

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra biotechnických úprav krajiny

Model KINFIL

Manuál

Pavel Kovář, Darina Vaššová

Praha, 2011

Anotace

Model KINFIL je určen pro stanovení návrhových průtoků ovlivněných antropogenní činností, jako např. změna kultur, odlesnění nebo urbanizace, a simulaci významných odtokových procesů.

1 Úvod

Model KINFIL je založen na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou (Overton, Meadows, 1976; Stephenson, Meadows, 1986; Beven, 1986, 2006). Osvědčil se na řadě experimentálních povodí při rekonstrukci historických povodňových případů a osvědčuje se, podobně jako ostatní modely kinematické vlny, v řadě případů simulace povrchového odtoku, způsobujícího erozi půdy (Kovář, 1992, 2000). Tento model používá fyzikálně-geometrické (fyziografické), hydraulické a klimatické parametry povodí, které se dají určit z mapových a jiných podkladů při absenci přímých pozorování a při zohlednění důsledků antropogenní činnosti v povodí (Morgan, Nearing, 2011). Model je určen přednostně pro stanovení návrhových průtoků pro různé „scénářové situace“ dané touto činností, jako je změna kultur, odlesnění, urbanizace aj. Současná verze modelu KINFIL je založena na infiltrační teorii Greena a Ampta se zavedením koncepce výtopy podle Meina a Larsona (1973) a Morel-Seytoux (Morel-Seytoux, Verdin, 1981; Morel-Seytoux, 1982):

$$K_s \left(\frac{z_f + H_f}{z_f} \right) = (\theta_s - \theta_i) \frac{dz_f}{dt}$$

$$S_f = (\theta_s - \theta_i) \cdot H_f$$

$$t_p = \frac{S_f}{i \cdot \left(\frac{i}{K_s} - 1 \right)}$$

kde K_s je nasycená hydraulická vodivost (m/s), z_f hloubka infiltrační fronty (m), θ_s nasycená půdní vlhkost (-), θ_i počáteční půdní vlhkost (-), H_f sací tlak pod infiltrační frontou (m), i intenzita deště (m/s), S_f retenční součinitel sacího tlaku (m), t_p doba výtopy (s) a t čas (s).

Základním úkolem je určení parametrů nasycené hydraulické vodivosti K_s a retenčního součinitele sacího tlaku S_f (při stavu polní vodní kapacity – PVK). Přímým řešením je na malých experimentálních plochách je měření těchto parametrů. Na větších povodích je to pak využití dříve odvozených vztahů mezi těmito parametry a hodnotami čísel odtokových křivek CN (Curve Number), dnes dobře propracované metody a ve světě široce používané (US SCS, 1972, 1986). Indexové hodnoty CN korespondují s konceptuálními hodnotami půdních parametrů K_s a S_f (PVK): $CN = f(K_s, S_f)$.

Druhým komponentem modelu KINFIL je jeho část simulující propagaci a transformaci přímého odtoku (Beven, 2006). Řešená parciální diferenciální rovnice popisuje neustálený pohyb, aproximovaný kinematickou vlnou (po zanedbání nevýznamných rychlostních členů dynamické St. Venantovy rovnice) po ploše různě uspořádaných a podle topografických podmínek různě skloněných rovinných desek:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \alpha m y^{m-1} \frac{\partial y}{\partial x} = i_e(t)$$

kde x, y, t jsou souřadnice délky, hloubky, času (m, m, s), α, m hydraulické parametry a $i_e(t)$ je intenzita efektivního deště (m/s).

Tato rovnice je převedena do tvaru konečných diferencí a řešena explicitním numerickým schématem. Pro praktické řešení je povodí geometrizováno rozdělením do tří komponent: kaskády desek, konvergentních a divergentních segmentů a úseků koryta toku tak, aby simulace topografických ploch povodí byla dostatečně reprezentativní. Počáteční podmínky řešení diferenčního schématu jsou zadány pro tzv. nulové hodnoty hloubek vody (tj. jestliže $y(x, 0) = 0$ pro všechny souřadnice polohy x). Horní okrajová podmínka je dána polohou každé rovinné desky v kaskádě, případně horní hranou segmentu. Pro soustředěné neustálené proudění v korytě bývá používáno submodelu Muskingum-Cunge (Cunge, 1969), jehož autoři zavedli zjednodušující předpoklady do rovnice kinematické vlny transformované korytem toku.

