

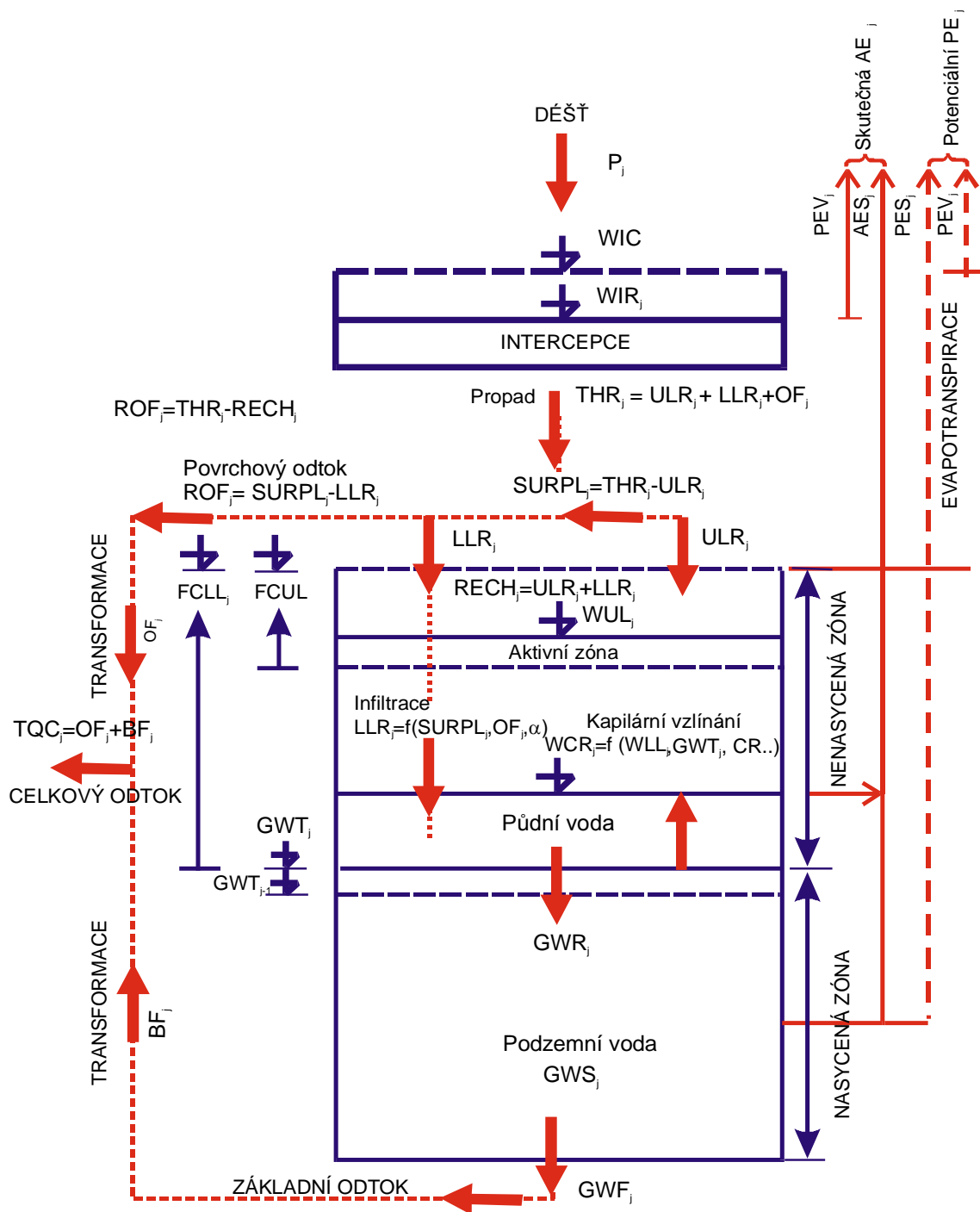
Bilanční model WBCM-7: Úvod

Model WBCM (*Water Balance Conceptual Model*) je klasifikován jako model deterministický, konceptuální, celistvý, nelineární. Jeho parametry jsou pravděpodobnostně rozděleny po ploše povodí tak, aby byla zachována jejich plošná variabilita. Každý kapacitní element modelu reprezentuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu (viz Obr. 2-1). Model byl navržen pro studium jednotlivých komponent hydrologické bilance v závislosti na změnách hospodářského využití povodí. Simuluje denní bilanční hodnoty ve vegetačním období – kritickém období pro vznik vláhových deficitů – a uvažuje všechny podstatné interakce mezi jednotlivými zónami, tj. vegetační, nenasycenou a nasycenou zónou.

