

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební

RNDr. Hubert Kříž, DrSc.

**PŘEDPOVĚDI REŽIMU A ZDROJŮ PODZEMNÍ VODY
GROUNDWATER REGIMES AND RESOURCES
FORECASTING**

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODNÍ STAVBY



BRNO 2001

Klíčová slova: režim podzemní vody, zdroj podzemní vody, předpověď

Key Words: Groundwater Regime, Groundwater Resource, Forecast

Místo uložení práce

archiv pedagogicko-vědeckého oddělení Fakulty stavební VUT v Brně

ISBN 80-214-2004-9

ISSN 1213-418X

© Hubert Kříž 2001

OBSAH

Představení autora	4
1 Úvod	5
2 Charakteristika, klasifikace a význam předpovědí režimu podzemní vody	5
3 Vlivy globálních a regionálních geografických podmínek na režim podzemní vody.....	6
4 Vlivy činností člověka na režim podzemní vody.....	7
5 Předpovědi charakteristik režimu podzemní vody	7
5.1 Prognózy maximálních hladin podzemní vody.....	7
5.2 Předpovědi minimálních hladin podzemní vody	8
5.3 Předpovědi průměrných měsíčních stavů hladin podzemní vody.....	9
5.4 Prognózy průměrných ročních stavů hladin podzemní vody	11
6 Předpovědi vydatností pramenů	12
7 Předpovědi chemického složení podzemní vody.....	12
8 Předpovědi fyzikálních vlastností podzemní vody	14
9 Hodnocení spolehlivosti a přesnosti předpovědí režimu podzemní vody	14
10 Význam předpovědí režimu podzemní vody pro určení velikosti přírodních zdrojů.....	15
11 Uplatnění předpovědí režimu podzemní vody pro stanovení jejího využitelného množství ze zdrojů	16
12 Závěr.....	17
13 Literatura	18
14 Abstract	20

Představení autora

RNDr. Hubert Kříž, DrSc. (narozen 10.3.1933 v Ostopovicích) v roce 1959 ukončil studium geografie (specializace fyzická geografie) na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně.

Po ukončení studia krátkou dobu působil v roce 1959 jako učitel na ZDŠ. V letech 1960 až 1965 byl zaměstnán jako hydrolog v Hydrometeorologickém ústavu a potom 2 roky jako hydrogeolog v n.p. GEOtest v Brně.

V roce 1968 nastoupil tříletý studijní pobyt v Geografickém ústavu ČSAV v Brně. Od roku 1971 byl v tomto ústavu zaměstnán nejprve jako odborný pracovník a od roku 1986 jako vědecký pracovník. V roce 1992, kdy byl z vážných důvodů odvolán z funkce ředitel tohoto ústavu, byl pověřen jeho řízením. V letech 1994 - 1997 byl vědeckým pracovníkem Ústavu pro hydrodynamiku AV ČR v Praze.

V roce 1986 získal vědeckou hodnost kandidáta věd (obor 13-01-09 fyzická geografie) a v roce 1992 doktora technických věd v oboru 39-25-9 hydrologie a vodní hospodářství na ČVUT v Praze.

Již během studijního pobytu vyřešil jednu z dílčích částí úkolu „Fyzickogeografická regionalizace Československa“, a to regionalizaci podzemních vod na území České republiky, což původně měla být jeho kandidátská disertační práce. V dalších letech se podílel na řadě úkolů základního výzkumu a technického rozvoje, které byly převážně zaměřeny k řešení problémů životního prostředí v různých regionech i celé České republice. K nejvýznamnějším patřil úkol „Systém komplexní ochrany prostředí před znečištěním SHR“, „Ochrana životního prostředí lázní Luhačovic“, „Systém komplexní ochrany krajiny Českomoravské vrchoviny“, „Geografická diference Jihomoravského kraje“, „Diagnóza a prognóza životního prostředí ČSR“ aj. Samostatně řešil některé dílčí úkoly základního výzkumu, zejména „Vztahy mezi klimatickými činiteli i prvky a kolísáním zásob podzemních vod“ v letech 1971-1975 a „Hodnocení zdrojů podzemních vod“ v dalších 5 letech.

V letech 1990 -1993 vedl týmy vědeckých a odborných pracovníků nejen Geografického ústavu ČSAV, ale i jiných institucí řešící některé významné úkoly, jako byla např. "Studie ekologických úprav v oblasti nádrží Nové Mlýny", pro MŽP ČR, nebo "Vliv průplavního spojení Dunaje s Odrou na krajinu a životní prostředí" aj. Od roku 1991 do roku 1993 byl nositelem grantového projektu AV ČR "Prognózy režimu podzemních vod v závislosti na změnách geografických podmínek" a současně odpovědným řešitelem dílčí části "Geografická syntéza poznatků o rizikovém ohrožení půd, sedimentů a podzemních vod v povodí Moravy" v rámci Projekt Foundation for Eoodovolopmont „Mondial Alternatief - Chemical Time Bombs.

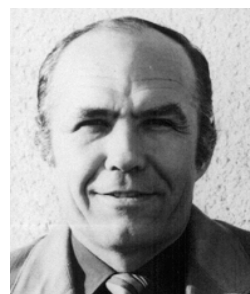
V období 1991 - 1995 se podílel na řešení projektu VÚV TGM Praha „Zabezpečení kvalitní pitné vody pro obyvatelstvo“ Programu péče o životní prostředí MŽP ČR.

V letech 1996 a 1997 byl odpovědným řešitelem grantového projektu GA ČR reg. čís. 103/96/1327 „Modelování vlivu změn klimatu na režim podzemní vody“. V současné době se podílí na řešení významného projektu ČVUT Praha „Extrémní hydrologické jevy v povodích“.

Publikoval 186 vědeckých publikací a odborných článků, z toho 28 v zahraničí, v nichž uveřejnil výsledky svých výzkumů z hydrologie, vodního hospodářství, životního prostředí aj.

Je dlouholetým členem Českého (Československého) výboru pro hydrologii a od 10. července 2001 dozorčí rady Grantové agentury ČR.

Dlouhodobě spolupracuje s FAST VUT Brno, a to nejen při pedagogické, ale při vědecko-výzkumné a publikační činnosti. Tato spolupráce začala na katedře hydromeliorací v roce 1979/1980 vedením diplomových prací 3 studentů, pokračovala vedením cvičení z hydrologie



v zimním semestru 1984/1985, poskytováním konzultací studentům k diplomovým pracím v dalších letech. Významné bylo organizační řízení a přednášková činnost v postgraduálním studiu "Racionální využívání zdrojů podzemních vod" na katedře zdravotního inženýrství v době od 1.10.1989 do 28.2.1991.

1 Úvod

Podzemní voda je významným článkem v globálním oběhu vody na Zemi a důležitým přírodním zdrojem využívaným lidskou společností. Nejčastěji se používá pro potřeby obyvatelstva k pitným a jiným účelům. Kromě toho slouží i pro zásobování zemědělství a průmyslu užitkovou vodou.

Důležitost podzemní vody se v celosvětovém měřítku neustále zvyšuje v závislosti na růstu potřeb vody pro obyvatelstvo. Všechny zdroje podzemní vody je proto třeba chránit a využívat racionálně. K tomu účelu jsou nezbytné informace nejen o současném stavu, ale i o budoucím vývoji režimu podzemní vody a jejího optimálního využitelného množství. Režimem podzemní vody se přitom rozumí časové a prostorové změny kvantitativních a kvalitativních vlastností podzemní vody, které se projevují kolísáním její hladiny, změnami fyzikálního stavu, chemického složení, vydatnosti pramenů a zejména množství vody využitelného ze zdrojů.

V habilitační práci jsou obsaženy výsledky dlouholetého uchazečova výzkumu v oboru hydrologie podzemních vod a také poznatky získané při řešení výzkumných úkolů, např. „Regionalizace podzemních vod na území České republiky“, „Vztahy mezi klimatickými činiteli a prvky a kolísáním zásob podzemních vod“, grantového projektu AV ČR „Prognózy režimu podzemních vod v závislosti na změnách geografických podmínek“ a grantového projektu GA ČR „Extrémní hydrologické jevy v povodích“.

Monografie přináší nové vědecké poznatky o vlivu komplexu geografických aj. podmínek na režim podzemní vody a prognostických metodách použitelných pro řešení prognóz nejen charakteristik režimu podzemní vody (extrémních a průměrných hladin, chemických a fyzikálních vlastností podzemní vody, vydatností pramenů), ale i jejího využitelného množství ze zdrojů. Originální je i popis příkladů uplatnění těchto prognóz v praxi.