2 Infiltrační přístup

Řešení vychází z teorie Greena a Ampta v úpravě Morel-Seytoux, založené na výpočtu tzv. doby výtopy t_p . V rovnicích se uplatňují dva parametry:

- nasycená hydraulická vodivost K_s (m/s),
- retenční součinitel sacího tlaku S_f (m): $S_f = (\theta_s - \theta_i) \cdot H_f$, kde θ_s je vlhkost půdy při nasycení (-), θ_i počáteční vlhkost (-), θ_{FC} vlhkost při polní vodní kapacitě (-) a H_f sací tlak na infiltrační frontě.

Sorptivita půdy při polní vodní kapacitě (m/s^{0,5}) je pak dána vztahem:

$$S(\theta_{FC}) = \sqrt{2K_s \cdot S_f}$$

Z rovnice Greena a Ampta:

$$v_f = K_s \left[i + \frac{(\theta_s - \theta_i) \cdot H_f}{W} \right] \quad (1)$$

kde W je kumulativní infiltrace (m), a z teorie Meina a Larsona (1973) o stanovení doby výtopy byly Morel-Seytouxem odvozeny infiltrační rovnice (Morel-Seytoux, 1976). Pro dešť o konstantní intenzitě se kumulativní infiltrace W v čase t , $t_p < t < t_D$, vypočítá ze vztahu:

$$W = W_p + S(\theta_i) \cdot AR \left[\sqrt{t - t_p + \frac{t_p}{2}(AR)^3} - \sqrt{\frac{t_p}{2}(AR)^3} \right] + K_s (t - t_p)$$

kde

$$AR = \frac{i_+}{i_+ - 1}, \quad i_+ = \frac{i}{K_s}, \quad W_p = i \cdot t_p .$$

Počátek výtopy ($t = t_p$) pro dešť s konstantní intenzitou se stanoví z podmínek (Mein, Larson, 1973) $\theta_i \rightarrow \theta_s$ a $v_f = i$. Kumulativní infiltrace v době výtopy t_p je pak:

$$W_p = v_f \cdot t_p = i_p \cdot t_p$$

kde i_p je intenzita deště v době výtopy (pro dešť s konstantní intenzitou $i_p = i$).

Obdobně pro případ deště s proměnlivou intenzitou platí:

$$W = W_p + S(W_p, \theta_i) + \left[\sqrt{t - t_p + BR} - \sqrt{BR} \right] + K_s (t - t_p)$$

kde

$$S(W_p, \theta_i) = \sqrt{\frac{2K_s(S_f + W_p)^2}{S_f}}, \quad BR = \frac{1}{2} \frac{(S_f + W_p)^2}{K_s S_f \left(\frac{i_p}{K_s} - 1 \right)^2}$$

3 Transformace přímého odtoku

Model kinematické vlny je model s rozdělenými parametry (distributed model), je možné ho použít na různých geometrických útvarech, jako:

- kaskáda rovinných desek,
- konvergentní nebo divergentní segmenty,
- soustředěný odtok v úsecích říčních koryt.

Proudění vody po přímém nepropustném svahu simulovaného širokou rovinnou deskou (resp. konvergentním segmentem) je možné vyjádřit rovnicí kinematické vlny jako

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_e(t) \left(+ \frac{q}{L - x} \right)$$

$$q = \alpha \cdot y^m$$

kde q je průtok na jednotkovou šíři svahu (m^2/s), $i_e(t)$ je laterální přítok, neboli intenzita efektivního deště (m/s), α , m jsou hydraulické parametry, L je poloměr konvergentního segmentu, t a x jsou souřadnice času (s) a polohy (m). Spojením rovnic dostáváme

$$\frac{\partial y}{\partial t} + m\alpha y^{m-1} \frac{\partial y}{\partial x} = i_e(t) \left(+ \frac{\alpha y^m}{L - x} \right)$$

Soustředěný odtok v říčních korytech je řešen metodou Muskingum-Cunge (Cunge, 1969):

$$K \frac{d}{dt} [XQ_j + (1 - X)Q_{j+1}] = Q_j - Q_{j+1}$$

Model kinematické vlny podle explicitního numerického schématu má řešení (Lax, Wendroff, 1960) pro hloubky vodního proudu:

$$\begin{aligned} y_j^{i+1} &= y_j - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \cdot (\alpha y_{j+1}^m - \alpha y_{j-1}^m - 2\Delta x (i_e)_j) + \\ &+ \frac{(\Delta t)^2}{4(\Delta x)^2} \cdot (\alpha m y_{j+1}^{m-1} + \alpha m y_j^{m-1}) (\alpha y_{j+1}^m - \alpha y_j^m - \Delta x \cdot (i_e)_j) - \\ &- \frac{(\Delta t)^2}{4(\Delta x)^2} \cdot (\alpha m y_j^{m-1} + \alpha m y_{j-1}^{m-1}) (\alpha y_j^m - \alpha y_{j-1}^m - \Delta x \cdot (i_e)_j) + \\ &+ \frac{\Delta t}{2} [(i_e)_j^{i+1} - (i_e)_j] \end{aligned}$$