Kapacity všech zón respektují různorodost přirozených hydrologických podmínek povodí. Model ve většině zón uvažuje lineární rozdělení těchto kapacit kolem jejich průměrných hodnot. Struktura modelu respektuje fyzikální principy, podle nichž dochází k interaktivním hydrologickým procesům (evapotranspiraci, intercepci, infiltraci a tvorbě přímého a základního odtoku). Nedílnou součástí modelu je automatická optimalizace parametrů v jeho identifikační fázi. Aplikační verze modelu WBCM-7 používá denních hydrometeorologických dat a optimalizuje tři parametry (*S*MAX, *G*WM, *B*K), které jsou popsány níže (Kovář et al., 2010). Princip optimalizace těchto parametrů je stejný, jako u předchozích verzí modelu WBCM-1 až 6 (Rosenbrock, 1960), ale změnila se kritériální funkce. Změna spočívá v tom, že namísto použití kritéria shody měřených a vypočtených průtoků, se používá kalibrace modelem pro dosažení optimální shody dekádních hladin podzemní vody (HPV) v nejbližších měřených vrtech (transektech) ČHMÚ s hodnotami HPV vypočtenými modelem WBCM-7.

Popis jednotlivých symbolů vstupujících a vystupujících parametrů v modelu WBCM-7, z Obr. 2-1 je shrnut a uveden v následující Tab. 2-1. V tabulce jsou také uvedeny jednotky v jakých je třeba vstupní hodnoty zadat do modelu. Model pracuje s denními hydrometeorologickými daty a ve vzájemné interakci řeší následující dílčí hydrologické procesy:

- potenciální evapotranspiraci,
- intercepci,
- tvorbu povrchového odtoku a jeho transformaci,
- dynamiku nenasycené zóny a skutečnou evapotranspiraci,
- dynamiku nasycené zóny a celkový odtok.



Obr. 2-1: Koncepce modelu WBCM-7

Tab. 2-1: Popis symbolů podle Obr. 2-1 modelu WBCM

P_j	výška deště [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]	OF_j	transformovaný přímý odtok [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]
PE_j	potenciální evapotranspirace [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$]	WUL_j	obsah vody v aktivní zóně [mm]

PEV_j	evapotranspirace vody zachycené intercepčí [mm·den ⁻¹]	$FCUL_j$	průměrná retenční kapacita aktivní zóny [mm]
PES_j	potenciální evapotranspirace z půdy [mm·den ⁻¹]	WLL_j	obsah vody v celé nenasycené zóně [mm]
AES_j	skutečná evapotranspirace [mm·den ⁻¹]	$FCLL_j$	průměrná retenční vodní kapacita nenasyc. zóny [mm]
THR_j	propad deště vegetačním krytem [mm·den ⁻¹]	GWR_j	přírůstek objemu podzemní vody [mm·den ⁻¹]
$SURPL_j$	povrchová retence [mm·den ⁻¹]	GWS_j	akumulace podzemní vody [mm]
ULR_j	voda zadržaná vrchní zónou a voda zadržaná v mikrodepresích [mm·den ⁻¹]	GWT_j	hladina podzemní vody pod úrovní terénu v měřeném representačním profilu [m n.m.]
LLR_j	voda infiltrující během retenční fáze [mm·den ⁻¹]	WCR_j	kapilární doplňování nenasycené zóny ze zásob podzemní vody [mm·den ⁻¹]
$RECH_j$	velikost infiltrace [mm·den ⁻¹]	BF_j	základní odtok [mm·den ⁻¹]
ROF_j	výška přímého odtoku [mm·den ⁻¹]	TQC_j	celkový odtok [mm·den ⁻¹]