2 Charakteristika, klasifikace a význam předpovědi režimu podzemní vody

Obecně se předpovědi rozumí vědecky odvozený a z hlediska spolehlivosti teoreticky i prakticky prověřený systém možných stavů předmětu předpovědi [10]. Výrok o budoucím vzniku, vývoji nebo průběhu určitého procesu musí splňovat následující podmínky:

- vychází z ověřených údajů o minulém a současném vývoji předpovídaného procesu či jevu;
- používá vědecky odvozené a kontrolovatelné metodické postupy, matematické aj. modely;
- předem je možno posoudit pravděpodobnost vydané předpovědi.

Hydrologické předpovědi jsou vědecky podložena stanovení hydrologických prvků nebo jevů na určitou dobu dopředu [6]. V případě předpovědi režimu podzemní vody jde o určení budoucích kvantitativních a kvalitativních změn podzemní vody, k nimž dochází v čase a prostoru v důsledku působení přirozených i umělých vlivů.

Předpovědi režimu podzemní vody se klasifikují podle několika různých hledisek. Rozhodujícím klasifikačním znakem je např. pravděpodobnost výskytu předpovídaného jevu nebo prvku, dále doba časového předstihu předpovědi, jakož i druh předpovídaných veličin. Ve smyslu obecné klasifikace hydrologických prognóz [6] se rozlišují předpovědi pravděpodobnostní, které nezahrnují datum výskytu předpovídaného hydrologického jevu, nebo pozitivní (termínované). Z hlediska časového intervalu se prognózy rozdělují na krátkodobé s předstihem několika dní, střednědobé (sezónní) vydávané na dobu několika

týdnů až měsíců dopředu a dlouhodobé, které představují určení budoucích změn režimu podzemní vody za jeden nebo více roků. Významné je rozdělování prognóz podle druhu předpovídaných charakteristik režimu podzemní vody, popř. velikosti jejích přírodních nebo využitelných zdrojů, resp. vydatností pramenů. Nejčastěji se přitom rozlišují předpovědi maximálních a minimálních nebo průměrných měsíčních či ročních hladin podzemní vody. Dalšími předpovídanými charakteristikami režimu podzemní vody mohou být její fyzikální vlastnosti nebo chemické složení.

Předpovědi se mohou rovněž dělit podle toho, zda jde o stanovení budoucí velikosti pouze jednoho hydrologického prvku nebo o komplexní předpověď, která zahrnuje více charakteristik režimu podzemní vody. Jejím předmětem mohou být i některé další charakteristiky získané odvozením z předpovězených dílčích charakteristik režimu. Příkladem může být velikost využitelného množství podzemní vody ze zdroje na základě jejího vztahu k předpovězenému stavu její hladiny.

Praktický význam předpovědí režimu podzemní vody je značný, a to nejen z hlediska důležitosti zdrojů podzemní vody pro vodárenství, ale i některé další činnosti, které mohou být nějakým způsobem ovlivňovány podzemní vodou. Mohou se uplatnit při navrhování a provozování vodních děl, melioračních staveb, báňských děl, ale i některých inženýrských zařízení, městské a průmyslové výstavbě.

3 Vlivy globálních a regionálních geografických podmínek na režim podzemní vody

Na výskyt a oběh podzemních vod ve vrchních vrstvách zemské kůry v globálním rozsahu celé Země působí některé kosmické vlivy, které mají za následek krátkodobé nebo dlouhodobé změny jejích režimu. Patří k nim působení Slunce, Měsíce, popř. i dalších planet sluneční soustavy na Zemi, jakož i projevy vnitřních přírodních sil v zemské kůře a zemského magnetismu, které jsou však mnohdy také ovlivňovány kosmickými činiteli. Nejvýznamnější jsou vlivy sluneční aktivity na všeobecnou cirkulaci zemské atmosféry. Pohyb a výměna vzduchových hmot v globálním měřítku má značný význam z hlediska doplňování zásob podzemní vody a tím i vlivu na její režim. Účinky slapových jevů se projevují i na pevninách. Vlivem přitažlivosti Měsíce dochází ke změnám piezometrického tlaku, hladiny podzemní vody. Rovněž projevy zemského magnetismu, např. geomagnetické poruchy, ovlivňují atmosférickou cirkulaci, které působí na podzemní vody.

Největší vliv na režim podzemní vody mají procesy probíhající v atmosféře, dále geologická struktura, hydrogeologické a fyzikogeografické poměry, vegetace a také činnost člověka, která se projevuje výraznou změnou původních přírodních podmínek a znamená zásadní zásah do tohoto režimu. Atmosférická cirkulace, sluneční záření a další procesy v atmosféře mají za následek vznik povětrnostní situace s příznačným souborem meteorologických prvků, k nimž náleží tlak, teplota a vlhkost vzduchu, srážky, výpar, rychlost větru. Se změnami počasí souvisí i kolísání hladin podzemní vody, vydatností pramenů a některých dalších prvků režimu podzemní vody. Extremní povětrnostní situace mají obvykle za následek i vznik abnormálních jevů v režimu podzemní vody.

Zásoby podzemní vody se doplňují převážně infiltrací vody z dešťových srážek a tající sněhové pokrývky do půdy a propustných hornin. Množství srážek je v první řadě závislé na cirkulaci atmosféry. Dochází přitom k pohybu rozsáhlých tlakových útvarů cyklón a anticyklón, které způsobují výrazné změny počasí. Výskyt oblasti nízkého tlaku má obvykle za následek počasí s velkou oblačností a vydatnými srážkami, které mohou být za určitých mimořádných okolností příčinou vzniku extrémních hydrologických jevů, zejména povodní a intenzivního působení na režim podzemní vody.

Z ostatních meteorologických prvků se výpar se projevuje jako úbytek z množství vody spadlého ve srážkách. Část srážkové vody, která se vypaří, se nemůže vsáknout do půdy

a hornin. Teplota a vlhkost vzduchu, popř. jeho tlak a vítr náleží k těm meteorologickým prvkům, které se působí nepřímo tím, že ovlivňují velikost výparu, zejména evapotranspirace. Půdní voda, která se přitom spotřebuje, se nahrazuje kapilárním doplňováním od hladiny mělké podzemní vody.

Na geologické stavbě a složení hornin, které tvoří vrchní část zemské kůry záleží hydrogeologické poměry, zejména propustnost hornin. Údaje o rozdílech v hydrogeologických podmínkách jsou důležité např. při výběru vhodných lokalit pro získávání vodních zdrojů a posuzování možností jejich ohrožení extrémními hydrologickými aj. jevy a ochrany. Reliéf zemského povrchu může spolu s dalšími přírodními podmínkami významně ovlivnit velikost zásob podzemních vod. Jeho tvary ovlivňují doplňování zásob podzemní vody, neboť působí na intenzitu infiltrace srážkové vody do půdy a propustných hornin. Rovněž půdní poměry jsou významné z hlediska doplňování zásob podzemních vod. Vlastnosti povrchových vrstev půdy mají spolu s dalšími činiteli vliv na to, kolik vody ze zemského povrchu se dostane až do propustných hornin. Vegetace působí na výskyt a oběh podzemní vody převážně nepřímo tím, že pokrývá zemský povrch a má vliv na velikost infiltrace srážkové vody do půdy a hornin.

Výskyt a oběh povrchové vody na zemském povrchu má vliv na změny množství podzemní vody obsažené v propustných horninách a tím i na její režim. Vztah mezi podzemní vodou ve zvodních a některou z forem soustředění vody na zemském povrchu se může v podstatě projevat dvěma rozdílnými způsoby, a to buďto infiltrací povrchové vody do půdy a zejména propustných hornin, anebo přítokem podzemní vody do vodních toků a nádrží. Za povodňových situací může dojít k mimořádně intenzivní infiltraci povrchové vody do propustných hornin se všemi pozitivními i negativními důsledky. Rovněž dlouhotrvající suchá období se mohou projevit zásadní změnou normálních podmínek.

4 Vlivy činnosti člověka na režim podzemní vody

Významný vliv na režim podzemní vody a zvláště pak na extrémní jevy, které se v něm vyskytují, má různá činnost člověka, neboť je významným činitelem působícím přímo nebo nepřímo na oběh podzemní vody v krajině. Může jít o činnost, jejímž cílem je dosažení takových výsledků, které jsou z hlediska jeho potřeb lidské společnosti výhodné a zpravidla znamenají zvětšení využitelných zdrojů podzemní vody. Děje se tak např. vytvářením podmínek pro umělou infiltraci povrchové vody do propustných hornin.

