

Matematická analýza porúch spôsobených presakujúcou vodou do RÚ RaO v Mochovciach

Luboš Hruštinec¹ a Jozef Kuzma

Mathematical Analysis of Malfunctions Caused by Seepage Water to the Republic Radioactive Waste Dump in Mochovce

The storage of radioactive waste and the problem of assuring the low and medium radioactive waste is an actual interdisciplinary problem. An important factor influencing on a complex approach to solving these problems is also a creation of suitable technical conditions for its long-term storage. In this article we mathematically analyze an influence of the break covering and its effect on the long-term stability and reliable serviceability of the Republic radioactive waste dump in Mochovce.

Key words: hydraulic gradient, mathematical modeling, mal function, covering, infiltration, radioactive waste, filling, water, repository

Úvod

Uskladnenie rádioaktívnych odpadov a problematika zabezpečenia nízko a stredne aktívnych odpadov je vysoko aktuálna a predstavuje zložitý interdisciplinárny problém. Významným faktorom ovplyvňujúcim komplexný prístup k riešeniu týchto otázok je aj vytvorenie vhodných technických podmienok pre dlhodobé skladovanie týchto druhov odpadov. V predloženom príspevku je pomocou matematického modelovania analyzovaný vplyv porušenia prekrytia republikového úložiska rádioaktívnych odpadov RÚ RaO v Mochovciach a jeho účinok na jeho dlhodobú stabilitu a prevádzkovú schopnosť.

Po naplnení RÚ RaO v Mochovciach stredne a nízkorádioaktívnym odpadom bude vyhotovené jeho prekrytie vrstvou jemnozrnných (hlinitých a ílovitých) zemín, tesniacich fólií a geotextílií. Hlavnou funkciou prekrytia je zabezpečiť ochranu uloženého materiálu (vláknobetónové kontajnery v želozobetónových boxoch) pred klimatickými vplyvmi.

Fyzikálne vlastnosti zemín a umelých stavebných materiálov, ktoré budú zabudované do konštrukcie konečného prekrytia sú závislé na mnohých faktoroch. V prípade zemín nachádzajúcich sa v blízkosti povrchu terénu je to hlavne faktor účinku klimatických vplyvov, ktorý rozhodujúcou mierou bude ovplyvňovať funkčnosť a integritu prekrytia. Do skupiny problémov súvisiacich s klimatickými vplyvmi patria hlavne procesy spojené s premizáním, saturáciou, vysúšaním a celkovou eróziou povrchových vrstiev zemín prekrytia.

Presné popísanie zmeny vlastnosti materiálov použitých v konštrukcii konečného prekrytia v závislosti od uvedených vplyvov nie je možné pomocou jednoduchých závislostí. Úlohu komplikuje aj veľká nehomogenita prekrytia. Veľmi vhodnou a efektívnou metódou riešenia uvedeného problému je matematické modelovanie formou parametrickej štúdie, ktorá umožňuje vysokú variabilitu pri modelovaní konečných stavov pre rôzne okrajové podmienky úlohy a rôzne materiálové vlastnosti zemín. Z hľadiska reálnosti, resp. výstižnosti výsledkov prognózy so skutočným správaním sa konštrukcie je najdôležitejšou až rozhodujúcou, resp. nutnou požiadavkou v procese matematického modelovania rešpektovanie fyzikálnej podstaty riešenej úlohy. Preto výstižnosť a hodnovernosť výsledkov výpočtov (prognóz) je priamo závislá od zabezpečenia množstva a kvality vstupných údajov popisujúcich fyzikálnu podstatu sledovaných javov.

Pri optimálnom návrhu konštrukcie konečného prekrytia RÚ RaO v Mochovciach boli využité výsledky pomerne rozsiahlej štúdie, ktorá sa zaoberala možnými poruchami tesniacich vrstiev prekrytia a ich vplyvom na veľkosť priesakov do úložiska. Pri riešení problému bolo využité matematické modelovanie numerickou metódou konečných prvkov.