Pro řešení denních hodnot potenciální evapotranspirace $PE(J)$ byla adaptovaná metoda Penmana ([Penman, 1963](#); [Penman, 1948](#); [Monteith, 1965](#)) do prostředí modelu, dále Priestley-Taylorova metoda ([Priestley, Taylor, 1972](#)) a postup dle Hamona ([Hamon, 1982](#); [Bultot, Dupriez, 1976](#)). Aplikační výběr každé z těchto metod závisí na dostupnosti vstupních meteorologických dat. Denní hodnoty nasycených vodních par (při dané teplotě) a Bowenův poměr je řešen analyticky Goff-Gratchovými rovnicemi ([Kulhavý, Kovář, 2000](#)).

Pro tento projekt byl výpočet potenciální denní evapotranspirace (dále jako PET) proveden podle metodiky Turca ([Turc, 1961](#)). Denní sumy PET pro periody dnů 1-10, 11-20, 21-konec měsíce byly odvozeny dle základního vztahu:

$$PET = \{[(R_g/0.041868) + 50] 0.013 T_d\} / (T_d + 15) \quad (2-1)$$

kde R_g je denní suma globální radiace (v MJ m⁻²) a T_d je denní průměr teploty vzduchu (ve °C). Hodnota PET je v mm den⁻¹.

Pro výpočet PET bylo nutné odvodit hodnoty denních sum globální radiace R_g . Hodnoty globální radiace byly odvozeny pomocí modelu sluneční radiace ([Hadaš, 2002](#)). V modelovém výpočtu byly použity údaje o denní době trvání slunečního svitu z 92 meteorologických stanic na území ČR a ze stanic Německa, Rakouska, Slovenska, které leží blízko hranice ČR.

Jak uvádějí Kovář, Štibinger et al. ([2007](#)), modelová jednotka řešící intercepční proces je založena na předpokladu simulování intercepční schopnosti vegetačního krytu povodí parametrem, jenž vyjadřuje průměrnou intercepční schopnost povodí. Předpokládá se též lineární

rozdělení lokálních intercepcí kolem této průměrné hodnoty po ploše povodí. Vstupem do této jednotky je dešť, výstupem propad deště, výška intercepce a část výparu vody zachycené vegetací. Parametr potenciální (tj. maximálně dosažitelné) intercepce WIC je lineárně rozdělen po povodí (od nulové hodnoty až do dvojnásobku WIC).

Proces tvorby povrchového odtoku je řešen upravenou U. S. Soil Conservation Service metodou (*US SCS, 1982; US SCS, 1986; Janeček, 1992*). Potřebné parametry, zahrnující vliv fyziografických charakteristik a odtokové vlastnosti reliéfu aktivní zóny, jsou hodnoceny číslem odtokové křivky CN. Mohou být též získávány automatickou optimalizací (*Morel-Seytoux, 1982; Hjelmfelt, 1982*).

Řešení dynamiky nenasycené zóny (tj. její sycení a čerpání) s parametrem maximálního nasycení S_{MAX} záleží především na výšce propadu deště, deficitu půdní vlhkosti této zóny, potenciální evapotranspiraci a parametrech vyjadřujících její nehomogenitu ($P1, P2, P7$). Vstupem do této zóny je infiltrační podíl (po odečtení přímého odtoku) a výstupem přítok do nasycené zóny, část skutečné evapotranspirace z této zóny a přírůstek její vlhkosti.

Nasycená zóna WBCM-7 je řešena pouze rámcově tak, aby poskytovala mechanismus vytváření základního odtoku. Vstupem do ní je hluboká infiltrace (perkolace), která je výstupem z nenasycené zóny. Maximální akumulace nasycené oblasti je vyjádřena parametrem GWM . Proces transformace základního odtoku je řešen lineárně s uplatněním parametru BK . Celkový odtok je získán superpozicí přímého a základního odtoku. Objemovou shodu složek bilance zabezpečuje sledování kontinuity dle bilanční rovnice:

$$SRAIN = AE + STF \pm (\Delta WP + \Delta WZ) \quad (2-2)$$

$$SRAIN = AE + STF \pm \Delta W \quad (2-3)$$

kde $SRAIN$ je výška srážek (mm), STF výška celkového odtoku (mm), AE skutečný (aktuální) výpar (mm), ΔWP změna vlhkosti nenasycené zóny (mm), ΔWZ změna objemu nasycené zóny (mm) a ΔW výsledná změna objemu podpovrchových vod (mm).