Mnohá antropogenní aktivita (zásahy do vegetačního pokryvu a reliéfu, výstavba různých objektů, těžba nerostných surovin atd.) znamená zhoršování přírodních podmínek výskytu podzemní vody a ohrožení jejích zdrojů. Tyto negativní vlivy mají nepříznivé následky nejen z hlediska využívání zdrojů podzemní vody, ale i zhoršování životního prostředí. Patří k nim i jímání podzemní vody, které má za následek zánik pramenů, pokles hladin podzemní vody a snížení jejích přítoků do vodních toků. Nejčastějším případem antropogenního ovlivňování je znečišťování podzemní vody, což má některé negativní důsledky, např. omezení možností využívání zdrojů této vody.

5 Předpovědi charakteristik režimu podzemní vody

5.1 Prognózy maximálních hladin podzemní vody

V ČR nejčastěji dochází ke zvětšování zásob podzemních vod v jarním či předjarním období. Prognózy tohoto zvýšení hladiny podzemní vody je možno řešit na základě vztahů mezi spadlými atmosférickými srážkami, které jsou rozhodujícím činitelem z hlediska doplňování zásob podzemních vod. Příkladem je těsná závislost (koeficient korelace $r = 0,96$)

mezi jarním či předjarním zvýšením hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín a součtem maximální vodní hodnoty sněhové pokrývky a dešťových srážek naměřených během jejího tání v klimatické stanici Banín, resp. Březová nad Svitavou, vyjádřená rovnicí ve tvaru:

$$\Delta H = - 0,338 + 0,032 S, \quad (1)$$

kde ΔH - zvýšení hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 [m],

S - úhrn maximální vodní hodnoty sněhové pokrývky a spadlých dešťových srážek [mm].

K prognózám letních nebo podzimních zvýšení hladiny podzemní vody se mohou používat podobné metody, které využívají závislosti tohoto jevu na spadlých dešťových srážkách nebo na vzestupu hladiny povrchové vody ve vodním toku. Závislost mezi zvýšením hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 Banín v letních měsících a úhrny dešťových srážek, které byly naměřeny ve stanici Banín (Březová nad Svitavou) a způsobily vzestup hladin ($r = 0,967$) je vyjádřena rovnicí:

$$\Delta H = - 0,846 + 0,017 S, \quad (2)$$

kde ΔH - zvýšení hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 [m],

S - úhrn dešťových srážek ve stanici Banín, resp. Březová nad Svitavou [mm].

Vztah (2) doplněný o průměrné teploty vzduchu (T), které byly naměřeny v době trvání srážek ve stejné stanici, se vyznačuje mírně vyšší těsností ($r = 0,977$) a má rovnici ve tvaru:

$$\Delta H = - 0,287 + 0,017 S - 0,041 T, \quad (3)$$

Zvyšování hladin podzemních vod v údolních nivách nebo nižších terasových stupních jak v jarním, tak i letním období vlivem vodních toků, je možno nejlépe řešit, s použitím matematického modelu ustáleného proudění vody v horninovém prostředí. Tento model umožňuje simulovat s přijatelnou přesností režim proudění podzemní vody v příslušné oblasti pro vybrané varianty okrajových podmínek (včetně čerpaných množství vody z jímacích objektů). Model byl použit ke studiu změn režimu podzemní vody v jedné z vybraných oblastí - pravobřežní části nivy Moravy mezi jejím odlehčovacím ramenem a Moravským Pískem. Pro numerické řešení byla využita metoda konečných prvků s diskretizací náhradní oblasti sítí trojúhelníkových prvků, na nichž je hledaná funkce - piezometrická výška hladiny - aproximována polynomem prvního stupně. Výsledkem byly vypočítané izolinie piezometrických výšek při vysokém stavu hladiny podzemní vody 26.10.1993 [24].

5.2 Předpovědi minimálních hladin podzemní vody

Nejčastěji se uvádí [11 - 14] jako vhodná metoda pro předpovědi minimálních stavů hladiny podzemní vody taková, která je založená na vztahu mezi minimálními (H_{min}) a předcházejícími maximálními hladinami podzemní vody (H_{max}) nebo nejvyššími průměrnými měsíčními stavu ($H_{m,max}$). O této metodě se však prokázalo, že poskytuje poměrně málo přesné výsledky. Na základě řady ročních minimálních stavů hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín za období 1900 - 1999 vypracované vztahy mezi H_{min} a H_{max} , resp. $H_{m,max}$, se vyznačují poměrně nízkou těsností ($r = 0,75$, resp. $r = 0,756$) a průměrnou chybou 1,2 m. Pouze v případě časové řady 32 minimálních letních stavů hladiny

podzemní vody z vrtu V 12 Banín za období 1900 - 1999 je těsnost vztahu vyjádřeného rovnicí:

$$H_{min} = 43,32 + 0,889 H_{m,max} , \quad (4)$$

výrazně vyšší ($r = 0,91$).

Pro vyjádření trvalého poklesu hladin podzemních vod až po dosažení jejich minimálních stavů je nejvhodnější metoda využívající výtokové čáry. Tato metoda byla úspěšně aplikována na výsledky dlouhodobého pozorování hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín, z nichž bylo vybráno 47 nejvýznamnějších případů déle trvajících poklesu hladiny podzemní vody. Tento soubor sloužil k určení nejlépe vyhovujícího typu exponenciální funkce:

$$H_t = H_0 e^{\alpha t} , \quad (5)$$

kde H_t - hloubka hladiny podzemní vody při jejím poklesu v čase t [m nebo m n.m.],

H_0 - počáteční hloubka hladiny podzemní vody v čase $t = 0$ [m nebo m n.m.],

t - čas [dní],

α - koeficient vyprazdňování.

Znáмым způsobem, který popsali např. Kullman a Petráš [27] byly následně vypracovány obě obalové a průměrná výtoková čára. Budoucí snížený stav hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín po uplynutí doby n dní od její počátečního stavu (H_0) se může vypočítat buďto z rovnice, kterou je vyjádřena průměrná výtoková čára:

$$H_t = H_0 e^{0,00143t} , \quad (6)$$

nebo horní obalová čára:

$$H_t = H_0 e^{0,00129t} , \quad (7)$$

resp. dolní obalová čára:

$$H_t = H_0 e^{0,00156t} . \quad (8)$$

Jednodušší je určení budoucího stavu hladiny podzemní vody během jejího poklesu při z graficky znázorněných obalových a průměrné výtokové čáry.

K výpočtu budoucích minimálních stavů hladiny podzemní vody v údolních nivách je možno rovněž použít již zmíněný matematický model ustáleného proudění vody v horninovém prostředí využívající metodu konečných prvků [24].

5.3 Předpovědi průměrných měsíčních stavů hladin podzemní vody

Z předpovídaných průměrných měsíčních stavů hladin podzemní vody na určitou dobu dopředu se získá základní představa o jejím budoucím režimu. K předpovědím průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody se převážně využívají metody, které vycházejí ze statistického zpracování výsledků dlouhodobých pozorování. Genetické předpovědní metody jsou pro tento účel méně vhodné. Důkazem je např. vztah mezi jarním zvýšením průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín úhrny efektivních srážek za předcházející měsíce ve stanici Banín (Březová nad Svitavou), jehož těsnost vyjádřená koeficientem korelace je pouze 0,82. Využívají se proto k tomuto účelu jiné metody počínaje od lineárních regresí až po autoregresní modely.

Příkladem lineární regrese je velmi těsná závislost ($r = 0,986$) mezi průměrnými stavy hladiny podzemní vody ob jeden měsíc ve vrtu V 12 Banín během jejího dlouhodobého poklesu vyjádřená rovnicí:

$$H_{m,t+2} = 2,568 + 0,931 H_{m,t-2} \quad (9)$$

Rovnice (9) umožňuje výpočet budoucího průměrného měsíčního stavu hladiny podzemní vody v době jejího poklesu v pozorovacím vrtu V 12 Banín s předstihem 2 měsíců a průměrnou chybou 0,3 m.