Návrh, konštrukcia a materiálové zloženie prekrytia

V rámci riešenia projektovej úlohy návrhu konštrukcie konečného prekrytia RÚ RaO boli navrhnuté dva varianty štruktúry prekrytia úložiska (variant II. C a II. D). Konštrukčné a materiálové zloženie navrhnutých štruktúr konečného prekrytia sú zobrazené na obr.1 a 2. Vo variante II. D je tesniaca ílovitá vrstva prekrytia homogénna (súvislá) o hrúbke 2,25 m. Pri variante II. C je štruktúra tesniacej vrstvy prekrytia nehomogénna (sendvičová) pozostávajúca z krycej (hornej) ílovitej vrstvy zeminy s hrúbkou 0,8 m, pod ktorou je drenážna vrstva (hrúbky 0,3 m). Pod drenážnou vrstvou sa nachádza tesniaca vrstva ílovitej zeminy s hrúbkou 1,0 m.

¹ Ing. Luboš Hruštinec, PhD., Doc. Ing. Jozef Kuzma, PhD., Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Tel.: +421 2 59274 678 ; +421 2 59274 679, hrustin@svf.stuba.sk; kuzma@svf.stuba.sk
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8. 1. 2007)

V procese matematického modelovania má na kvalitu dosiahnutých výsledkov rozhodujúci vplyv definovanie vstupov a okrajových podmienok výpočtov. Medzi najdôležitejšie vstupné údaje patria hlavne fyzikálne vlastnosti použitých materiálov v štruktúrach konečného prekrytia. Fyzikálne vlastnosti jednotlivých materiálov štruktúr prekrytia II. C a II. D, ktoré boli použité v modelových výpočtoch, sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Fyzikálne vlastnosti materiálov prekrytia RÚ RaO použité v modelových výpočtoch.
Tab. 1. Physical properties of materials used to model calculations of covering the Republic waste dump.

Názov materiálu	Fyzikálne vlastnosti				
	Tuhé (nekvapalné) materiály			Kvapalina	
	Objemová hmotnosť	Priepustnosť	Pórovitosť	Objemová hmotnosť	Viskozita
	ρ [kg.m ⁻³]	k [m.s ⁻¹]	n [-]	ρ [kg.m ⁻³]	μ [Pa.s ⁻¹]
Ílovitá zemina	2100,0	1,00E-09	0,48	-	-
Krycia vrstva zeminy	1800,0	1,00E-02	0,40	-	-
Piesčitý štrk	1850,0	1,00E-05	0,30	-	-
Geotextília (A)	133,0	2,00E-03	-	-	-
Geotextília (B)	100,0	3,50E-03	-	-	-
Železobetón a betón	2400,0	1,00E-08	0,05	-	-
Piesčitá hlina (nehomogenita v ílovitom tesnení)	1900,0	1,00E-06	0,35	-	-
Voda	-	-	-	1000,00	1002,0

Matematické modelovanie porúch konečného prekrytia

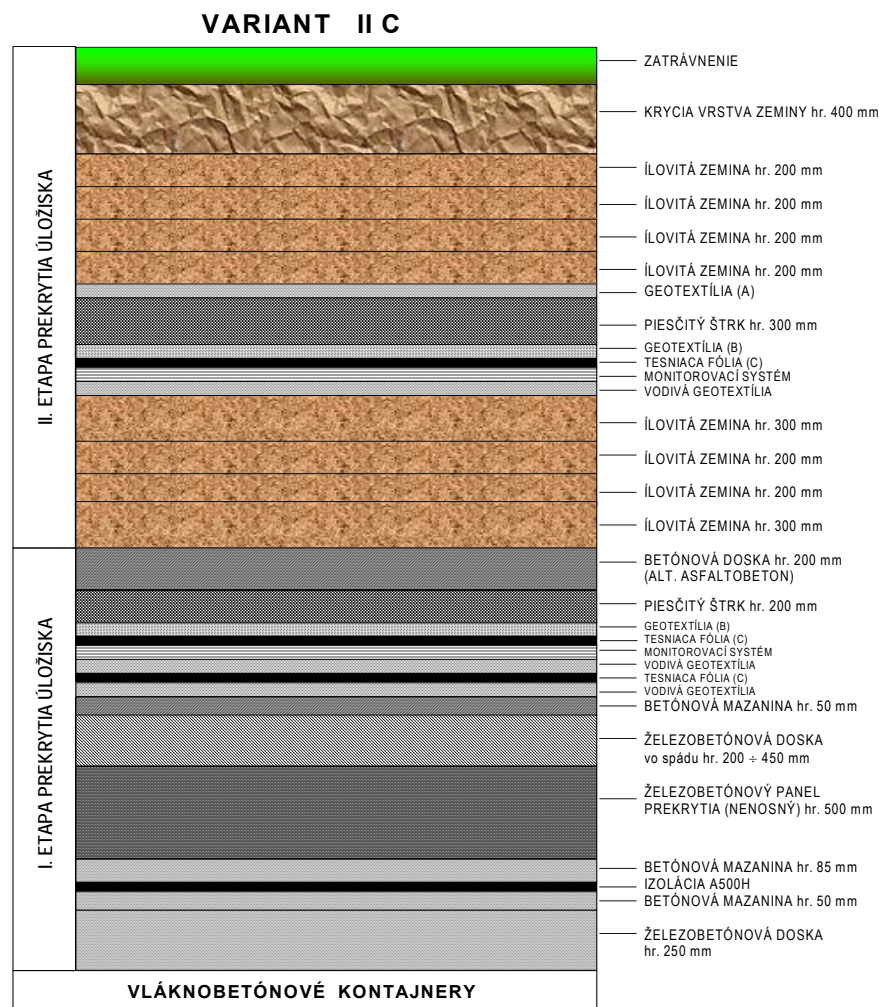
Nutnou požiadavkou pre tvorbu výpočtových modelov je zachovanie fyzikálnej podstaty riešených problémov. Geometrický tvar a materiálové zloženie je prevzaté z navrhovaných štruktúr konečného prekrytia, ktoré sú zobrazené a popísané na obr. 1 a 2.