Nejdůležitější částí modelu je řešení dynamiky nenasycené zóny, tj. její sycení a čerpání výparem. Proces je popsán rekurzivními vztahy respektujícími plošnou proměnlivost lokálních hodnot parametrů pórovitosti (POR) a polní vodní kapacity (FC) nenasycené zóny. Model simuluje hydrologickou bilanci se 13 parametry uvedených v následující Tab. 2-3.

Tab. 2-3: Vstupující parametry do modelu WBCM pro simulaci hydrologické bilance

$AREA$	plocha povodí (km ²)
FC	parametr charakterizující „průměrnou“ hodnotu kapacity oblasti nenasycené (kořenové) zóny (-)

POR	parametr charakterizující „průměrnou“ hodnotu pórovitosti nenasycené (kořenové) zóny (-)
KS	parametr nasycené hydraulické vodivosti ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
DROT	parametr hloubky aktivní (kořenové) zóny (mm)
WIC	horní limit kapacity intercepce (mm)
ALPHA	parametr vyjadřující nelineární plnicí proces nenasycené zóny (-)
SMAX	parametr reprezentující maximální kapacitu nenasycené zóny (mm)
GWM	parametr reprezentující maximální aktivní kapacitu nasycené zóny (mm)
CN	číslo odtokové křivky (-)
P1, P2, P7	parametry ovlivňující dynamiku nenasycené zóny: plnicího (P2) a vyčerpávacího (P1 a P7) procesu (-)
BK	parametr transformace základního odtoku (den)

pozn.: (tučně vytištěné parametry jsou automaticky optimalizovány)

Model je podrobně popsán v literatuře (Kovář, 1994; Kulhavý, Kovář 2000; Kovář et al. 2004; Kovář et al. 2010a; Kovář et al. 2010b). Cílem modelu je zejména simulace dynamiky půdní vlhkosti v aktivní a nenasycené zóně, územního výparu a denních odtoků. Změny zásob podzemních vod jsou simulovány s ohledem na tvorbu základního odtoku a s vědomím možnosti nehomogenních lokalit, kde mohou být zásoby podzemní vody nekontrolovatelně drénovány poruchami nehomogenity, souvisejícími s chováním kvartéru řeky Moravy.

Složitý proces absorpce zóny pro výpočet dynamiky její vlhkosti, a tím i řešení územního výparu je popsán rekursivními vztahy, respektujícími plošnou proměnlivost lokálních hodnot parametrů *POR* a *FC*, vyjadřujících průměrnou pórovitost a retenční vodní kapacitu aktivní zóny. Platnost lokálních parametrů procesu je nutno rozšířit respektováním jejich proměnlivosti po ploše většinou lineárně, kolem jejich průměrných hodnot.

Proces “plnění” této aktivní zóny závisí především na stupni jejího nasycení, tzn. podílu vlhkosti $WUL(J)$ na maximální udržitelné vlhkosti (retenční vodní kapacitě) *FCUL*. Tento podíl $WUL(J)/FCUL$ je limitujícím, nicméně model dále respektuje heterogenitu lokálních hodnot *FCUL* po ploše povodí tak, že předpokládá jejich lineární rozdělení od nulové hodnoty do dvojnásobku hodnoty průměrně *FCUL*. Obdobně i pro funkci “vyčerpávání”, tj. pro územní výpar, je tato koncepce akceptována s tím, že podíl aktuálního a potenciálního výparu se řídí hydrologickými zákonitostmi, v modelu vyjadřovanými parametry (*P1*, *P2*, *P7*). Řešení procesu “sycení” a “čerpání” celé nenasycené zóny je založeno na obdobném principu jako řešení aktivní zóny, jež je její součástí. Vzhledem k prostorové nestejnorození