K prognóze průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody může být použit i autoregresní model [2], který je založen na vztahu budoucího průměrného měsíčního stavu hladiny nejen na jednom, ale i více předcházejících měsíčních průměrných hladinách podzemní vody, popř. i teploty vzduchu a úhrnů srážek. Tento model má tvar:

$$H_{m,t+n} = \pm a_1 \pm a_2 H_{m,t-1} \pm a_3 S_{m,t-1} \pm a_4 T_{m,t-1} \pm \dots \pm a_n H_{m,t-n} \pm \pm a_n S_{m,t-n} \pm a_n T_{m,t-n}, \quad (10)$$

kde $H_{m,t+n}$ - průměrný měsíční stav hladiny podzemní vody v čase $t + n$,

$H_{m,t-1}$ - průměrný měsíční stav hladiny podzemní vody v čase $t - 1$,

$S_{m,t-1}$ - měsíční úhrn srážek v čase $t - 1$,

$T_{m,t-1}$ - průměrná měsíční teplota vzduchu v čase $t - 1$,

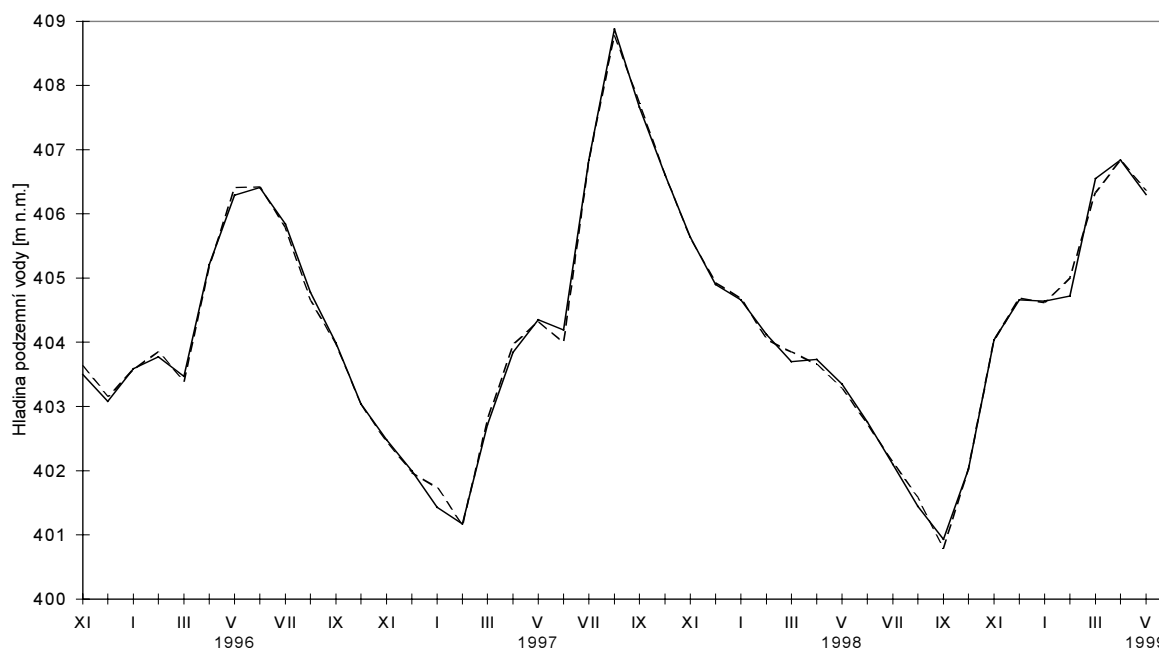
$H_{m,t-n}$ - průměrný měsíční stav hladiny podzemní vody v čase $t - n$,

$S_{m,t-n}$ - měsíční úhrn srážek v čase $t - n$,

$T_{m,t-n}$ - průměrná měsíční teplota vzduchu v čase $t - n$,

a_1, a_2, \dots, a_n - parametry rovnice.

Z rovnice (10) se vycházelo při vypracovávání soustavy 12 rovnic na základě výsledků dlouhodobých pozorování hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín, srážek a teploty vzduchu ve stanici Banín (Březová nad Svitavou), které umožňují výpočet budoucích průměrných měsíčních stavů hladiny podzemní vody v tomto objektu. V grafu na obr. 1 jsou



Obr. 1. Skutečné (—) a vypočítané (- - -) průměrné měsíční stavy hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 Banín za dobu od listopadu 1995 do května 1999.

porovnány z těchto rovnic vypočítané a skutečné průměrné měsíční stavy hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 Banín za dobu od listopadu 1995 do května 1999.

5.4 Prognózy průměrných ročních stavů hladin podzemní vody

Průměrné roční stavy hladin podzemní vody náleží mezi často předpovídané charakteristiky režimu podzemní vody, neboť se jimi vyjadřuje stupeň vodnosti jednotlivých roků. Jejich předpovědi představují základní informaci u budoucí množství podzemní vody, které bude možno získávat ze zdrojů. K předpovědím ročních průměrných stavů hladin podzemní vody se téměř výlučně používají matematicko-statistické metody. Mohou se předpovídat průměrné hladiny podzemní vody jak běžného roku, tak i několika budoucích roků. Se zvětšujícím se časovým předstihem předpovědi se snižuje její přesnost.

Pro prognózu průměrného stavu hladiny podzemní vody za běžný rok je možno použít vztahy tohoto této hodnoty k jarnímu maximálnímu, popř. i předcházejícímu podzimnímu nebo zimnímu minimálnímu stavu hladiny podzemní vody. Příkladem je vztah průměrného ročního stavu hladiny podzemní vody (H_r) k jarní maximální hladině (H_{max}) ve vrtu V 12 Banín vyjádřený rovnicí:

$$H_r = 73,18 + 0,815 H_{max}, \quad (11)$$

nebo k maximálnímu průměrnému měsíčnímu stavu hladiny podzemní vody ($H_{m,max}$) v jarním období ve tvaru:

$$H_r = 68,84 + 0,825 H_{m,max}. \quad (12)$$

Přesnější výsledky je možno získat, když místo H_{max} nebo $H_{m,max}$ se použije aritmetický průměr vypočítaný z předcházejícího podzimního či zimního minimálního (H_{min}) a jarního maximálního stavu hladiny podzemní vody (H_{max}). Rovnice pro výpočet H_r ve vrtu V 12 Banín má po této úpravě tvar:

$$H_r = 20,55 + 0,949 \frac{H_{max} + H_{min}}{2}. \quad (13)$$

Těsnost uvedených vztahů se postupně mírně zvětšuje, čehož důkazem je koeficient korelace, který se zvyšuje z 0,936 (11) na 0,94 (12), resp. 0,966 (13) a současně se snižuje průměrná chyba předpovědi z 0,55 m (11) na 0,54 m (12) a 0,4 m (13).

Dlouhodobé předpovědi průměrných hladin podzemní vody se řeší s použitím analýzy vnitřní struktury časových řad tvořených průměrnými ročními stavy hladin podzemní vody. Používá se k tomu účelu harmonická a spektrální analýza a rozlišují se při tom v časových řadách trendy, cyklické, sezónní a náhodné složky. K těmto dlouhodobým prognózám se různým úspěchem používají i rozličné matematické modely [2, 4].

Příkladem řešení dlouhodobé prognózy průměrných ročních stavů hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín použitím harmonické analýzy je rovnice [38]:

$$H_{r+t} = H_a + 0,94 \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{32} + 0,92\right) + 0,77 \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{8} - 0,32\right) + 0,15 \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{5,05} - 0,2\right) \pm 0,3, \quad (14)$$

kde H_{r+t} - předpovídaný průměrný roční stav hladiny podzemní vody v čase $t+1$ [m],

H_a - dlouhodobý průměrný roční stav hladiny podzemní vody [m],

t - průběžná pořadnice času,

0,3 - velikost chyby předpovědi [m].

6 Předpovědi vydatností pramenů

Poměrně častým případem řešení prognóz jsou předpovědi vydatností pramenů [3, 27, 29], které jsou významnými přírodními zdroji vody. Mnohé z pramenů v ČR proto již jsou využívány jako zdroje vody pro zásobování obyvatelstva. K předpovědím vydatnosti pramenů se využívají totožné genetické a matematicko-statistické předpovědní metody jako při prognózách hladin podzemní vody, neboť jsou ovlivňovány stejnými činiteli, což se projevuje shodnými zákonitostmi v jejich režimu.