V této rovnici jsou všechny proměnné, které nejsou označeny horním indexem $i + 1$, považovány za probíhající v časovém kroku i ($i + \Delta t = t + \Delta t$). Dolní index j označuje plošný krok x ($j + \Delta x = x + \Delta x$).

Numerická stabilita řešení je zajištěna, pokud pro časový a polohový krok platí:

$$c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

kde pro desku

$$c = m \cdot y^{m-1}$$

Kromě řešení náslepných hloubek y_j^{i+1} řeší model KINFIL i ostatní proměnné procesu tvorby a transformace povrchového odtoku, především hydraulické rychlosti v_j^i :

$$v_j^i = \alpha_j \cdot (y_j^i)^{m_j-1}$$

dále třecí rychlosti $(v_*)_j^i$:

$$(v_*)_j^i = \sqrt{g \cdot Y_j \cdot y_j^i}$$

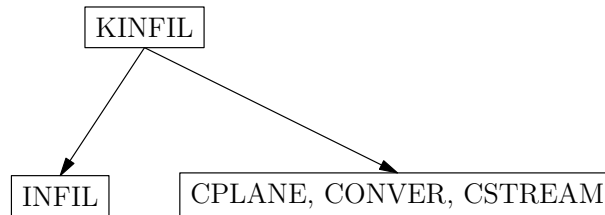
a tangenciální napětí τ_j^i :

$$\tau_j^i = \rho \cdot g \cdot Y_j \cdot y_j^i$$

kde α_j , m_j jsou hydraulické parametry, Y_j sklon pozemku (-), g gravitační zrychlení (m/s^2) a ρ hustota vody (kg/m^3).

4 Struktura modelu KINFIL

Model KINFIL se skládá ze dvou základních částí:

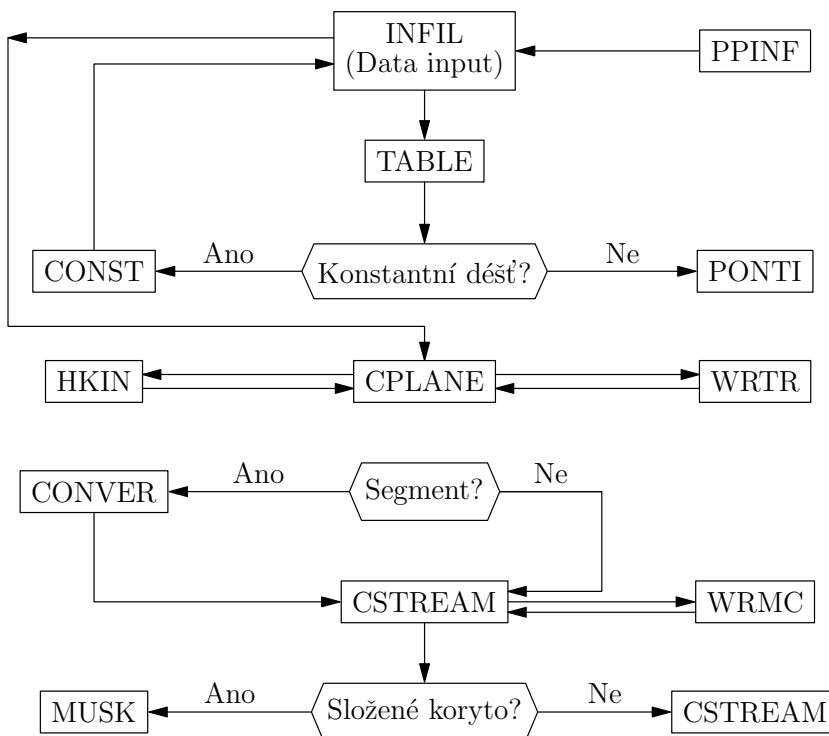


První část modelu je infiltrační submodel INFIL (celistvý modul), obsahující řešení infiltračního procesu, založeného na teorii Greena a Ampta, jak je výše popsáno. Součástí řešení je nalezení ekvivalence $CN = f(K_s, S_f)$. Dílčí podprogramy části INFIL jsou:

- PONTI: výpočet doby výtopy,
- CONST: infiltrace z deště o konstantní intenzitě,
- PPFIND: infiltrace z deště o proměnlivé intenzitě,
- TABLE: přiřazení parametrů dle $CN = f(K_s, S_f)$.

