

Využití modelu KINFIL pro hodnocení vlivu přírodních protierozních geotextilií na povrchový odtok

Using the KINFIL model to assess the impact of natural geotextiles on surface runoff

Jana Šimková

*Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129,
Praha 6 – Suchbátka, 165 21.*

Abstrakt

Příspěvek hodnotí možnosti využití modelu KINFIL pro simulaci vlivu přírodních protierozních geotextilií (GTX) na povrchový odtok, jeden z hlavních erozních činitelů. V laboratorních podmínkách byly na umělý svah o sklonu 7,2° instalovány vybrané přírodní GTX (jutové a kokosové) a za využití dešťového simulátoru *Norton Ladder Rainfall Simulator* vystaveny dešti o různých intenzitách a době trvání 15 minut. Závěry příspěvku vychází z porovnání srážko-odtokových dat měřených v laboratorních podmínkách s daty simulovanými modelem KINFIL. Výsledný hydrogram odtoku z modelu KINFIL tvarově odpovídal měřeným hodnotám. Počáteční dobu zdržení odtoku však model nezachytil.

Klíčová slova: přírodní protierozní síť, simulátor deště, eroze, hydrologické modelování, svahy

Abstract

This paper evaluates the suitability of the KINFIL model to simulate the impact of natural erosion geotextiles (GTX) on surface runoff, one of the main erosion factors. Under laboratory conditions, natural erosion control nets (jute and coir) were applied to an artificial 7.2 ° slope. Using the *Norton Ladder Rainfall Simulator*, the GTX were exposed to 15-minute rainfalls of various intensities. Conclusions of this paper are based on a comparison of rainfall-runoff data measured in the laboratory and data simulated by the KINFIL model. The final hydrograph of the KINFIL model matched the values of the measured data, in terms of the shape of the hydrograph. However, comparing the real and modelled data, the initial ponding time was not simulated at significant level.

Keywords: natural erosion control nets, rainfall simulator, erosion, hydrological modelling, slopes

Úvod

Geotextilie (dále jen GTX), přírodní či syntetické, slouží jako jeden z nástrojů protierozní ochrany téměř šedesát let (Dayte et Gore 1994, Mitchel et al. 2003). Strmé svahy provází především stavební praxi, konkrétně např. výstavbu dopravních cest (Mohammadkhan et al. 2001), kde absence vegetačního krytu na náspech a zářezech ještě zvyšuje riziko vodní a větrné eroze a následné zhroucení svahu (Rickson 1988).

Vývoj ukázal, že tradiční tvrdé metody stabilizace svahu, tzv. „grey solutions“ nejsou z dlouhodobého hlediska tak výhodné, jak se jim původně přisuzovalo. Důvodem jsou vysoké pořizovací náklady a v čase rostoucí náklady na údržbu. Naproti této variantě stojí bioengineering využívající přírodní materiály a vegetaci. Správně provedený zásah slibuje řešení, jehož stabilizační a protierozní efektivita s časem roste a náklady na údržbu klesají. A to až do stádia, kdy je svah ochráněn soběstačným vegetačním krytem, který je schopen reagovat na dynamiku prostředí, aniž by ztrácel své technické vlastnosti (Morgan et al. 1995). Kritické období zde představuje doba před dosažením plného vzrůstu vegetace. Ochranou funkci proto dočasně přebírají geotextilie (Luo et al. 2013).

Ačkoli trhu dominují umělé GTX, mají oproti přírodním GTX i své nevýhody, které zmiňují např. Fullen et al. (2007) nebo Ingold (1996). Z hlediska protierozní ochrany mají, i díky lepší přilnavosti k terénu, vyšší efekt GTX přírodní (Langford et Coleman 1996, Sutherland et Ziegler 1996). Bohužel není k dispozici mnoho údajů o vlastnostech přírodních GTX, které ovlivňují odtokové poměry a hlavním kritériem při výběru ze široké nabídky GTX se pak stává cena. Otázkou je, zda vyšší cena vždy odpovídá vyšší efektivitě protierozní ochrany.