Pro příklady praktického řešení prognóz byly využity výsledky dlouhodobých pozorování některých mimořádně vydatných pramenů, které vyvěraly v údolí řeky Svitavy u Březové nad Svitavou, z nichž ovšem některé již úplně zanikly v důsledku trvalého odběru podzemní vody pro brněnský vodovod (Petrovy prameny, průměrná vydatnost 460 l.s^{-1}) nebo, jejichž režim byl tím výrazně ovlivněn (Sulkovy prameny, průměrná vydatnost 97 l.s^{-1}). Prognóza jarního či předjarního zvýšení vydatnosti Petrových pramenů (ΔQ) byla možná na základě její závislosti ($r = 0,98$) na součtu maximální vodní hodnoty sněhové pokrývky a dešťových srážek (S) naměřených během jejího tání v klimatické stanici Banín (Březová nad Svitavou) vyjádřená rovnicí ve tvaru:

$$\Delta Q = 5,33 + 2,528 \cdot S \quad (15)$$

Podobně by bylo možno předpovídat avšak s poněkud menší přesností ($r = 0,87$) letní nebo podzimní zvýšení vydatnosti těchto pramenů ze vztahu vyjádřeném rovnicí:

$$\Delta Q = 6,17 + 3,384 S - 3,117 T \quad (16)$$

kde ΔQ - zvýšení vydatnosti Petrových pramenů v letním neb podzimním období [l.s^{-1}],

S - příčinné srážky ve stanici Banín [mm],

T - průměrná teplota vzduchu ve stanici Banín za dobu, kdy spadly příčinné srážky a zvyšovala se vydatnost pramenů [$^{\circ}\text{C}$].

K předpovědi průměrných ročních vydatností pramenů je možno použít např. její vztah k ředcházející maximální vydatnosti. Příkladem je regresní rovnice, kterou je vyjádřena závislost ($r = 0,92$) průměrné roční vydatnosti (Q_r) na maximální vydatnosti (Q_{max}) Sulkových pramenů:

$$Q_r = 18,84 + 0,646 Q_{max} \quad (17)$$

7 Předpovědi chemického složení podzemní vody

Chemické složení podzemní vody je výsledkem složitého působení geografických, hydrogeologických a hydrologických podmínek, jakož i dalších vlivů, zejména geochemických a biochemických procesů i činností člověka [1, 32]. Základním předpokladem úspěšného řešení předpovědi budoucích změn chemických vlastností podzemní vody jsou proto znalosti jejich vzniku, časové a prostorové proměnlivosti.

K prognózám budoucích změn chemického složení podzemní vody je možno použít genetické, matematicko-statistické předpovědní metody, ale i takové, které využívají bilanci či analogii. Při řešení těchto předpovědí se zpravidla vychází ze zjištěných chemických vlastností podzemní vody během vyhledávacího a hydrogeologického průzkumu, soustavného vzorkování podzemní vody ve vodárensky využívaných a pozorovacích objektech. K nejčastěji používaným náleží metoda založená na principu extrapolace, takže jde o aplikaci poznatků o chemickém složení podzemní vody, které byly získány v minulosti, do budoucnosti. Uplatňuje se při tom i metoda analogie mezi mineralizací a změnami některých

dalších charakteristik režimu podzemní vody. V některých případech byly zjištěny závislosti mezi mineralizací podzemní vody a kolísáním její hladiny nebo jímaným množstvím vody, popř. vydatností pramenů. K prognóze chemických vlastností podzemní vody se používá i metoda bilance [33].

Nejčastěji dochází k praktickému uplatnění prognóz chemického složení podzemní vody v rámci hydrogeologického průzkumu zdrojů podzemní vody. V těchto případech však se mnohdy jedná o odborný odhad předpokládaných budoucích změn chemických vlastností podzemní vody na základě současného stavu, popř. i minulého vývoje a s přihlédnutím i různým negativním vlivům antropogenní činnosti. Méně často se využívají výsledky provozní kontroly jakosti podzemní vody v již využívaných zdrojích pro prognózu chemického složení vody v nových jímacích územích.

Bilanční rovnici k určení budoucí mineralizace podzemní vody použila N.I. Parfemova [33], která vypočítala budoucí mineralizaci podzemní vody v Krasnoznamenické části Azovské zavlažovací soustavy ze vzorce:

$$C = C_p + \left(\frac{P_i C_w + E_v C_u}{P_i + E_v} - C^q \right), \quad (18)$$

kde C - předpovídaná mineralizace podzemní vody [g.l^{-1}],

C_p - počáteční mineralizace podzemní vody [g.l^{-1}],

P_i - doplňování podzemní vody infiltrací srážkové vody [mm],

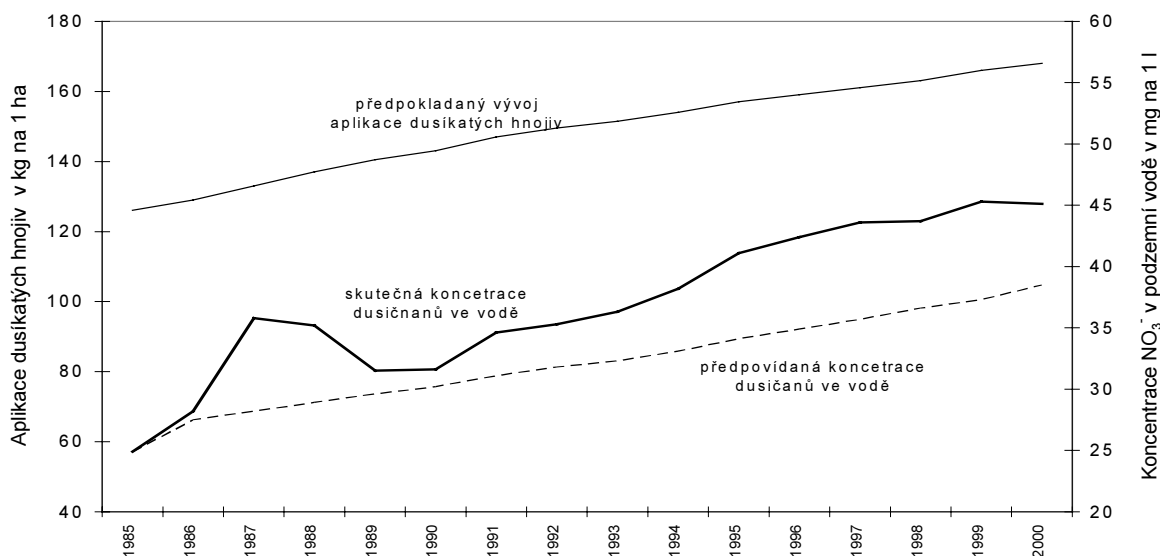
C_w - mineralizace podzemní vody prosakující přes půdní profil [g.l^{-1}],

E_v - množství vody spotřebované na výpar [mm],

C_u - mineralizace vznikající v zóně aerace v důsledku spotřeby vody na výpar [g.l^{-1}],

C^q - množství minerálních látek se dostává difúzně infiltračním odtokem do podložních hornin [g.l^{-1}].

V roce 1986 byla vypracována prognóza průměrných ročních dusičnanů v podzemní vodě prvního vodního zdroje Březová nad Svitavou, a to extrapolací řady minulých ročních průměr-



Obr. 2. Skutečné a předpovídané průměrné roční koncentrace dusičnanů v podzemní vodě prvního vodního zdroje Březová nad Svitavou a předpokládaný vývoj využívání dusíkatých hnojiv v čistých živinách na 1 ha v okrese Svitavy.

ných koncentrací dusičnanů v podzemní vodě a s přihlédnutím k předpokládanému vývoji využívání dusíkatých hnojiv v okrese Svitavy. Z grafu na obr. 2 je patrné, že předpovídané koncentrace dusičnanů ve vodě tohoto zdroje jsou proti skutečným nižší.

8 Předpovědi fyzikálních vlastností podzemní vody

K režimu podzemní vody náleží i časové a prostorové změny jejích fyzikálních vlastností, zejména teploty, viskozity a zákalu. Předpovědi všech těchto fyzikálních vlastností podzemní vody jsou významné z hlediska využívání vodních zdrojů pro různé účely, přesto se však zatím pozornost věnuje převážně jen prognózám teploty vody.