nenасыčené zóny je do řešení zaveden parametr, vyjadřující heterogenitu prostředí (parametr $ALPHA$). Procesy jsou obdobně řízeny podílem nasycení, tj. poměrem vlhkosti $WLL(J)$ a retenční vodní kapacity $FCUL(J)$, což je $WLL(J)/FCUL(J)$. Je-li půdní vlhkost aktivní zóny $WUL(J)$, potom je bilančním vstupem do aktivní zóny $RUL(J)$:

$$RUL(J) = THR(J) - OF(J) - PES(J) \quad (2-4)$$

a deficit její vlhkosti:

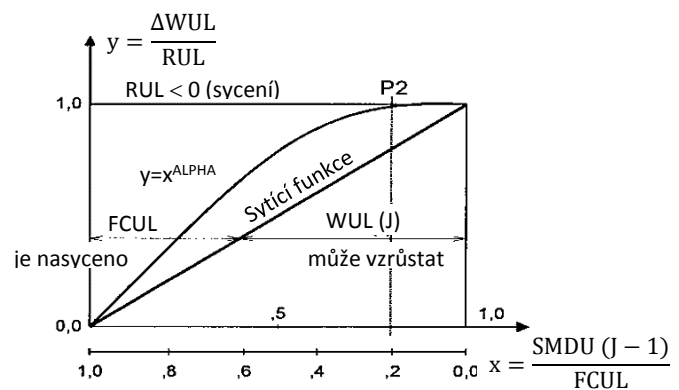
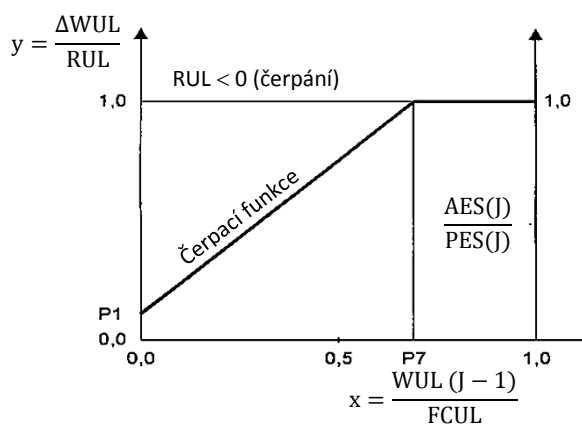
$$SMDU(J) = FCUL(J) - WUL(J) \quad (2-5)$$

Jestliže $RUL(J) > 0$ (Sycení):

Lineární nebo nelineární rozdělení lokálních hodnot retenční vodní kapacity kolem jejich průměrné hodnoty $FCUL$ na povodí. Křivka rozdělení definuje část povodí, na kterém je již průměrné hodnoty $FCUL$ dosaženo a kde přebytek vody infiltruje do hlubších vrstev a zbývajících povodí, kde je další sycení aktivní (kořenové) zóny možné.

Jestliže $RUL(J) < 0$ (Čerpání):

Funkce čerpání je přímková pro aktivní (kořenovou) zónu, parabolická ($ALPHA$) pro celkovou nenasycenou zónu.