Druhou částí je transformační submodel KIN, který řeší transformaci přímého odtoku. Procedura CPLANE je určena k simulaci odtoku po geometrizované kaskádě desek, procedura CONVER po segmentech, CSTREAM říční úseky. Pro řešení soustředěného odtoku po říčních úsecích s laterálními přítoky (CPLANE, CONVER) je možno alternativně řešit metodou Muskingum-Cunge, která je rovněž obsahem modelu KINFIL, jako samostatná procedura. Všechny tyto zmíněné procedury jsou vzájemně kompatibilní a tvoří submodel KIN. Přidružené pomocné procedury a funkce jsou:

- WRTR: pro tisk mezivýsledků CPLANE a CONVER,
- WRMC: pro tisk mezivýsledků CSTREAM,
- HKIN: pro řešení numerického schématu Lax-Wendroff.



Popsaný model KINFIL je typickým příkladem modelu simulačního typu, popisující významný srážko-odtokový případ a nikoliv empirický model erozního porcesu typu univerzální rovnice ztráty půdy (Wischmeier, Smith, 1978; Váška, 2000; Janeček et al., 2002).

Potřeba vstupních dat modelu je v následujících tabulkách, rozlišujících model KINFIL na část INFIL a část KIN. Popis parametrů i proměnných je stručně v tabulkách uveden. Vzory vstupních dat jsou poskytnuty v přílohách A a B, jednotlivé symboly v nich značí

- část INFIL:

SUBOPT1, 2, 3, 4	logické proměnné (0 nebo 1)
Q0	počáteční průtok (m^3/s)
KT	koeficient nasycené hydraulické vodivosti (mm/hod)
SO	koeficient sorptivity ($\text{mm}/\text{hod}^{0,5}$)
P	celková výška srážky (mm)
TD	doba trvání deště (hod)
CN	číslo odtokové křivky (není nutné)
N	počet pořadnic deště (-)
JJ	počet pořadnic hydrogramu (-)
DELT	délka časového kroku (hod)
RAIN(I)	výšky deště v časových krocích – pořadnice hyetogramu (mm)
FLAG	návěští zda pokračovat (1), nebo zastavit (0)

- část KIN:

NPL	počet soustav desek/segmentů (-)
PP	počet desek/segmentů v kaskádě jedné soustavy (-)
SLOPE	sklon svahu (-)
LENGTH	délka svahu (m)
WIDTH	šířka svahu (m)
OBST	překážka na svahu – relativně v desetinném zlomku záběru (-)
MAN	Manningova drsnost n (-)
FRIC	hydraulická turbulence (0.6)
TYPF	typ proudění (1.67)
DELT	délka časového kroku KIN (s)
TDELT	celková doba trvání případu (s)
NN	počet pořadnic efektivního deště (-)
EFF RAIN(I)	pořadnice efektivního deště z části INFIL (mm)
FLAG	návěští zda pokračovat (1), nebo zastavit (0)

Posledními dvěma přílohami jsou ukázky výstupu obou částí modelu KINFIL (INFIL a KIN).

Literatura

- BEVEN, K. J. (1986): Runoff production and flood frequency in catchments of order n : An alternative approach. In: Gupta, V. K. (ed.): *Scale Problems in Hydrology*. D. Riedel Publishing Comp., s. 107–131.
- BEVEN, K. J. (2006): *Rainfall–Runoff Modelling. The Primer*. John Willey & Sons, Chichester.
- JANEČEK, M., a kol. (2002): *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. ISV nakladatelství, Praha, ISBN 85866-85-8, 201 s.
- CUNGE, J. A. (1969): On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2): 205–230.