Předpovědi teploty podzemní vody se mohou řešit s uplatněním jednoduchých či složitějších analytických způsobů, které však vždy vycházejí z určitých zjednodušujících předpokladů. příkladem je následující rovnice, která umožňuje určení teploty ve svrchních vrstvách pevných hornin za předpokladu nulové infiltrační rychlosti [7]:

$$T_x = T_s + \Delta T_a e^{-xK_t} \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_p} - x \sqrt{\frac{\pi}{\psi\tau_p}}\right), \quad (19)$$

kde T_x - teplota v hloubce x [°C],

T_s - teplota „hlavního souvrství“, tj. hornin se stálou teplotou [°C],

t - čas [s]

τ_p - délka období kolísání [s],

ψ - koeficient teplotní vodivosti hornin [cm².s⁻¹],

K_t - koeficient dosahu teplotních změn na povrchu,

$$\text{přítom } K_t = \sqrt{\frac{\pi}{\psi\tau_p}}.$$

Pro výpočet teploty „hlavního souvrství“ je možno použít různé vzorce [7, 35].

9 Hodnocení spolehlivosti a přesnosti předpovědí režimu podzemní vody

Předpověď jakékoliv hydrologické charakteristiky, tedy i průměrných či extrémních hladin podzemní vody, vydatností pramenů atd., je zatížena určitou chybou, kterou se rozumí rozdíl mezi předpovězenou a skutečnou hodnotou hydrologického prvku zjištěnou pozorováním (měřením). Obecně se při hydrologických prognózách považuje za vyhovující taková předpověď, kdy absolutní chyba předpovězené hodnoty odpovídá nanejvýš přípustné chybě (δ_p), která se vypočítá na základě směrodatné odchylky (σ_p) skutečných hodnot ze vzorce [6]:

$$\delta_p = 0,674 \sigma_p. \quad (20)$$

Posouzení spolehlivosti předpovědních metod není možné pouze na základě koeficientu korelace, ale je třeba k tomuto účelu použít ještě další způsoby jejich hodnocení. K přesnějšímu hodnocení stupně spolehlivosti předpovědních metod i výsledků prognóz je možno použít ukazatele (η), který se vypočítá ze směrodatné odchylky pozorovaných (σ_p) a předpovídaných hodnot (σ'_p) ze vzorce (6):

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma'_p}{\sigma_p}}. \quad (21)$$

Efektivnost výsledků, které mohou poskytnout jednotlivé předpovědní metody, lze posoudit na základě tabulky 1 [6].

Tab. 1. Klasifikace stupně přesnosti předpovědních metod

$\frac{\sigma'_p}{\sigma_p}$	η	Označení stupně přesnosti předpovědní metody
<0,4	>0,9	dobrá
0,4 to 0,6	0,8 to 0,9	uspokojivá
0,6 to 0,8	0,6 to 0,8	slabá
>0,8	<0,6	neuspokojivá

Hodnocení spolehlivosti předpovědních metod a zejména přesnosti předpovídaných charakteristik režimu podzemní vody se může hodnotit na základě kontrolního souboru, který může být buďto závislý nebo nezávislý [6]. V prvním případě se porovnávají předpovídané a skutečné hodnoty určité charakteristiky režimu podzemní vody, které byly získány jako výsledek pozorování, a jsou součástí souboru použitého při řešení předpovědní metody. Ve druhém případě se použije nezávislý kontrolní soubor, ve které nejsou zahrnuty podkladové hodnoty, na základě nichž byla předpovědní metoda vypracována.

Příkladem použití nezávislého kontrolního souboru k hodnocení přesnosti předpovědí je porovnání minimálních stavů hladiny stanovených metodou využívající výtokové čáry a jistěných v pozorovacím vrtu V 12 v Baníně za období 1995 - 2000 v tabulce 2. Rozdíly mezi

Tab. 2. Předpovídané a skutečné minimální hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 Banín

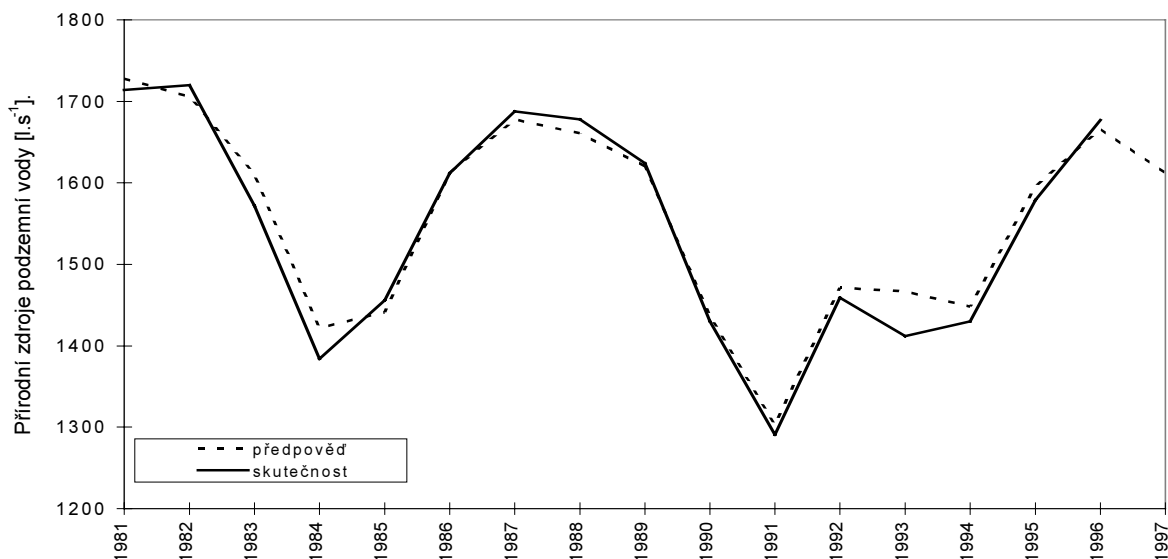
Období trvalého poklesu hladiny podzemní vody	Skutečná minimální hladina podzemní vody [m]	Předpovídaná minimální hladina podzemní vody	
		prognóza [m]	rozdíl [m]
3.7.1996 - 12.2.1997	22,51	22,62	-0,11
30.7. - 17.12.1997	18,48	18,70	-0,22
15.4. - 30.9.1998	22,58	22,34	0,24
31.3.1999 - 26.1.2000	22,82	22,95	-0,13
12.4.2000 - 14.2. 2001	23,35	23,15	0,20

předpovězenými a skutečnými minimální stavy hladiny podzemní vody se pohybují v rozmezí od 0,11 do 0,24 m a jsou tedy ve všech případech podstatně nižší než je přípustná chyba, která může být podle výpočtu ze vzorce (21) až 1,31 m.

10 Význam předpovědí režimu podzemní vody pro určení velikosti přírodních zdrojů

Velikost přírodních zdrojů podzemní vody v rámci určitého územního celku, např. hydrogeologické struktury je podmíněna jeho geologickou stavbou a hydrogeologickými poměry. Značný vliv však mají i klimatické, hydrologické a geomorfologické poměry příslušného území. K výpočtům přírodních zdrojů podzemní vody se používají různé hydraulické, hydrologické aj. metody, které umožňují určit jejich průměrnou či extrémní velikost. Ke zjištění budoucí časové proměnlivosti přírodních zdrojů podzemní vody je možno využít prognózy hladin podzemní vody ve vybraných pozorovacích objektech.

Příkladem uplatnění této metody předpovědi přírodních zdrojů podzemní vody je její využití ke stanovení změn těchto zdrojů v jižní části ústecké synklinály, kde se nachází vodní zdroj



Obr. 3. Skutečná a předpovězená velikost přírodních zdrojů podzemní vody v jižní části ústecké synklinály v letech 1981 - 1997.

Březová nad Svitavou. K tomu účelu byly využity výsledky pozorování ve vrtu V 12 Banín, o němž se prokázalo, že je reprezentativní z hlediska režimu podzemní vody pro celou širší oblast. Vycházelo se při tom z několika odlišných údajů o velikosti přírodních zdrojů podzemní vody vypočítaných bilanční metodou za různá období a jejich vztahu k průměrné hladině ve vrtu V 12 za stejné období.