Sériou modelových výpočtov bolo preukázané (Kuzma, Hruštinec, 2002), že z hľadiska hydraulického namáhania štruktúry prekrytia je záujmová oblasť ohraničená nepriepustnou tesniacou fóliou, nad ktorou sú umiestnené priepustné drenážne vrstvy (geotextília, štrkopiesok). Uvedená skutočnosť bola zohľadnená pri tvorbe riešených výpočtových modelov.

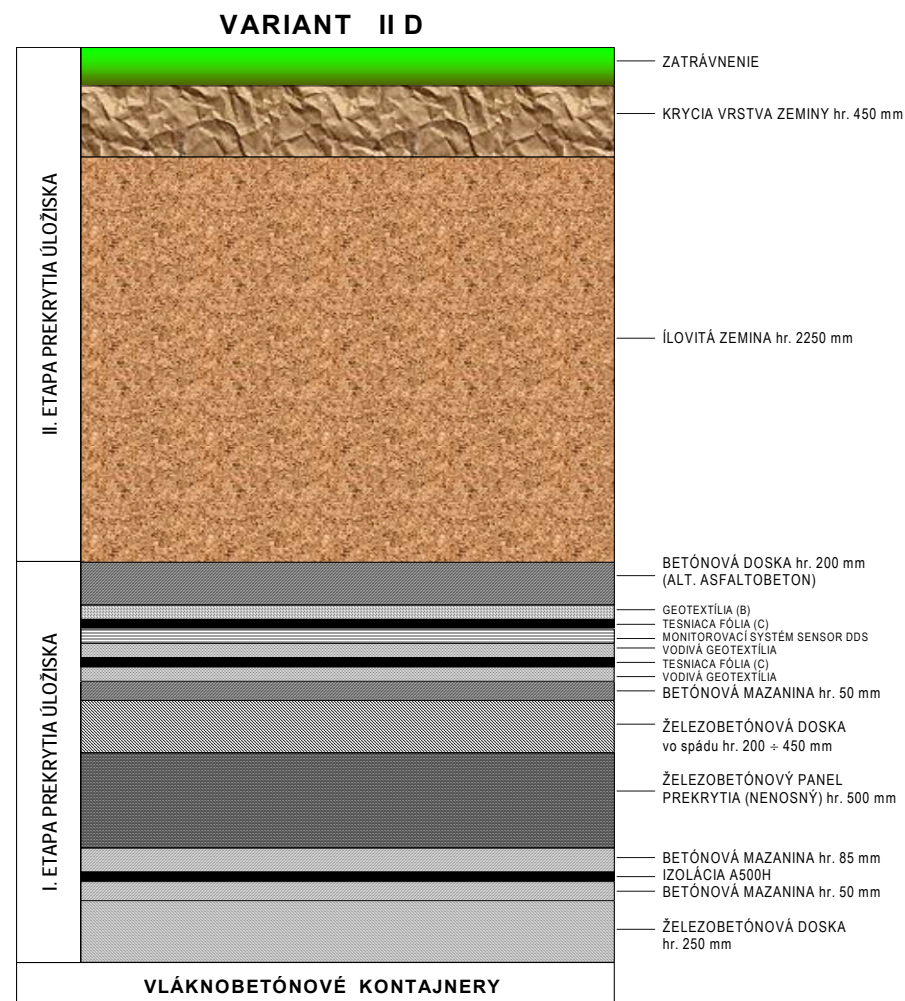
Pre komplexnejšiu analýzu tesniacich, filtračných a priesakových pomerov boli v ílovitom tesnení štruktúry prekrytia modelované poruchy integrity, t.j. trhliny a nehomogenity rôzne situované v ílovitom tesnení. Pre posudzované varianty II. C a II. D bolo definovaných nasledujúcich 11 výpočtových modelov:

1. *výpočtový model*: bez porušenia integrity štruktúry prekrytia,
2. *výpočtový model*: porušenie integrity zvislou trhlinou siahajúcou do polovice hrúbky ílovitého tesnenia,
3. *výpočtový model*: detto ako 2. výpočtový model s nehomogenitou z piesčitej hlíny s hrúbkou 100 mm nachádzajúcou sa v polovici trhliny,
4. *výpočtový model*: detto ako 2. výpočtový model s nehomogenitou z piesčitej hlíny s hrúbkou 100 mm nachádzajúcou sa na konci trhliny,
5. *výpočtový model*: porušenie ílovitého tesnenia zvislou trhlinou so zachovaním 200 mm neporušenej ílovej tesniacej vrstvy,
6. *výpočtový model*: detto ako 5. výpočtový model s nehomogenitou z piesčitej hlíny s hrúbkou 100 mm nachádzajúcou sa v polovici trhliny,
7. *výpočtový model*: detto ako 5. výpočtový model s nehomogenitou z piesčitej hlíny s hrúbkou 100 mm nachádzajúcou sa na konci trhliny,
8. *výpočtový model*: porušenie šikmou trhlinou (30° od vertikálnej osi) siahajúcou do polovice hrúbky ílovitého tesnenia,
9. *výpočtový model*: porušenie šikmou trhlinou (30° od vertikálnej osi) so zachovaním neporušenej ílovej tesniacej vrstvy hrúbky 200 mm,

10. *výpočtový model*: porušenie šikmou trhlinou (60° od vertikálnej osi) siahajúcou do polovice hrúbky ílovitého tesnenia,
 11. *výpočtový model*: porušenie šikmou trhlinou (60° od vertikálnej osi) so zachovaním neporušenej ílovitej tesniacej vrstvy hrúbky 200 mm.