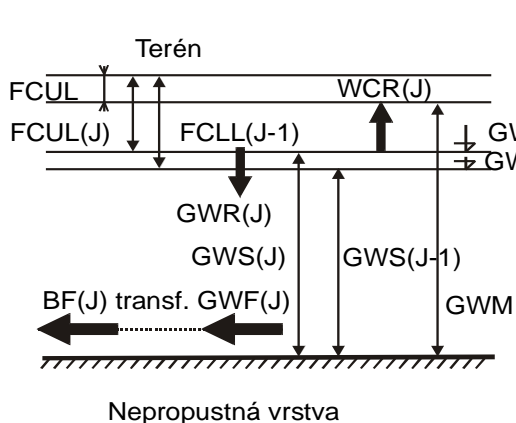


Obr. 2-3: Plocha povodí s aktivní zónou naplněnou po $FCUL$

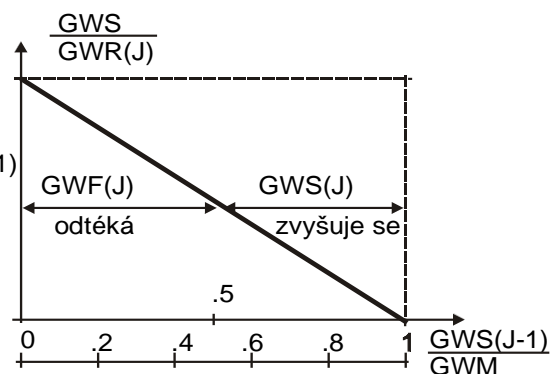
Obr. 2-4: Čerpání (výpar) aktivní zóny

Nасыčená zóna WBCM je řešena pouze rámcově tak, aby poskytovala mechanismus vytváření základního odtoku bez bilancování zásob podzemní vody (při absenci pozorovaných dat). Vstupem do ní je hluboká infiltrace (perkolace), která je výstupem z nenasycené zóny. Maximální akumulace nasycené oblasti je vyjádřena parametrem GWM , vyjadřujícím maximální nasycení zvodně.

Průběžná akumulace je doplňována perkolačním přítokem, prázdněna případným kapilárním vzlínáním a základním odtokem. Pro řešení průběžné **akumulace zvodně** bylo použito lineární pravděpodobnostní rozdělení kapacity zvodně v povodí tak, aby byla opět respektována její nehomogenita. Po výpočtu bilančních složek nenasycené zóny je modelem řešena skutečná evapotranspirace redukcí jejich potenciálních hodnot se zohledněním vlhkosti půdy v této zóně. Proces **transformace základního odtoku** je řešen alternativně buď lineárně, nebo nelineárně. Celkový odtok je získán superpozicí přímého základního odtoku (viz schéma obrázek 2-5 a 2-6).



Obr. 2-5: Dynamika nasycené zóny



Obr. 2-6: Relativní plocha s nasycenou zónou GWM

Parametry *S*MAX, *G*WM a *B*K se optimalizují dle pozorovaných dat denních (nebo dekádních) odtoků.

Základem úspěšné implementace konceptuálních modelů hydrologické bilance je nalezení optimálních hodnot (nebo změn hodnot) parametrů modelu, tzv. **verifikace výsledků**. kritéria shody: Nash-Sutcliffe koeficient determinace (*Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1977*).

V testování hydrologických procesů, zejména potom při určování shody výsledků hydrologické bilance se používají v celosvětovém měřítku podle Světové meteorologické organizace (*WMO, 2008*) kritéria shody, vyhodnocení koeficientu determinace (*RE*): stavů hladiny podzemní vody v reprezentativním intersektu. Vzhledem k tomu, že v našem případě diskutujeme uplatnění „**konceptních modelů**“, je jasným kritériem shoda stavů hladiny podzemních vod v intersektu klimatických dat a vrtu podzemních vod.

Koeficient determinace *RE* (efficiency coefficient)

$$RE = 1 - \left(\frac{F}{F_o} \right) \quad (2-6)$$

kde:
$$F = \sum_{i=1}^N (GWT_i - GWTC_i)^2 \quad (2-7)$$

$$F_o = \sum_{i=1}^N (GWT_i - \overline{GWT})^2 \quad (2-8)$$

kde: GWT_i měřené pořadnice průtoku (m)

$GWTC_i$ vypočtené pořadnice průtoku (m)

\overline{GWT} aritmetický průměr měřených průtokových pořadnic (m)

N počet pořadnic průtoku (-)

i dekádní index (-)

Podle těchto kritérií je možno shodu měřené a vypočtené hladiny podzemních vod vyhodnotit následovně:

Tab. 2-4 Kritéria shody měřené a vypočtené hladiny podzemních vod transektu

RE	Shoda	
1,0 – 0,8	velmi dobrá	
0,8 – 0,7	dobrá	
0,7 – 0,6	použitelná	

Závěrem je možno říci, že čím nižší počet komparativních hodnot, tím menší přesnost a spolehlivost verifikační analýzy a rovněž méně účinná procedura optimalizace parametrů modelu.