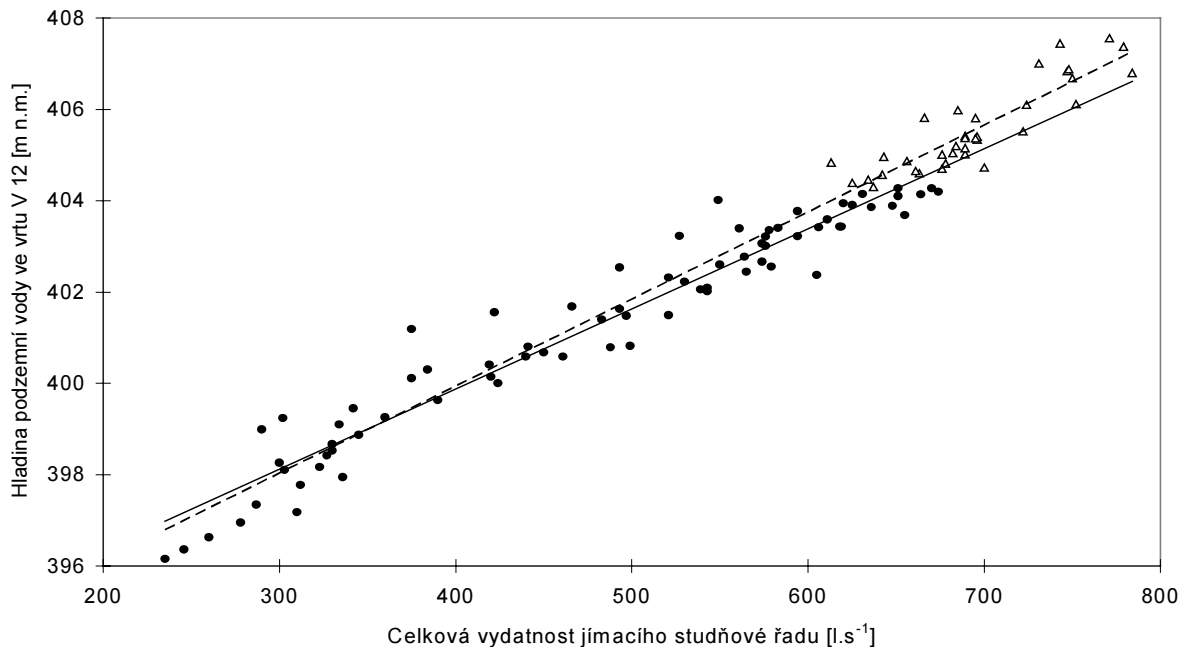
11 Uplatnění předpovědi režimu podzemní vody pro stanovení jejího využitelného množství ze zdrojů

Při řízení provozu významných jímacích území a jiných zdrojů podzemní vody je nezbytné přihlížet k jejímu režimu a uplatňovat při tom poznatky, které byly získány dlouhodobým sledováním hladin v pozorovacích vrtech, měřením vydatností pramenů i vzorkováním podzemní vody v minulosti. Pro tento účel však nejsou dostačující znalosti minulého a současného stavu tohoto režimu, ale je třeba znát i jeho budoucí vývoj, aby řízení odběru podzemní vody z jímacích objektů bylo dostatečně operativní a s časovým předstihem reagovalo na změny, k nimž by mělo dojít v bližší i vzdálenější budoucnosti. Z těchto důvodů jsou mimořádně důležité předpovědi všech charakteristik režimu podzemní vody pro rozhodování o způsobech a podmínkách provozování zařízení, která slouží k získávání podzemní vody pro různé účely. Bez těchto znalostí je sice řízení provozu možné, avšak vzniká přitom nebezpečí, že bude docházet k přetěžování jímacích zařízení a poškozování zvodněných kolektorů.

Vydatnost jednotlivých jímacích objektů (studní, pramenních jímek) i rozsáhlých systémů se mění v čase a prostoru v závislosti na změnách režimu podzemní vody. Těsnost těchto vztahů záleží nejen na přírodních podmínkách, ale i na technickém způsobu jímání podzemní vody (např. při zachycení vody pramenů jímkami nebo čerpání vody ze studní násoskou). Závislost mezi přirozeným kolísáním hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 Banín a vydatností jímacích objektů byla prokázána během dlouhodobé čerpací zkoušky ze

studňového řadu vodního zdroje Březová nad Svitavou do první zvodně [15]. Tato závislost je znázorněna na obr. 4 a vyjádřena rovnicí, která má při stavu hladiny podzemní vody ve vrtu V 12 do 19 m (404,30 m n.m.) tvar:

$$Q = 1423 - 41,09 H, \quad (22)$$



Obr. 4. Vztah mezi hladinou podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 Banín a celkovou vydatností nového jímacího systému vodního zdroje Březová nad Svitavou.

a při stavech hladiny v tomto vrtu nad 19 m (404,30 m n.m.):

$$Q = 1657 - 53,46 H, \quad (23)$$

kde Q - celkové jímané množství podzemní vody z nového studňového řadu do první zvodně vodního zdroje Březová nad Svitavou [$l.s^{-1}$],
 H - hladina podzemní vody v pozorovacím vrtu V 12 [m].

Na obr. 4. znázorněná a rovnicemi (22 a 23) vyjádřená poměrně závislost ($r = 0,986$ nebo $0,885$) je důkazem toho, že předpovědi využitelného množství podzemní vody ze zdrojů je možno řešit na základě prognóz hladin podzemní vody a jejich vztahu k vydatnosti jímacích objektů.

12 Závěr

Podzemní voda patří mezi hlavní přírodní zdroje, které slouží lidstvu k uspokojování jeho potřeb. Zdrojů podzemní vody není ani v globálním měřítku nadbytek a proto je zapotřebí, aby byly využívány co nejlépe, tj. nejlepším způsobem a s přihlédnutím k přírodním podmínkám, zejména režimu podzemní vody. K tomuto účelu však nepostačují pouze poznatky o minulých či současných časových a prostorových změnách kvantitativních a kvalitativních vlastností podzemní vody, ale třeba znát i jejich budoucí vývoj, který může objasnit pouze vědecky opodstatněná prognóza.

Hlavním cílem této práce bylo, aby poskytla poměrně podrobný přehled o všech metodách vhodných pro řešení předpovědí kvantitativních a kvalitativních charakteristik režimu podzemní vody včetně možností jejich praktického uplatnění. Jsou v ní popsány všechny druhy předpovědních metod, zejména genetické, matematicko-statistické, ale i takové, které jsou založeny na využití hydrologické bilance a analogie. Některé z uváděných poznatků představují upřesnění nebo významné rozšíření dosavadních znalostí předpovědních metod (např. využití výtokových čar, hydrologické analogie a bilance), jiné jsou původním autorovým příspěvkem k řešení prognóz podzemních (např. předpovědi jarních a letních maximálních stavů hladiny podzemní vody, přírodních zdrojů a využitelného množství podzemní vody ze zdrojů). Vycházelo se přitom ze 102 originálních grafů a diagramů, v nichž jsou znázorněny převážně různé vztahy, které lze využít pro prognózy jednotlivých charakteristik režimu podzemní vody.

V práci byla mimořádná pozornost věnována praktickému využití metod určených k předpovědím jednotlivých charakteristik režimu podzemní vody a využitelného množství této vody. Praktické využití prognóz režimu podzemní vody bylo názorně prokázáno převážně na příkladu jímacího území Březová nad Svitavou, které náleží k nejvýznamnějším zdrojům podzemní vody v ČR.

13 Literatura

- [1] Appelo, C.A., Poustma, D.: *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Rotterdam Brookfield, A.A. Balkema Publishers 1993. 536 s.
- [2] Balek, J.: *Groundwater Resources Assessment*. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier Sci. Publis. Comp. 1989. 249 s.
- [3] Boussinesq, M.J.: *Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrés dans le sol le débit des sources*. Journal des mathématiques purés et appliqués, tome 10, 5^e series, fasc. 1, Paris 1904, 1-178.
- [4] Cipra, T.: *Analýza časových řad s aplikacemi v ekonomii*. Praha, SNTL 1986. 248 s.
- [5] Čubukova, A.L., Bisembajeva, K.K., Aristova, N.B.: *Prognoz urovnej gruntovych vod s ispolzovanijem avtokorelaciji*. Geologija i razvedka, 1987, 9, 92-97.
- [6] Dub, O., Němec, J. et al.: *Hydrologie*. Praha, SNTL 1969. 379 s.
- [7] Frolov, N.M.: *Zadači izučeniija i vozmožnosti prognoza režima temperatury podzemnych vod*. In: Trudy „Rotaprintnaja serija“, 231, Moskva, VSEGINGEO 1973, 29-41.
- [8] Heinrichsdorf, F.: *Die mittelfristige Vorhersage des Grundwasserstandes mit Hilfe der Regresionanalyse*. Deutsche Gewasserkundliche Mitteilungen, 13, 1969, 6, 142-153.
- [9] Hookey, G.R.: *Prediction of Delays in Groundwater Response to Chatchment Clearing*. Journal of Hydrology, 94, 1987, 1/2, 181-198.
- [10] Kolek, J., Vrchota, J.: *Pronóstické metody a ich aplikácie*. Veda a prax 8. Bratislava, Výskumné výpočtové stredisko OSN 1972. 292 s.
- [11] Konopljancev, A.A., Semenov S.M.: *Prognoz i kartirovanije režima gruntovych vod*. Moskva, Nedra 1974. 214 s.
- [12] Kovalevskij, V.S.: *Uslovija formirovanija i prognozy jestestvennogo režima podzemnych vod*. Moskva, Nedra 1973. 206 s.
- [13] Kovalevskij, V.S.: *Osnovy prognoza jestestvennogo režima podzemnych vod*. Moskva, Strojizdat 1974. 206 s.
- [14] Kovalevskij, V.S.: *Mnogoletnije kolebanija urovnej podzemnych vod i podzemnogo stoka*. Moskva, Nedra 1976. 270 s.
- [15] Kříž, H.: *Relations Between the Abstraction of Groundwater and the Variations of Groundwater Level*. Journal of Hydrology, 13, 1971, 3, 254-262.
- [16] Kříž, H.: *regiony mělkých podzemních vod v České republice*. Studia Geographica, 30,