Vliv GTX na ztrátu půdy a povrchový odtok ovlivňuje mnoho faktorů, které do obecné roviny shrnul Bhattacharyya et al. (2010). Měření srážko-odtokového procesu na přírodních svazích opatřených GTX je vždy zásadně ovlivněno půdním podkladem. Hodnocení vlivu samotné GTX tak může být zkresleno. Tento příspěvek popisuje část výsledků laboratorního pokusu, konkrétně využití modelu KINFIL, kdy byly vybrané GTX aplikovány na umělý svah pokrytý nepropustnou fólií. Díky tomuto opatření mohl být výsledný vliv na průběh odtoku přisuzován pouze samotné geotextilii.

Materiál a metody

Příspěvek popisuje výsledky srážko-odtokové simulace dešťovým simulátorem *Norton Rainfall Simulator* na umělém svahu o sklonu 7°, který byl ošetřen přírodními protierozními sítěmi. Konkrétně se jednalo o kokosovou síť JUTENON ECC 400 g.m² a 700 g.m² a jutovou

sít' JUTENON ECJ 500 g.m², které byly vstaveny srážce o intenzitě 27 mm.h⁻¹ a 158 mm.h⁻¹. Velikost oka pro uvedených sítí odpovídá 35x35 mm, 15x15 mm a 20x20 mm pro pořadí ECC 400, ECJ 500 a ECC 700).

Za kontrolní vzorek (standard) byla zvolena nepropustná plastová fólie.

Simulátor deště

Experiment proběhl v laboratoři Fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze. K simulaci deště byl využit dešťový simulátor *Norton Rainfall Simulator, US product*, vyvinutý Dr. Nortonem z USDA, Agricultural Reserach Service, Národní laboratoře pro výzkum půdy ve West Lafayette, USA (Obr. 1).



Obr. 1 Konstrukce dešťového simulátoru Norton v laboratoři Fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze.

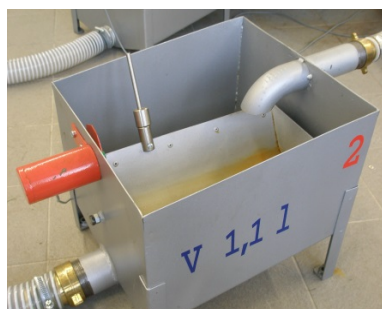
Základní jednotku simulátoru tvoří hliníkový rám o délce 5 m, šířce 0,76 m a hloubce 0,25 m (Obr. 1). Pro tvorbu dešťových kapek jsou u simulátoru použity trysky VeeJet 80100 (Spraying System Co.) s výkonem 14,75 l.min⁻¹. Vodní paprsek z trysek je plochý, rovnoběžný s podélnou osou simulátoru. Čtyři trysky jsou umístěny v sekci na hliníkovém rámu ve vzájemné vzdálenosti 1,37 m. Sekce s tryskami vykonává samostatně kývavý pohyb podél vodorovné osy a tím dochází k rovnoměrnému zadešťování plochy pod nimi. Tlak na tryskách 0,41 MPa a výška trysek 2,4 m nad povrchem žlabu zaručují podobné charakteristiky simulovaného deště, jako má déšť přirozený – střední velikost kapky 2,3 mm a srovnatelná kinetická energie (Meyer et McCune 1958). Intenzita deště se řídí frekvencí kyvů sekčního potrubí s tryskami, nastavuje se pomocí počítače. Při experimentech byly používány intenzity 27 a 158 mm.h⁻¹.

Konstrukce dešťového simulátoru je umístěna nad dvěma sklopnými žlaby s volitelným sklonem od 0° do 8°, každý o šířce 1,07 m, délce 5,09 m a hloubce 0,2 m (Obr. 2). Zadešťovaná plocha má rozměry 4,9 m na délku a 1,05 m na šířku. Měření přímého odtoku

ze žlabů je zajištěno mechanickými člunkovými překlápěcími průtokoměry (Obr. 3) s elektronickým záznamem četností překlopení.



Obr. 2 Simulátor deště Norton nad pokusnými žlaby.



Obr. 3 Mechanický překlápěcí člunkový průtokoměr.