Literatura:

Bultot, F.U., Dupriez, G.L., 1976: Conceptual hydrological model for an average – sized catchment area. Journal of Hydrology 29, No. 3 / 4

Hadaš, P., 2002: Globální a UV složka radiace pro libovolné expozice reliéfu vyšších poloh Moravskoslezských Beskyd - modelový výpočet. Beskydy, 15:31-38

Hadaš, P., 2004: Vláhová bilance ekosystému lužních lesů jižní Moravy v roce 2003. In: Rožnovský, J., Litschmann, T., (ed): "Extrémy počasí a podnebí", Brno, 11 března 2004, ISBN 80-86690-12-1

Hamon, W.R., (1982): Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. Publ. IAHS Hjelmfelt A. T. Jr., K. A., Burnwell R. E. (1982): Curve Numbers as Random Variables. Proc., Int. Symposium on Rainfall-Runoff Modelling, Water Resources Publication, Littleon, Colorado, 365-373

Janeček M. a kol., 2012: Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV nakladatelství, 201 str.

- Kovář P., Štibinger J. a kol., 2007 Modelování hydrologické bilance na experimentálním povodí Němčického potoka. Publikováno v: Kovář P., Štibinger J. a kol., 2007: Metodika návrhu výstavby optimálních protipovodňových a protierozních opatření (PPPO) pro zmírnění extrémních hydrologických jevů – povodní a sucha v krajině. Číslo grantu: NPV-MZe 2005. VRK1/TP3-DP6 (1G57040). Výroční zpráva 2007. ČZU v Praze
- Kovář P., Novotná J., Vaššová D., 2010a: Using a Water Balance Model for Hydro-restoration of Mining Pits. *Scientia Agriculturae Bohemica* 41/4: 206 - 212. ISSN 1211-3174
- Kovář, P. 1994: Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Doktorská disertační práce (DrSc.), ČZU v Praze
- Kovář, P.; Cudlín., P.; Šafář; 2004: J. Simulation of Hydrological Balance on Experimental Catchments Vseminka and Drevnice in the Extreme Periods 1992 and 1997. *Plant, Soil and Environment*. 50, č. 11, s. 478–483
- Kovář P., Vaššová D., 2010b: Impact of Arable Land to Grassland Conversion on the Vegetation-Period Water Balance of Small Agricultural Cathcment (Němčický Stream). *Soil and Water Research* 5, č. 4, s. 128–138
- Kulhavý, Z., Kovář, P. 2000: Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. VÚMOP Praha, ISBN 1211-3972, 123 str.
- Monteith, J. L., (1965): Evaporation and Environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. Proceedings Conference Experimental Biology, Cambridge University, Press, London 1965
- Morel-Seytoux H. J. 1982: Analytical results for prediction of variable rainfall infiltration. *Science Direct. Journal of Hydrology*, roč. 59, č. 3-4, s. 209–230
- Mottl W., 1983: Abschätzung der potentiellen Evapotranspiration aus Klimadaten und Verfleich verschiedener Berechnungsmethoden. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 35, 9/10: 247-254
- Penman H. L. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. In *proceedings Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193,1032:120-145
- Penman, H. L., 1963: *Vegetation and Hydrology*. Tech. Com. 53, C. Bureau of Soils, Harpenden, U.K.
- Pristley, C.H.B, Taylor, R.J., (1972): On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, Vol. 100, USA

- Rosenbrock, H. H., 1960: An automatic method for finding the greatest or least value of function. *Computer Journal* 3, 1960
- Turc, L. 1961: Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12:13–49
- US Soil Conservation Service (1986): *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55 (updated), USA
- US SCS, 1992: *Soil Conservation. Program Methodology*. Chapter 6.12: *Runoff Curve Numbers*, USA, 13 pp
- WMO, 2008: *Guide of Hydrometeorological Practices*, Vol. I. *Data Acquisition and Processing* 7th edition, No. 168, Geneva