- Brno Geografický ústav ČSAV 1973. 55 s.
- [17] Kříž, H.: Hydrologie podzemních vod. Praha, Academia 1983. 292 s.
- [18] Kříž, H.: Předpovědi hladin podzemních vod v době jejich poklesu. Vodní hospodářství, 34, 1984, 10, 257-260.
- [19] Kříž, H.: Rezultaty praktičeskogo ispolzovanija prognozov podzemnyh vod. In: Proceeding of International Symposium UNESCO „Groundwater Monitoring and Management“, Berlin, Institut für Wasserwirtschaft 1987, Complex I, 12, 1-12.
- [20] Kříž, H.: Možnosti předpovídání obsahu organických látek v podzemních vodách. In: Sborník 4. Celostátního semináře „Metody analýzy stopových koncentrací organických sloučenin ve vodách“. Pardubice, Vysoká škola chemicko-technologická 1988, 197-206.
- [21] Kříž, H.: Jakost podzemních vod a prognózy jejich budoucích změn. In: Preceding of International Symposium on methological Suggestions for Drawing up Natural Enviroment Maps. ENVIGEO Brno. Brno, Dům techniky ČSVTS 1991,74-82.
- [22] Kříž, H.: Vliv geografických podmínek na režim podzemních vod. Brno, Geografický ústav ČSAV, 1992, Studia Geographica 97, 101 s.
- [23] Kříž, H.: Předpovědi jarních maximálních stavů hladiny podzemní vody v území neovlivněném vodními toky. Vodohospodářský časopis, 44, 1996, 1, 67-78.
- [24] Kříž, H., Říha, J.: Vliv břehové infiltrace vody z řeky Moravy na režim podzemní vody v její údolní nivě. Vodohospodářsky časopis, 45, 1997, 6, 357-374.
- [25] Kříž, H.: Předpovědi letního nebo podzimního zvýšení hladiny podzemní vody na příkladu vrtu V 12 v Baníně. Vodohospodářsky časopis, 46, 1998, 3, 218-233.
- [26] Kříž, H.: Influence of Cosmogenic Factors on Groundwater Regime. Vodohospodářsky časopis, 47, 1999, 3, 208 - 222.
- [27] Kullman, E., Petráš, I.: Výtokové pomery prameňov a ich vzťah k horninovému prostrediu. Zborník prác Hydrometeorologického ústavu, 13, Bratislava, Alfa 1979. 308 s.
- [28] Lebedev, A.V.: Osnovy gidrodinamičeskogo metoda prognoza režima podzemnyh vod. In: Trudy „Rotaprintnaja seria“, 231, Moskva VSEGINGEO 1973, 16-29.
- [29] Maillat, M.E.: Sur la prevision des débits minima des sources de la Vanne. Comptes rendus de l'Academie des sciences de Paris. Tome CXXXIV, p. 1103.
- [30] Mucha, I. and Šestakov, V.: Hydraulika podzemních vod. Bratislava Alfa, Praha SNTL Press 1987. 344 s.
- [31] Nacházel, K., Patera, A.: Filtrace hydrologických řad. Vodohospodářsky časopis, 22, 1974, 6, 569-592.
- [32] Pačes, T.: Základy hydrochemie. Praha, Academia 1983. 304 s.
- [33] Parfemova, N.I.: Metody prognoza mineralizaciji gruntovyh vod v uslovijach orošenija. Trudy „Rotaprintnaja serija“, 231, Moskva, VSEGINGEO 1973, 42-50.
- [34] Semenov, S.M., Iskandarov, N.G.: Prognoz režima gruntovyh vod na meteosynoptičeskoy osnove. In: Trudy "Rotaprintnaja serija", 231. Moskva, VSEGINGEO 1973, 50-62.
- [35] Škatunkin, V.N.: Ispolzovanije metoda množestvennoj korelaciji dlja opredelenija temperatury „Centralnogo sloja“. Trudy "Rotaprintnaja serija". 231, Moskva, VSEGINGEO 1973, 102-106.
- [36] Todd, D.K.: Groundwater Hydrology. New York - Brisbane - Chichester - Toronto, J.Wiley & Sons 1980. 535 s.
- [37] Verigin, N.N.: Neustanovivšesja dviženije gruntovyh vod bliz vodochranilišč. Moskva, Goststrojizdat 1962. 248 s.
- [38] Zalberg, E.A. and Deč, V.N.: Issledovanije i prognoz režima podzemnyh vod s pomoščju mnogomernogo spektralnogo i komponentnogo analizov. Razvedka i ochrana neдр, 49, 1979, 6, 40-46.

14 Abstract

Groundwater is highly important for economy, as it constitutes one of the main natural resources exploited by man to satisfy his needs. As the magnitude of utilizable groundwater resources is limited and their importance vital, it is necessary to strive for their optimal exploitation with respect to their natural environment. Economical management of these resources is not possible without adequate knowledge of groundwater regime. The data on the past and present time and spatial changes of quantitative and qualitative groundwater resources are not sufficient, as it is necessary to know their future development, which can be explained only by a scientific forecasts.

The main aim of this work is to give a comprehensive survey of procedures suitable for forecasting the quantitative and qualitative characteristics of groundwater regime, their solutions and applications. The monograph describes factors affecting groundwater regime (global and regional geographical factors) and all known forecasting methods, be they genetic or statistical, as well as those based on hydrological balance or analogy. Some of the new findings contribute to the accuracy and range of forecasting methods, other data are original and enlarge the practical and theoretical knowledge of the subject.

As this monograph is intended for help in practical exploitation of groundwater resources and management of intake areas and establishments, special attention is given to practical application of forecasts to the individual groundwater regime elements and to the assessment of the future volume of water for use. There are examples of practical use of groundwater regime forecasts in the Czech Republic and some other countries to illustrate all described methods and procedures.

The lack of basic data, especially of sufficiently long time series of groundwater levels, discharges of springs and water quality checks, prevented the groundwater regime forecasts from being worked out in desirable extent. The development in some of the forecasts, especially those of chemical and physical groundwater properties, has not advanced so far yet as to satisfy the practical needs. This fact also reflects in this monography. The experience from a relatively short application of groundwater regime forecasting in Czech Republic and other countries is not adequate either and requires further research. In spite of these short comings, this book can be justly presumed to be of help for practice and research in the development of groundwater regime forecasting.

The necessity of reasonable exploitation of groundwater resources makes the groundwater regime elements forecasts a matter of prior concern. The management of water resources, with their limited magnitude and uneven distribution over the world and of groundwater resources especially, must be highly reasonable. In many respects, groundwater surpasses surface water and in some countries it is therefore the main resource of drinking water supply and of quality water for other purposes. Water supply is usually impaired in dry seasons when the demands increase. These periods also test the management of groundwater withdrawal, which is usually inadequate due to delayed arrangements for complimentary water supply. Groundwater regime forecasts are of vital importance for such situations. Regular seasonal and long-term forecasts of average and extreme groundwater levels are highly important for water management. At the same time it is necessary to improve the forecasting and extend the number of groundwater regime elements considered. Special attention should focus on groundwater quality forecasts which have become topical owing to the negative effects of anthropogenous activities on groundwater regime.