Model KINFIL

Model KINFIL (Kovář et Vaššová 2011) je založen na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku “kinematickou vlnou” (Beven, 2006, Kovář et al. 2002, Overton et Meadows 1976, Stephenson et Meadows 1986), což se osvědčilo na řadě experimentálních povodí při rekonstrukci historických povodňových případů. Pro účely tohoto pokusu byl za modelované povodí zvolen umělý svah. 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. Model je určen přednostně pro stanovení návrhových průtoků pro různé “scénářové situace” dané touto činností, jako je změna kultur, odlesnění, urbanizace aj. (Kovář et Vaššová 2011). Současná verze modelu KINFIL je založena na infiltrační teorii Greena a Ampta se zavedením koncepce “výtopy” dle Morel-Seytoux (Morel-Seytoux et Verdin 1981).

$$K_s \left(\frac{z_f + H_f}{z_f} \right) = (\Theta_s - \Theta_i) \frac{dz_f}{dt} \quad (1)$$

$$S_f = (\Theta_s - \Theta_i) \cdot H_f \quad (2)$$

$$t_p = \frac{S_f}{i \left(\frac{i}{K_s} - 1 \right)} \quad (3)$$

kde :

K_s nasycená hydraulická vodivost ($m \cdot s^{-1}$)

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 ($m \cdot s^{-1}$)

S_f retenční součinitel sacího tlaku (m)

t_p doba výtopy (s)

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). Řešením je 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 1986).

Druhým komponentem modelu KINFIL je jeho část simulující transformaci přímého odtoku (Beven 2006, Stephenson et Meadows 1986). Řešená parciální diferenciální rovnice (4) popisuje neustálený pohyb, aproximovaný kinematickou vlnou (po zanedbání nevýznamných rychlostních členů dynamické St. Venantovy rovnice) po ploše různě uspořádaných a dle topografických podmínek různě skloněných rovinných „desek“.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \alpha m y^{m-1} \frac{\partial y}{\partial x} = i_e(t) \quad (4)$$

kde:

x, y, t ... souřadnice délky, hloubky, času (m, m, s)

α, m ... hydraulické parametry

$i_e(t)$... intenzita efektivního deště ($m \cdot s^{-1}$)

Tato rovnice je převedena do tvaru konečných diferencí a řešena explicitním numerickým schématem. Pro praktické řešení je povodí (zde svah) geometrizováno rozdělením do tří komponent: kaskády desek, konvergentních a divergentních segmentů a úseků koryta toku tak, aby simulace topografických ploch povodí byla dostatečně reprezentativní. V případě laboratorního pokusu bylo povodí reprezentováno jednou deskou. Počáteční podmínky řešení diferenčního schématu jsou zadány pro tzv. nulové hodnoty hloubek vody (tj. jestliže $h(x, 0) = 0$ pro všechny souřadnice polohy x).

Vliv přírodních protierozních sítí na povrchový odtok

Prvním krokem pokusu bylo měření kontrolního vzorku. Nepropustná fólie byla umístěna do žlabu a vystavena dešti o nižší intenzitě ($27 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) a době trvání 15 min. Pomocí stopek byla vizuálně měřena doba zdržení, tj. čas od začátku deště, kdy souvislý povrchový odtok dosáhl paty svahu (spodní hrany žlabu). V čase $t=15$ min bylo ukončeno zadešťování a zaznamenán objem odtoku. Nadále byl vizuálně měřen čas až do úplného ukončení povrchového odtoku („doba dotoku“).

Po ukončení měření kontrolního vzorku byl do žlabu přímo na nepropustnou fólii umístěn první vzorek sítě (Obr. 4). Při umísťování byl zachován postup aplikace GTX na svah. Role GTX byla umístěna do horní hrany žlabu, následně volně srolována dolů, bez napínání, a na okrajích upevněna proti posunu.



Obr. 4 Kokosová protierozní síť JUTENON ECC 700 umístěna do pokusného žlabu.

Postup měření odpovídal postupu u kontrolního vzorku. Pro zachování shodných počátečních podmínek byla vždy zaznamenána data až z druhého měření, tzn. z doby, kdy byl vzorek již nasycen vodou z předchozího deště (mokrý varianta). Při prvním měření by byla

doba zdržení ovlivněna nasycováním suchého materiálu a k odtoku tak docházelo se zpožděním (suchá varianta). Aby bylo možné jednotlivá opakování (deset pro každou variantu, tj. celkem 40 měření) mezi sebou srovnávat, byla zpracována jen data z mokré varianty. K druhému opakování měření vzorku došlo vždy po ukončení odtoku z předchozího deště. Po skončení měření nižší intenzity byl celý postup zopakován pro intenzitu vyšší (158 mm.h⁻¹). Celkem tedy proběhlo měření každého vzorku (kontrolní nepropustná fólie, ECC 400, ECJ 500 a ECC 700) s deseti opakováními pro dvě různé intenzity (27 a 158 mm.h⁻¹), tj. celkem 80 měření.