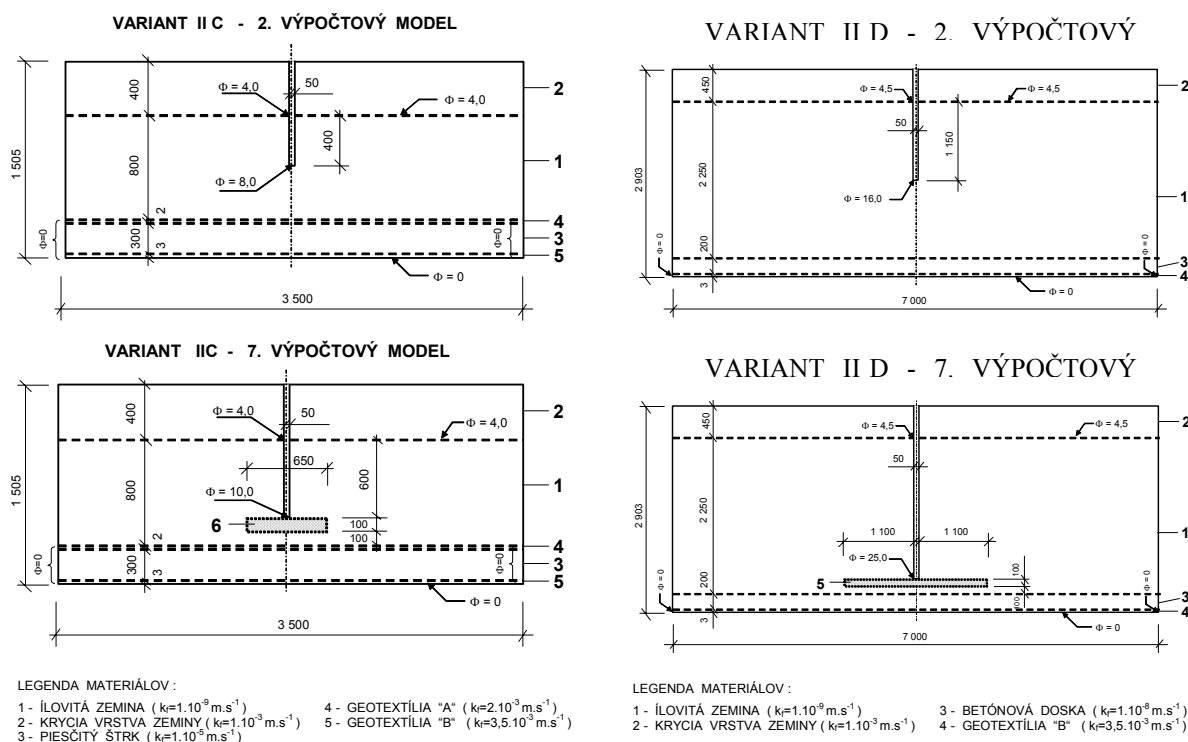


Obr. 1. Konštrukčné a materiálové zloženie štruktúry konečného prekrytia "Variant II. C".
 Fig. 1. Structural and material composition of the final covering "Version II. C".



Obr. 2. Konštrukčné a materiálové zloženie štruktúry konečného prekrytia "Variant II. D".
 Fig. 2. Structural and material composition of the final covering "Version II. D".

Schematické zobrazenie geometrických, materiálových a hydraulických (potenciálových) okrajových podmienok pre 2. a 7. výpočtový model je uvedené na obr. 3.



Obr. 3. Schematické zobrazenie geometrických, materiálových a hydraulických okrajových podmienok pre 2. a 7. výpočtový model štruktúry prekrytia variantov II. C a II. D.

Fig. 3. Schematic view of geometric, material and hydraulic boundary conditions for the 2nd and the 7th calculation model of the final covering composition for the version II. C and II. D.

Pre modelové výpočty bola zvolená okrajová podmienka hydraulického (tlakového) namáhania s veľkosťou potenciálu " Φ " pôsobiaceho na ílovitú tesniacu vrstvu, ktorý je rovný hydrostatickému tlaku vodou nasýtenej makropórovitej krycej vrstvy zeminy pri variante II. C s hrúbkou 0,40 m; t.j. potenciálu $\Phi = 4,0$ kPa., resp. pri variante II. D s hrúbkou 0,45 m; t.j. potenciálu $\Phi = 4,5$ kPa. Na spodnom okraji drenážnej vrstvy, resp. na kontakte s nepriepustnou tesniacou fóliou je potenciál nulový ($\Phi = 0,0$ kPa). Po výške trhliny je modelovaný nárast potenciálu rovnajúci sa veľkosti hydrostatického tlaku. Šírka výpočtových modelov II. C (3,5 m) a II. D (7,0 m) bola zvolená s ohľadom na priebeh šikmých trhlín v ílovej tesniacej vrstve a vplyv okrajových podmienok na výsledky modelových výpočtov.

Analýza výsledkov matematického modelovania

Výsledky modelových výpočtov poskytli komplexné informácie o rozdelení hydraulických potenciálov, veľkosti gradientov, rýchlosti prúdenia a priesakových pomeroch v posudzovaných štruktúrach prekrytia RÚ RaO. V prehľadnej tab. 2 (variant II. C) a 3 (variant II. D) sú uvedené vypočítané priesaky v drenážnej a ílovej vrstve prekrytia. Analýzou uvedených veličín boli získané cenné informácie o rozsahu prebiehajúcich filtračných procesoch v konštrukcii prekrytia a ich vplyve na sufózne a kolmatačné javy, ktoré môžu vzniknúť v oblasti kontaktov jednotlivých vrstiev.

