infiltrační oblast jímacího

území Teplice nad Metují patří z hlediska produkce dusíku mezi nejvíce postižené oblasti polické pánve. Od roku 1973 došlo sice k poklesu aplikace dusíkatých hnojiv (z 98 na 46 kg · ha⁻¹), produkce dusíku z živočišné



8. Část regionální mapy zranitelnosti podzemních vod v severní části polické pánve.



výroby však zůstala na velmi vysoké úrovni (pokles ze 106 na 77 kg . ha⁻¹).

Navíc centra ustájení jsou velmi často situována v hydrogeologicky velmi nevhodných pozicích. Na základě znalosti pozice zdrojů znečištění v mapě zranitelnosti bylo možno určit nejnebezpečnější průmyslové zdroje kontaminace a vyjádřit se k stupni rizikovitosti jednotlivých zemědělských objektů.

ZÁVĚR

Zkušenosti s využitím GIS v hydrogeologii při ochraně zdrojů podzemních vod lze shrnout do následujících bodů:

- GIS představuje velmi výkonný a užitečný nástroj při analýze dat, které ovlivňují hydrogeologické poměry v okolí jímáných zdrojů.
- GIS umožňuje nejen prezentovat potřebná data v různých mapových projekcích a měřítcích, ale jeho význam spočívá především v schopnosti stanovení různých vztahů časově a prostorově proměnných dat.
- Tvorba informačního systému, jakým je např. prezentovaný systém v polické pánvi, je prostředkem k urychlení a tím i zkvalitnění práce vodohospodářských orgánů.
- Využití dat z GISu vždy vyžaduje hluboké odborné znalosti ze zpracovávané problematiky. Negativní zkušenosti s metodou DRASTIC v polické pánvi například dokumentují nebezpečnost mechanického

přejímání některých relativně jednoduchých metod tvorby map zranitelnosti.

K tisku doporučil V. Pelikán

Literatura

- ALBINET, M. – MARGAT, J. (1970): Carte de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines de la France à 1 : 1 000 000. – DATAR-BRGM, Orléans, France.
- ALINČE, Z. et al. (1998): Komplexní zhodnocení geofaktorů životního prostředí Jizerských hor – závěrečná zpráva. – MS Stavební geologie, Geotechnika. Praha.
- ALLER, L. et al. (1987): DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. – U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036, 455 p.
- BACHMAT, Y. – COLLIN, M. (1987): Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: Vulnerability of soil and groundwater to pollutants (W. van Duijvenbooden and H. G. van Waegeningh, eds.), TNO Committee on Hydrogeological research. – The Hague, Proceedings and Information, No. 38, p. 297–307.
- CIVITA, M. (1990): La valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. – Proc. 1st Conv. Naz. „Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Technologie et Obiettivi“. Marano sul Panaro, V. 3, p. 39–86.
- HRABÁNKOVÁ, A. et al. (2000): Podklady pro regionální vodohospodářskou bilanci množství podzemních vod. – Výzk. úst. vodohospod. T. G. Masaryka. Praha.
- HRKAL, Z. (1998): GIS multicriterion's analysis of the Police sedimentary basin vulnerability (Czech Republic). – Proceedings

- of the XII. Int. Conference Computational Methods in Water Resources, 141–148, Crete, Greece.
- HRKAL, Z. – ALINČE, Z. (1998): Mapa zranitelnosti podzemních vod Jizerských hor kyselou depozicí použitím GIS. – Sborník 10. hydrogeologické konference. Stráž pod Ralskem.
- HRKAL, Z. – TROUILLARD, J. M. (1994): Use of GIS for optimisation of human activity in a catchment area: An example of the Beauce region (France). – *Environ. geol.*, 24, 22–27. Tuscaloosa.
- KNĚŽEK, V. (1973): Polická pánev. Výsledky I. etapy prací. – MS Vodní zdroje. Praha.
- KRÁSNÝ, J. et al. (1997a): Optimalizace využívání a ochrany podzemních vod s ohledem na ostatní složky životního prostředí: polická pánev. Závěrečná zpráva. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- KRÁSNÝ, J. et al. (1997b): Návrh změn pásem hygienické ochrany podzemních vodních zdrojů polické křídové pánve (pilotní projekt). – Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- MARGAT, J. (1968): Vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions, conception-estimation-cartographie. – EEC Institut Européen de l'eau, Paris, France, p. 11.
- OLMER, M. – ŘEZÁČ, B. (1974): Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale 1 : 200 000. – *Intl. Assoc. Hydrogeologist, Memoires, Tome X, Congrès de Montpellier, 1. Communications*, p. 105–107.
- RUBÍNOVÁ, M. (1992): Aktualizace zdrojů znečištění v polické pánvi. – MS Agrostav Hronov.
- SUAIS, M. F. et al. (1990): Vulnérabilité des aquifères – recherche de critères cartographiques pertinents. – MS DRIR Rhone-Alpes.
- VILLUMSEN, A. et al. (1983): Mapping of vulnerability of groundwater reservoirs with regard to surface pollution. – *Geological Survey of Denmark, Yearbook 1982, Copenhagen*, p. 17–38.

The use of Geographic Information System in protection of groundwaters

(Summary of the Czech text)

ZBYNĚK HRKAL

Received December 22, 2000

The objective of the paper is to present a summary of potential use of the Geographic Information System in protection of groundwaters. The reader will be acquainted with hitherto application of GIS to the construction of maps of groundwater vulnerability and maps of risks. Advantages of GIS are demonstrated on a concrete map of vulnerability of groundwaters in the Jizerské Mountains caused by acid deposition vs. the classic processing of data and compilation of similar maps. The GIS is also presented as an efficient tool in analysis of risks and in a process of establishing the so-called critical ecological load demonstrated on the example of the Beauce Basin in France. The GIS also serves as a source of data in decision-making process in protection of groundwaters from the quantitative point of view. This is shown on an example of elaboration of water management objects in northern Bohemia. Much room is given to demonstrate the application of GIS to a complex data processing, which directly or indirectly affect the groundwater regime and its quality in the Police Basin. An information system has been developed specifically for the protection of groundwaters in common computer treatable form allowing a fast analysis of all spot and areal sources of pollution in dependence on natural conditions. Some examples of GIS application are shown in the article.

Translated by J. Hak

Explanation of text-figures

1. Relationship between HCO_3 contents of groundwaters and relevant risk values of vulnerability map of the Jizerské Mountains.
2. A scheme showing the process of establishing the critical risk.
3. Proportion of single sampling sites vs. the whole yield in the zone No. 464.
4. Average doses of nitrogen in fertilisers in the Police Basin region (years 80. and 1991).
5. Density of cattle vs. production of nitrogen in the Police Basin.
6. Maps of risks, methods of their construction.
7. Variations in the content of nitrogen in ground waters in the Police Basin in the years 1987–1993.
8. Section of the regional map of groundwater vulnerability in the northern part of the Police Basin.