Vstup GTX do modelu KINFIL

Kromě parametrů svahu jsou základními vstupními veličinami do infiltrační části modelu KINFIL nasycená hydraulická vodivost (Ks), sorptivita (S) a následně hodnota CN křivky (CN). Díky nepropustnosti kontrolního vzorku se hodnoty Ks a S pokusného svahu blížily nule. Vliv GTX na tvorbu povrchového odtoku tak do výpočtu vstoupil přes hodnotu CN. Výpočet CN uvádí rovnice č. 5 (Janeček 1989). Hodnoty srážkového úhrnu a přímého odtoku byly získány přímým měřením.

$$CN = \frac{100}{1 + 0,02(H_s + 2H_0 - \sqrt{4H_0^2 + 5H_s * H_0})} \quad (5)$$

kde:

H₀ ... přímý odtok (mm)

H_s ... srážkový úhrn (mm)

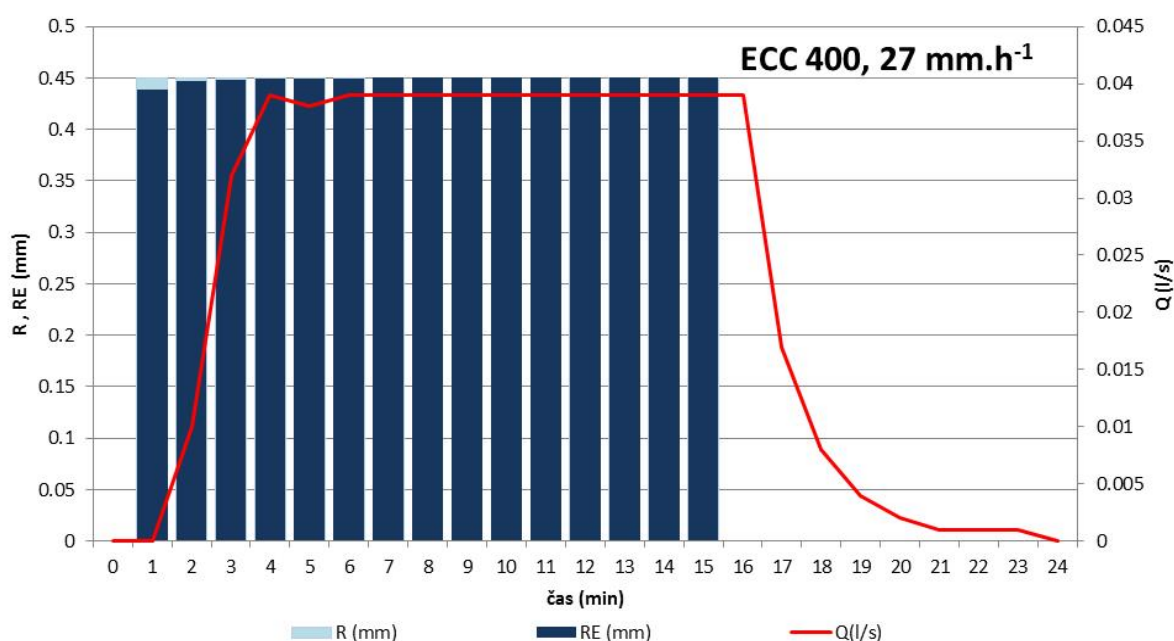
Výsledky

Výsledné hodnoty CN křivek pro jednotlivé GTX (tab. 1) byly značně ovlivněny intenzitou srážky. Při intenzitě 2 (158 mm.h⁻¹) měly geotextilie o 6 - 7% vyšší vliv na hodnotu CN, než v případě nižší intenzity 1 (27 mm.h⁻¹). Ze srovnání vzorků textilií vyplývá, že při nižší intenzitě deště je vliv na CN srovnatelný. Při vyšší intenzitě deště rozdíl narůstá, ovšem rozložení efektivity mezi textiliemi zůstává stejné – největší efekt má jutová síť JUTENON ECJ 500.