Na základe zhodnotenia výsledkov vyhotoveného matematického modelovania porúch štruktúry konečného prekrytia RÚ RaO v Mochovciach je možné konštatovať, že:

- Výsledky modelových výpočtov jednoznačne preukázali, že z hľadiska veľkosti maximálnych gradientov, maximálnych priesakových rýchlostí ako aj veľkosti priesakov dosahujú pri variante II. D konštrukcie konečného prekrytia výrazne horšie výsledky. Sendvičový systém prekrytia v kombinácii s tesniacimi fóliami (variant II. C) je vhodnejší ako použitie jednej homogénnej tesniacej vrstvy zeminy (variant II. D). Nevýhodou konštrukcie definitívneho prekrytia pri variante II. D je aj skutočnosť, že nie je vybavená žiadnym monitorovacím systémom, ktorým je možné lokalizovať miesto poruchy.
- Pri variante II. C je presakovaná voda z 1. tesniacej vrstvy spoľahlivo odvedená do drenážneho systému a odtiaľ do recipientu. Pod hornou tesniacou vrstvou, ktorá môže byť teoreticky aj úplne zlikvidovaná, zostane aj naďalej neporušená 2. tesniaca vrstva, ktorá automaticky prevezme tesniacu funkciu

a ochranu pred vniknutím vody do železobetónových úložných boxov. Dokonca je možné zaviesť aj taký extrémny predpoklad, že ak horná tesniaca vrstva bude odstránená (napr. pri rekonštrukcii), potom tesniacu funkciu a ochranu RÚ RaO prevezme 2. tesniaca vrstva, ktorá zostáva aj naďalej neporušená a spoľahlivo zabráni vniknutiu vody do uzatvorených úložných boxov. Pri variante II. D nie je táto ochrana komplexne zabezpečená. To je zásadný rozdiel medzi konštrukčným riešením systému definitívneho prekrytia variantov II. C a II. D.

Tab. 2. Výsledky modelových výpočtov priesakov pre variantu II. C prekrytia RÚ RaO.
Tab. 2. Results of seepages of model calculations of covering the Republic waste dump for the version.

Variant štruktúry prekrytia	Označenie výpočtového modelu	Vyhodnotenie výsledkov modelových výpočtov								
		Maximálny hydraulický potenciál	Maximálne priesaky						Maximálny celkový priesak	
			v ílovitej vrstve			v drenážnej vrstve				
			vo vodorovnom smere	vo zvislom smere	celkové	vo vodorovnom smere	vo zvislom smere	celkové		
[kPa]	[m ³ · s ⁻¹]						[m ³ · s ⁻¹]	[l · deň ⁻¹]		
II C	1.	4,00	4,524E-13	5,001E-09	5,001E-09	1,195E-08	6,081E-09	1,195E-08	1,195E-08	1,03
	2.	8,00	4,057E-08	5,150E-08	5,150E-08	1,103E-08	1,271E-08	1,271E-08	5,150E-08	4,45
	3.	4,00	2,225E-08	2,141E-08	3,088E-08	1,087E-08	7,879E-09	1,087E-08	3,088E-08	2,67
	4.	8,00	3,317E-07	3,541E-07	4,253E-07	1,155E-08	2,518E-08	2,518E-08	4,253E-07	36,74
	5.	10,00	6,480E-08	8,855E-08	8,855E-08	1,245E-08	3,546E-08	3,546E-08	8,855E-08	7,65
	6.	5,00	4,003E-08	4,002E-08	5,002E-08	1,380E-08	1,939E-08	1,939E-08	5,002E-08	4,32
	7.	10,00	1,047E-06	1,133E-06	1,354E-06	5,646E-08	9,940E-08	1,015E-08	1,354E-06	116,99
	8.	8,00	4,420E-08	5,102E-08	5,102E-08	1,087E-08	1,302E-08	1,302E-08	5,102E-08	4,41
	9.	10,00	7,918E-08	8,935E-08	8,935E-08	1,338E-08	3,625E-08	3,625E-08	8,935E-08	7,72
	10.	8,00	4,955E-08	4,714E-08	5,200E-08	1,101E-08	1,423E-08	1,423E-08	5,200E-08	4,49
	11.	10,00	8,779E-08	8,478E-08	9,154E-08	1,555E-08	3,910E-08	3,910E-08	9,154E-08	7,91

Tab. 3. Výsledky modelových výpočtov priesakov pre variant II. D prekrytia RÚ RaO.
Tab. 3. Results of seepages of model calculations of covering the Republic waste dump for the version II. D.