- KOVÁŘ, P. (1992): Možnosti stanovení návrhových průtoků na malých povodích modelem KINFIL. *Vodohospodářský časopis*, 40(2): 197–220.
- KOVÁŘ, P. (2000): *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích*. SIC ČZU, Praha.
- LAX, P. D., WENDROFF, B. (1960): System of Conservation Laws. *Communication on Pure and Applied Mathematics*, 13(2): 217–237.
- MEIN, R. G., LARSON, C. L. (1973): Modelling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9(2): 384–394.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. (1976): Derivation of equations for rainfall infiltration. *Journal of Hydrology*, 31: 203–219.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. (1982): Analytical results for prediction of variable rainfall infiltration. *Journal of Hydrology*, 59: 209–230.
- MOREL-SEYTOUX, H. J., VERDIN, J. P. (1981): *Extension of the Soil Conservation Service Rainfall–runoff methodology for ungauged watersheds*. Colorado State University.
- MORGAN, R. P. C., NEARING, M. A. (2011): *Handbook of Erosion Modelling*. Wiley & Blackwell, ISBN 978-1-4051-9010-7, 401 s.
- OVERTON, D. E., MEADOWS, M. E. (1976): *Stormwater Modelling*. Academic Press New York.
- US SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): *National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology*. Washington, D. C.
- US SOIL CONSERVATION SERVICE (1986): *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55 (updated), USA.
- STEPHENSON, D., MEADOWS, M. E. (1986): *Kinematic Hydrology and Modelling*. Elsevier.
- VÁŠKA, J. (2000): *Hydromeliorace*. ČKAIT, ISBN 80 86426-01-7, 220 s.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide Book to Conservation Planning*. Agrarian Handbook No. 537, US Dept. of Agriculture, Washington.

A Vzor vstupních dat – část INFIL

```
TREBSIN, Locality 6 23.7.2008 AREA=30 m2 DRY DT=1min maize (Info-hlavička)
0 0 0 0 (SUBPT1, 2, 3, 4)
0 (Q0)
7.84 15.21 16.10 0.250 80.00 (KT, SO, P, TD, CN)
15 20 0.0167 (N, JJ, DELT)
0.98 1.08 1.08 1.08 1.08 1.08 1.08 1.08 1.08 (RAIN(I), I=1,N)
1.08 1.08 1.08 1.08 1.08
1 (FLAG)
TREBSIN, Locality 6 23.7.2008 AREA=30 m2 WET DT=1min maize (dtto)
```



```

0 0 0 0
0
7.84      8.21      16.17      0.250      80.00
15 20 0.0167
0.05      1.08      1.08      1.08      1.08      1.08      1.08      1.08      1.08      1.08
1.08      1.08      1.08      1.08      1.08
0

```

B Vzor vstupních dat – část KIN

```

0.0 (Q0)
TREBSIN, Locality 6,23.7.2008,DT=1min,AREA=30m2,DRY,maize (Info-hlavička)
1 (NPL)
1 (PP)
0.128      10.0      3.0      0.0      0.10      0.6      1.67 (SLOPE,LENGHT,WIDTH,
OBST,MAN,FRIC,TYPF)
60.0      1200.0 (DELT,TDELT)
16 (NN)
0.000      0.000      0.016      0.147      0.296      0.384      0.444      0.487      0.521      0.549
0.571      0.591      0.607      0.621      0.634      0.645 (EFF RAIN(I), I=1,NN)
1 (FLAG)
TREBSIN, Locality 6,23.7.2008,DT=1min,AREA=30m2,WET,maize (dtto)
1
1
0.128      10.0      3.0      0.0      0.10      0.6      1.67
60.0      1200.0
16
0.000      0.176      0.421      0.554      0.619      0.660      0.688      0.710      0.727      0.740
0.752      0.762      0.770      0.777      0.784      0.790
0

```

C Výstup z části INFIL

T H E I N F I L T R A T I O N M O D E L

```

*****
THE KW-INFILTRATION MODEL COMPUTES NET RAINFALL FROM GROSS
RAIN USING MEIN-LARSON AND MOREL-SEYTOUX INFILTRATION EQS.

```

```

IF SUBOPT1=1, VARIABLE RAINFALL RATES IS USED
IF SUBPT1=0, CONSTANT RAINFALL IS USED
IF SUBPT2=0, USER INPUTS KT AND SFFC
IF SUBPT2=1, KT AND SFFC ARE COMPUTED FROM CN
IF SUBPT3=1, MEASURED DISCHARGES SHOULD BE READ
IF SUBPT4=0, EROSION PROGRAM IS IMPLEMENTED

```

NAME OF CATCHMENT:

```

TREBSIN, Locality 6 23.7.2008 AREA=30 m2 DRY DT=1min maize
*****
SUBOPT1= 0 SUBOPT2= 0 SUBOPT3= 0
SUBOPT4= 0