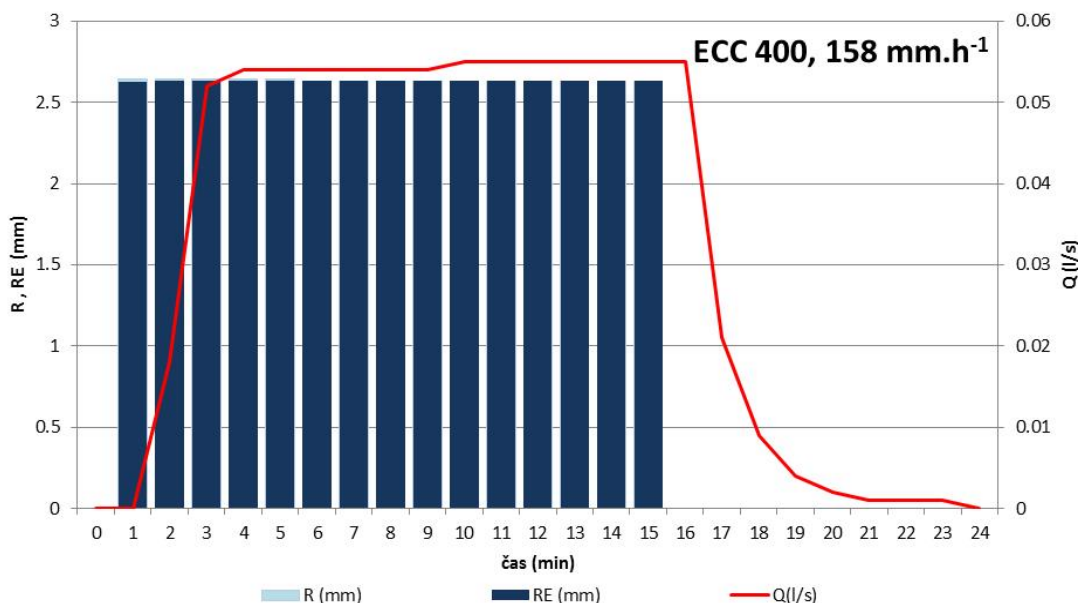
hodnota CN				
	standard	ECC 400	ECJ 500	ECC 700
Intenzita 1	100	99.23	99.43	99.18
Intenzita 2	100	93.96	93.00	93.67

Tab. 1 Hodnoty CN křivek pro jednotlivé vzorky a intenzity. Intenzita 1 - 27 mm.h^{-1} , Intenzita 2 - 158 mm.h^{-1} .

Hydrogram odtoku simulovaný modelem KINFIL pro kokosovou síť ECC 700, při nižší intenzitě, zachycuje obrázek 5. Stejný hydrogram pro vyšší intenzitu pak ukazuje obrázek 6.



Obr. 5 Hydrogram odtoku simulovaný modelem KINFIL pro síť ECC 700, při dešti o době trvání 15 min a intenzitě 27 mm.h^{-1} . R – příchinný déšť (mm), RE – efektivní déšť (mm), Q – odtok (l.s^{-1}).



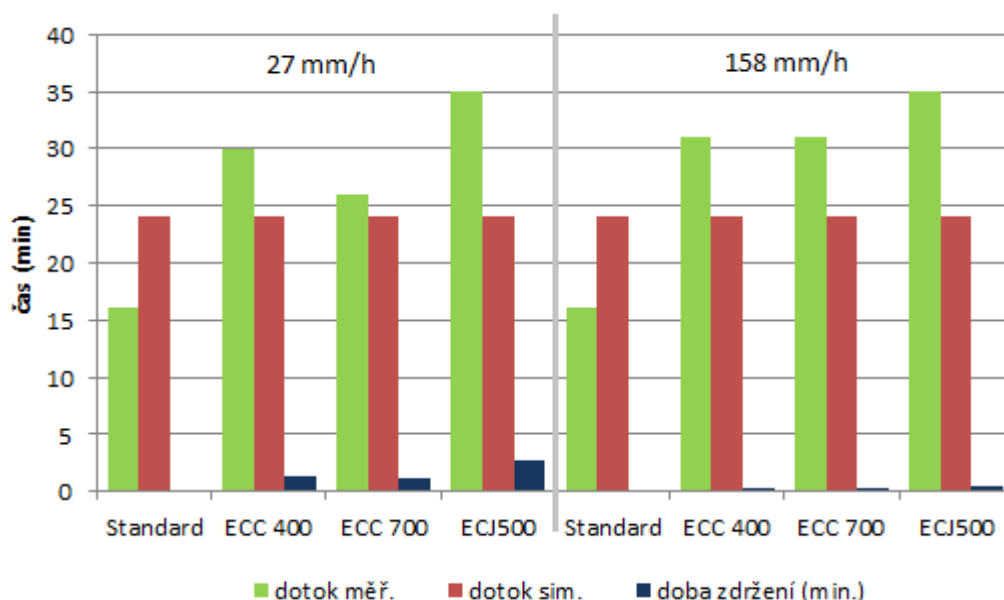
Obr. 6 Hydrogram odtoku simulovaný modelem KINFIL pro síť ECC 700, při dešti o době trvání 15 min a intenzitě 27 mm.h^{-1} . R – příčinný déšť (mm), RE – efektivní déšť (mm), Q – odtok (l.s^{-1}).