Variant štruktúry prekrytia	Označenie výpočtového modelu	Vyhodnotenie výsledkov modelových výpočtov								
		Maximálny hydraulický potenciál	Maximálne priesaky						Maximálny celkový priesak	
			v ílovitej vrstve			v geotextílii				
			vo vodorovnom smere	vo zvislom smere	celkové	vo vodorovnom smere	vo zvislom smere	celkové		
[kPa]	[m ³ · s ⁻¹]						[m ³ · s ⁻¹]	[l · deň ⁻¹]		
II D	1.	4,50	6,610E-17	1,982E-09	1,982E-09	1,504E-10	2,507E-09	2,508E-09	1,982E-09	0,17
	2.	16,00	4,046E-08	5,817E-08	5,817E-08	1,662E-10	7,512E-09	7,512E-09	5,817E-08	5,03
	3.	8,00	2,860E-08	1,900E-08	2,860E-08	2,735E-10	5,356E-09	5,356E-09	2,860E-08	2,47
	4.	16,00	4,034E-07	3,946E-07	4,805E-07	1,841E-10	1,327E-08	1,327E-08	4,805E-07	41,51
	5.	25,00	1,047E-07	1,754E-07	1,754E-07	2,963E-10	6,649E-08	6,649E-08	1,754E-07	15,15
	6.	12,50	1,112E-07	8,480E-08	1,112E-07	1,055E-08	4,436E-08	4,436E-08	1,112E-07	9,61
	7.	25,00	3,802E-06	3,753E-06	4,552E-06	1,320E-09	2,046E-07	2,046E-07	4,552E-06	393,28
	8.	16,00	6,463E-08	5,798E-08	6,489E-08	2,367E-10	7,733E-09	7,733E-09	6,489E-08	5,61
	9.	25,00	1,904E-07	1,789E-07	1,924E-07	3,269E-10	6,842E-08	6,842E-08	1,924E-07	16,62
	10.	16,00	5,862E-08	5,034E-08	6,354E-08	2,332E-10	8,853E-09	8,853E-09	6,354E-08	5,49
	11.	25,00	1,721E-07	1,694E-07	1,816E-07	3,736E-10	7,675E-08	7,675E-08	1,816E-07	15,69

Záver

Výsledky matematického modelovania poskytli komplexný prehľad o vhodnosti jednotlivých variantov prekrytia RÚ RaO v Mochovciach z hľadiska ich hydraulického namáhania. Modelovaním porúch boli získané cenné informácie o predpokladoch vzniku sufózných a kolmatačných javov, ktoré môžu prebiehať na kontaktných plochách rôznych konštrukčných vrstiev prekrytia. Hodnoty tlakových potenciálov a rýchlostí najmä v kritických miestach konštrukcie sa premietnu v konečnej fáze aj do faktorov bezpečnosti a spoľahlivosti navrhnutých konštrukčných prvkov. Parametrickými výpočtami je možné vhodne vyjadriť vplyv zmeny okrajových podmienok na výsledné riešenie priestorového usporiadania prekrytia úložiska. Výsledky týchto riešení sa musia spätne premietnuť do stabilitných a deformačných výpočtov RÚ RaO v Mochovciach.

Súčasne bol získaný komplexný prehľad o rozdelení rýchlostí a potenciálov v tesniacich a drenážnych vrstvách prekrytia úložiska. Z hľadiska požiadaviek na celkovú spoľahlivosť konštrukcie prekrytia počas predpokladanej životnosti RÚ RaO v Mochovciach je vyhovujúca iba štruktúra prekrytia varianty II. C.

Filtračné problémy bude potrebné riešiť súčasne s deformačnými a stabilitnými otázkami, ktoré však budú predmetom ďalších analýz a výpočtov autorov. Vo výpočtoch bude potrebné zohľadniť aj celkové, definitívne dispozičné riešenie RÚ RaO v Mochovciach.

Predloženými výpočty a ich grafická interpretácia dokumentuje a demonštruje vhodnosť matematického modelovania pre riešenie problémov prekrytia RÚ RaO v Mochovciach. Táto metóda je aplikovateľná aj na riešenie iných podobných úloh včítane priestorového vyjadrenia priesakov cez tesniace vrstvy zeminy.

*Tento príspevok vznikol pri riešení grantovej úlohy
MŠ č. 1/2135/05*

Literatúra - References

Kuzma, J., Hruštinec, E.: Matematické modelovanie vytypovaných geotechnických problémov prekrytia RÚ RaO Mochovce. Bratislava 2002, 152 s.