```

```

HYDRAULIC CONDUCTIVITY, KT = 7.840 MM/HR
SORPTIVITY, SO = 15.210 MM/HR**0.5

```

STORAGE SUCTION FACTOR, SFFC = 14.754 MM
 TOTAL PRECIP, P = 16.100 MM
 DURATION TIME,TD = .250 HR

OUTPUT OF SUBROUTINE CONST, CONSTANT RAINFALL
 BY INFILTRATION APPROACH

PONDING TIME TP= .032 HR

T(HR)	W(MM)	DELW(MM)	IR(MM/HR)	REMM(HR)	RER(MM/HR)
.032	2.045	2.045			
.017	.000	.000	.000	.980	.000
.033	2.149	.104	63.442	1.080	.016
.050	3.078	.928	55.578	1.080	.147
.067	3.857	.779	46.650	1.080	.296
.083	4.548	.691	41.401	1.080	.384
.100	5.180	.632	37.838	1.080	.444
.117	5.768	.588	35.215	1.080	.487
.134	6.322	.554	33.179	1.080	.521
.150	6.849	.527	31.539	1.080	.549
.167	7.353	.504	30.182	1.080	.571
.184	7.838	.485	29.034	1.080	.591
.200	8.306	.468	28.047	1.080	.607
.217	8.760	.454	27.186	1.080	.621
.234	9.201	.441	26.426	1.080	.634
.250	9.631	.430	25.750	1.080	.645
.267	.000	.000	.000	.000	.000

MASS BALANCE CHECK
 EXCESS PRECIP= 6.469 MM
 CUMULATIVE INFILTRATION= 9.631 MM
 RETENTION= .000 MM
 TOTAL PRECIP= 16.100 MM

NAME OF CATCHMENT:
 TREBSIN, Locality 6 23.7.2008 AREA=30 m2 WET DT=1min maize

 SUBOPT1= 0 SUBOPT2= 0 SUBOPT3= 0
 SUBOPT4= 0

HYDRAULIC CONDUCTIVITY, KT = 7.840 MM/HR
 SORPTIVITY, SO = 8.210 MM/HR**0.5
 STORAGE SUCTION FACTOR, SFFC = 4.299 MM
 TOTAL PRECIP, P = 16.170 MM
 DURATION TIME,TD = .250 HR

OUTPUT OF SUBROUTINE CONST, CONSTANT RAINFALL
 BY INFILTRATION APPROACH

PONDING TIME TP= .009 HR

T(HR)	W(MM)	DELW(MM)	IR(MM/HR)	R(MM/HR)	RER(MM/HR)
.009	.593	.593			
.017	1.001	.408	54.156	.050	.176
.033	1.660	.659	39.449	1.080	.421
.050	2.186	.527	31.527	1.080	.554
.067	2.648	.461	27.628	1.080	.619
.083	3.068	.421	25.189	1.080	.660

.100	3.460	.392	23.477	1.080	.688
.117	3.831	.371	22.189	1.080	.710
.134	4.185	.354	21.176	1.080	.727
.150	4.524	.340	20.351	1.080	.740
.167	4.853	.328	19.662	1.080	.752
.184	5.171	.319	19.076	1.080	.762
.200	5.481	.310	18.569	1.080	.770
.217	5.784	.303	18.126	1.080	.777
.234	6.080	.296	17.733	1.080	.784
.250	6.371	.290	17.382	1.080	.790
.267	.000	.000	.000	.000	.000

MASS BALANCE CHECK
EXCESS PRECIP= 9.799 MM
CUMULATIVE INFILTRATION= 6.371 MM
RETENTION= .000 MM
TOTAL PRECIP= 16.170 MM

D Výstup z části KIN

MODEL KINFIL: HYDRAULIC VARIABLES,
FINAL HYDROGRAPH

LEGEND:

H(J,I) ... Depth of water (m)
VE(J,I) ... Velocity of water flow (m/s)
TAU(J,I) ... Shear stress (Pa)
VSTAR(J,I) ... Shear velocity (m/s)

NAME OF CATCHMENT: TREBSIN,
Locality 6,23.7.2008,
DT=1min, AREA=30m2, DRY, maize

DESCRIPTION OF PLANES:

SLOPES(-)	LENGTHS(M)	WIDTHS(M)	MAN. ROUGHNESS	M-FLOWTYPE
.128	10.000	3.000	.1000	1.6700

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076	.0380	.1900	1.6700
-------	-------	-------	--------

PLANE 1 AT TIME 3

J= 1	T= 3					
H(J,I):	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
VE(J,I):	.0000	.0021	.0021	.0021	.0021	.0021
TAU(J,I):	.0000	.0193	.0193	.0193	.0193	.0193
VSTR(J,I):	.0000	.0044	.0044	.0044	.0044	.0044