Hydrogramy ostatních vzorků se od uvedených lišily minimálně, proto nejsou uvedeny.

Rozdíl mezi měřeními a simulovanými daty byl zaznamenán v době zdržení přímého odtoku a v době dotoku. Tabulka 2 ukazuje, že intenzita deště neměla na dobu dotoku vliv, hodnoty byly přibližně stejné. Rozdíl mezi měřeními a simulovanými hodnotami odpovídal 20-50 %. Měřené hodnoty doby zdržení uvádí rovněž tabulka 2. Simulované hodnoty se lišily v řádu sekund. Grafické zachycení rozdílu měřených a simulovaných hodnot doby dotoku ukazuje obrázek 7. Je vidět, že největší vliv na povrchový odtok má jutová síť, byť nemá nejvyšší plošnou hmotnost. Plošná hmotnost má zásadní vliv na cenu GTX. Zde se tedy ukazuje, že nejdražší (což je v tomto případě kokosová síť 700 g.m^2), neznamená nejefektivnější.

		dotok měř. (min)	dotok sim. (min)	doba zdržení měř. (min.)	doba zdržení sim. (min.)
Int. 1	Standard	16	24	0.2	1
	ECC 400	30	24	1.3	1
	ECC 700	26	24	1.1	1
	ECJ500	35	24	2.7	1
Int. 2	Standard	16	24	0.1	1
	ECC 400	31	24	0.3	1
	ECC 700	31	24	0.4	1
	ECJ500	35	24	0.5	1

Tab. 2 Rozdíly měřených a simulovaných hodnot dotoku (min) a doby zdržení (min) pro jednotlivé vzorky.



Obr. 7 Doba dotoku (“dotok”) simulovaná modelem KINFIL a měřená (min). Doba zdržení přímého odtoku (min)

Diskuze

Vhodnost využití modelu KINFIL pro účely hodnocení přírodních geotextilií závisí na hodnocené veličině. Vysoké procento rozdílu simulovaných a měřených hodnot doby dotoku by nemělo významně narušit využitelnost modelu KINFIL, jelikož poslední fáze odtoku se vykazovala jen extrémně malým odtokem, který již model KINFIL nezachytil. Větší důraz byl kladen na zachycení kulminace odtoku, která odpovídala skutečnosti a bývá hlavním hodnotícím kritériem.

Příčinou rozdílů v době zdržení byl časový krok o délce 1 minuty, který nedokázal zachytit nuance jednotlivých vzorků pohybující se v řádu sekund.

Závěr

Model KINFIL dokáže dostatečně spolehlivě simulovat průběh odtoku na umělém svahu ošetřeném přírodní protierozní sítí při minutovém časovém kroku. Vzhledem k tomu že doba zdržení u jednotlivých vzorků se lišila v řádu sekund, tj. hodnoty menší než zvolený časový krok, nebyly rozdíly modelem KINFIL zachyceny. Obdobný problém nastal v případě doby dotoku. V posledních minutách dosahoval odtok jen velmi nízkých hodnot, které model KINFIL vyhodnotil již jako nulové.

Má-li být model KINFIL využíván pro měření rozdílů geotextilií podobných vlastností, doporučuji časový krok kratší než jedna minuta.

Literatura

- Álvarez-Mozos, J., Abad, E., Giménez, R., Campo, M. A., Goñi, M., Arive, M., Casali, J., Díez, J., Diego, I., 2013: Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects of runoff and soil loss. *Catena*. 2013, XXX, pp. xxx-xxx. HTML!: *Catena* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.018>.
- Beven, K. J., 2006: *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. John Wiley and Sons, Chichester.
- Bhattacharyya, R., Smets, T., Fullen, M. A., Poesen, J., Booth, C. A., 2010: Effectiveness of geotextiles in reducing runoff and soil loss: A synthesis. *Catena* 81, 184 – 195.
- Dayte, K. R., Gore, V. N., 1994: Application of natural geotextiles and related products. *Geotextiles nad Geomembranes* 13, 371 – 388.
- Fullen, M. A., et al., 2007: Contributions of biogeotextiles to sustainable development and soil conservation in developing countries: the BORASSUS Project. *Ecosystems and Sustainable Development*. WIT Press, Southampton, UK, 123 – 141.
- Ingold, T. S., 1996: Market study. In: CFC/IJO. Technical specification and market study of potentially important jute geotextiles. Project Completion Report by Silsoe College. Cranfield University (Project Executing Agency).
- Janeček, M., 1989: Verifikace metody CN-křivek podle vztahu N-letých srážkových úhrnů k N-letým průtokům. *Vědecká práce VÚZZP* 6, 77 – 88.
- Kovář P., Vaššová D., 2011: *Model KINFIL – Manuál*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, pp. 16.

- Kovář P., Vaššová D., Janeček M., 2012: Surface runoff simulation to mitigate impact of soil erosion, case study Třebsín (Czech Republic). *Soil and Water Research* 7 (3), 85-96.
- Kovář, P., Cudlín, P., Heřman, M., Zemek, F; Korytář, F., 2002: Analysis of Flood Events on Small River Catchments Using the KINFIL Model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 50 (2), s. 157-171.
- Kovář, P., Vaššová, D., 2011: Model KINFIL, Manuál. ČZU v Praze, Praha, dostupné z: <http://fzp.czu.cz/vyzkum/software.html>, navštíveno 12. 8. 2013.
- Langford, R. L., Coleman, M. J., 1996: Biodegradable erosion control blankets prove effective on Iowa wildlife refuge. XXVII International Erosion Control Association Proceedings of Conference, Seattle, USA, pp. 13 – 20.
- Luo, H., Zhao, T., Dong, M., Peng, X., Guo, Y., Wang, Z., Liang, C., 2013: Field studies on the effect of three geotextiles on runoff and erosion of road slope in Beijing, China. *Catena* 109, 150 – 156.
- Mitchell, D. J., Barton, A. P., Fullen, M. A., Hocking, T. J., Zhi, Wu. Bo., Yi, Z., 2003: Field studies of the effect of jute geotextiles on runoff and erosion in Shropshire, UK. *Soil Use & Management* 19, 182 – 184.
- Mohammadkhan, S., Ahmadi, H., Mohammad, J., 2011: Relationship between soil erosion, slope, parent material, and distance to road. *Arabian Journal of Geosciences* 4, 331 – 338.
- 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. and Rickson, R. J. 1995: Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach. Morgan, R. P. C.; Rickson, R. J. Cranfield, UK: E & FN SPON, pp. 274.
- Overton, D. E., Meadows, M. E., 1976: Stormwater Modeling. Academic Press, New York.
- Rickson, R. J., 1988: The use of geotextiles in soil erosion control: comparison of performance on two soils. In: Rimwanich, S. (Ed.), Land Conservation for Future Generations Proceedings of Conference V. International Soil Conservation, January 18-29, Bangkok. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Bangkok, pp. 961-970.
- Shao, Q., Gu, W., Dai, Q., Makoto, S., Liu, Y., 2014: Effectiveness of geotextile mulches for slope restoration in semi-arid northern China. *Catena* 116, 1 – 9.
- Stephenson, D.; Meadows, M. E., 1986: Kinematic Hydrology and Modelling. Elsevier.

Sutherland, R. A., Ziegler, A. D., 1996: Geotextile effectiveness in reducing interill runoff and sediment flux. International Erosion Control Association Proceedings of Conference XXVI, 1995, Atlanta, USA, pp. 359 – 370.

US Soil Conservation Service, 1986: Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (updated), USA.

Poděkování

Príspevek popisuje výsledky grantového projektu IGA 2013 (20134230) „Výzkum podmínek protierozní ochrany extrémního odtoku na svazích v polních a laboratorních podmínkách“, poskytnutého Interní grantovou agenturou Fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze.

Kontakt:

Ing. Jana Šimková

Česká zemědělská univerzita v Praze

Kamýcká 129, Praha

+420 224 382 599, jsimkova@fzp.czu.cz