1	3	.05	.000
---	---	-----	------

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076	.0380	.1900	1.6700
-------	-------	-------	--------

```

PLANE 1 AT TIME 4
J= 1 T= 4
  H(J,I): .0000 .0002 .0002 .0002 .0002 .0002
  VE(J,I): .0000 .0100 .0101 .0101 .0101 .0101
  TAU(J,I): .0000 .1937 .1972 .1972 .1972 .1972
  VSTR(J,I): .0000 .0139 .0140 .0140 .0140 .0140

```

```
-----
      2          4          .07          .000
-----
```

```
LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAUcr(Pa):
```

```
-----
      .0076      .0380      .1900      1.6700
-----
```

```

PLANE 1 AT TIME 5
J= 1 T= 5
  H(J,I): .0000 .0004 .0004 .0004 .0004 .0004
  VE(J,I): .0000 .0185 .0202 .0204 .0204 .0204
  TAU(J,I): .0000 .4856 .5557 .5613 .5614 .5614
  VSTR(J,I): .0000 .0220 .0236 .0237 .0237 .0237

```

```
-----
      3          5          .08          .000
-----
```

```
LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAUcr(Pa):
```

```
-----
      .0076      .0380      .1900      1.6700
-----
```

```

PLANE 1 AT TIME 6
J= 1 T= 6
  H(J,I): .0000 .0005 .0007 .0008 .0008 .0008
  VE(J,I): .0000 .0228 .0284 .0303 .0308 .0308
  TAU(J,I): .0000 .6641 .9184 1.0162 1.0371 1.0392
  VSTR(J,I): .0000 .0258 .0303 .0319 .0322 .0322

```

```
-----
      4          6          .10          .000
-----
```

```
LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAUcr(Pa):
```

```
-----
      .0076      .0380      .1900      1.6700
-----
```

```

PLANE 1 AT TIME 7
J= 1 T= 7
  H(J,I): .0000 .0006 .0009 .0011 .0012 .0012
  VE(J,I): .0000 .0245 .0319 .0366 .0393 .0405
  TAU(J,I): .0000 .7384 1.0931 1.3424 1.4978 1.5626
  VSTR(J,I): .0000 .0272 .0331 .0366 .0387 .0395

```

```
-----
      5          7          .12          .000
-----
```

```
LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAUcr(Pa):
```

```
-----
      .0076      .0380      .1900      1.6700
-----
```

```

PLANE 1 AT TIME 8
J= 1 T= 8
  H(J,I): .0000 .0006 .0009 .0012 .0014 .0015
  VE(J,I): .0000 .0255 .0334 .0390 .0433 .0464
  TAU(J,I): .0000 .7851 1.1742 1.4770 1.7256 1.9155

```

VSTR(J,I): .0000 .0280 .0343 .0384 .0415 .0438

6 8 .13 .000

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 9

J= 1 T= 9

H(J,I): .0000 .0007 .0010 .0012 .0015 .0017

VE(J,I): .0000 .0263 .0345 .0404 .0450 .0489

TAU(J,I): .0000 .8202 1.2315 1.5563 1.8326 2.0722

VSTR(J,I): .0000 .0286 .0351 .0395 .0428 .0455

7 9 .15 .000

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 10

J= 1 T= 10

H(J,I): .0000 .0007 .0010 .0013 .0015 .0017

VE(J,I): .0000 .0269 .0353 .0414 .0463 .0504

TAU(J,I): .0000 .8480 1.2761 1.6166 1.9086 2.1667

VSTR(J,I): .0000 .0291 .0357 .0402 .0437 .0465

8 10 .17 .000

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 11

J= 1 T= 11

H(J,I): .0000 .0007 .0010 .0013 .0016 .0018

VE(J,I): .0000 .0273 .0360 .0422 .0472 .0515

TAU(J,I): .0000 .8695 1.3107 1.6632 1.9669 2.2370

VSTR(J,I): .0000 .0295 .0362 .0408 .0443 .0473

9 11 .18 .000

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 12

J= 1 T= 12

H(J,I): .0000 .0007 .0011 .0014 .0016 .0018

VE(J,I): .0000 .0277 .0365 .0429 .0480 .0524

TAU(J,I): .0000 .8881 1.3399 1.7017 2.0145 2.2938

VSTR(J,I): .0000 .0298 .0366 .0413 .0449 .0479

10 12 .20 .000

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS TAU_{cr}(Pa):

```

-----
.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 13
J= 1 T= 13
H(J,I): .0000 .0007 .0011 .0014 .0016 .0019
VE(J,I): .0000 .0280 .0370 .0434 .0486 .0531
TAU(J,I): .0000 .9032 1.3638 1.7334 2.0534 2.3400
VSTR(J,I): .0000 .0301 .0369 .0416 .0453 .0484
-----
11 13 .22 .000

```

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

```

-----
.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 14
J= 1 T= 14
H(J,I): .0000 .0007 .0011 .0014 .0017 .0019
VE(J,I): .0000 .0283 .0373 .0438 .0491 .0536
TAU(J,I): .0000 .9160 1.3838 1.7599 2.0859 2.3784
VSTR(J,I): .0000 .0303 .0372 .0420 .0457 .0488
-----
12 14 .23 .000

```

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

```

-----
.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 15
J= 1 T= 15
H(J,I): .0000 .0007 .0011 .0014 .0017 .0019
VE(J,I): .0000 .0285 .0376 .0442 .0496 .0541
TAU(J,I): .0000 .9277 1.4018 1.7833 2.1144 2.4117
VSTR(J,I): .0000 .0305 .0374 .0422 .0460 .0491
-----
13 15 .25 .000

```

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

```

-----
.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 16
J= 1 T= 16
H(J,I): .0000 .0007 .0011 .0014 .0017 .0019
VE(J,I): .0000 .0287 .0379 .0446 .0500 .0546
TAU(J,I): .0000 .9376 1.4173 1.8036 2.1391 2.4406
VSTR(J,I): .0000 .0306 .0376 .0425 .0463 .0494
-----
14 16 .27 .000

```

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

```

-----
.0076 .0380 .1900 1.6700

PLANE 1 AT TIME 17
J= 1 T= 17

```

H(J,I):	.0000	.0003	.0006	.0009	.0012	.0014
VE(J,I):	.0000	.0170	.0261	.0332	.0391	.0441
TAU(J,I):	.0000	.4272	.8137	1.1640	1.4812	1.7735
VSTR(J,I):	.0000	.0207	.0285	.0341	.0385	.0421

15	17	.28	.000
----	----	-----	------

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

.0076	.0380	.1900	1.6700
-------	-------	-------	--------

PLANE 1 AT TIME 18
J= 1 T= 18

H(J,I):	.0000	.0002	.0004	.0006	.0008	.0010
VE(J,I):	.0000	.0109	.0183	.0246	.0301	.0350
TAU(J,I):	.0000	.2214	.4774	.7423	1.0037	1.2595
VSTR(J,I):	.0000	.0149	.0218	.0272	.0317	.0355

16	18	.30	.000
----	----	-----	------

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

.0076	.0380	.1900	1.6700
-------	-------	-------	--------

PLANE 1 AT TIME 19
J= 1 T= 19

H(J,I):	.0000	.0001	.0002	.0004	.0006	.0007
VE(J,I):	.0000	.0078	.0136	.0189	.0237	.0282
TAU(J,I):	.0000	.1331	.3067	.4995	.7016	.9098
VSTR(J,I):	.0000	.0115	.0175	.0223	.0265	.0302

17	19	.32	.000
----	----	-----	------

LIMITS FOR CRITICAL SHEAR STRESS τ_{cr} (Pa):

.0076	.0380	.1900	1.6700
-------	-------	-------	--------

PLANE 1 AT TIME 20
J= 1 T= 20

H(J,I):	.0000	.0001	.0002	.0003	.0004	.0005
VE(J,I):	.0000	.0059	.0107	.0150	.0192	.0231
TAU(J,I):	.0000	.0888	.2132	.3566	.5126	.6781
VSTR(J,I):	.0000	.0094	.0146	.0189	.0226	.0260

18	20	.33	.000
----	----	-----	------

THE OVERLAND FLOW HYDROGRAPH:

ORDIN.NO. TIME(HOURS) DISCHARGE Q (L/S)

1	.050	.000
2	.067	.005
3	.083	.027
4	.100	.076
5	.117	.151
6	.133	.212

7	.150	.242
8	.167	.261
9	.183	.275
10	.200	.287
11	.217	.297
12	.233	.305
13	.250	.312
14	.267	.318
15	.283	.187
16	.300	.105
17	.317	.061
18	.333	.037

THE MASS BALANCE CHECK:

TOTAL INFLOW DEPTH: 6.52 MM
TOTAL OUTFLOW DEPTH: 6.32 MM