

# Vliv parametrů retenční křivky na účinnost kapilární bariéry

BARBORA KRIJT, JIŘÍ MLS

**Klíčová slova:** kapilární bariéra – numerické modelování – retenční křivka – hydraulické charakteristiky – hystereze

## ABSTRAKT

Tato studie je zaměřena na výpočet parametru  $\alpha$  zvlhčovací větve retenční křivky a na vliv jeho hodnoty na účinnost kapilárních bariér. Kapilární bariéra je jednoduchou metodou odizolování skládek. Efektivita kapilárních bariér byla testována pomocí numerických modelů, které umožňují větší variabilitu testování oproti fyzikálnímu měření. Díky numerickým modelům bylo možné vyhodnocovat přímý vliv změny parametrů retenčních křivek na fungování kapilárních bariér. Do sestavování numerických modelů byla zahrnuta hystereze retenčních křivek a následně byl vyhodnocen její vliv na shodu výsledků modelů s měřenými daty. Numerické modelování je vhodným a spolehlivým nástrojem pro ověřování účinnosti kapilárních bariér. Vzhledem k citlivosti výsledků na parametry úlohy je zapotřebí určit co nej přesněji všechny nutné vstupní parametry, aby měl výsledný model reálnou vypovídací hodnotu.

## ÚVOD

Kapilární bariéra, případně v kombinaci s dalším objektem [1], je efektivním nástrojem využívaným při zakrývání skládek a k ochraně určité oblasti proti proniknutí podzemní vody. Její princip je založen na odlišných hydraulických vlastnostech dvou půdních vrstev, zpravidla různých písků nebo písku a štěrku. Jemnozrnější nadložní vrstva složená z jemně až střednězrného písku se nazývá kapilární vrstva. Spodní vrstva skládající se z hrubozrnějšího materiálu, obvykle střednězrného štěrku, se nazývá kapilární blok. Rozhraní mezi kapilární vrstvou a kapilárním blokem se označuje jako kapilární rozhraní. Hydraulická vodivost kapilární vrstvy je při určitých tlakových podmínkách vyšší než hydraulická vodivost kapilárního bloku. To platí pro nižší tlakové výšky, při nichž je kapilární blok téměř nepropustný. Díky tomu dochází k odtoku vody kapilární vrstvou spíše než k jejímu proniknutí do kapilárního bloku [2, 3]. V některých případech je pro zvýšení účinnosti nebo pro větší zabezpečení jednoduchá kapilární bariéra doplněna geotextilní vrstvou vloženou na kapilární rozhraní. Takto sestavené kapilární bariéry se nazývají kombinované [4, 5]. Kombinovaná bariéra se používá pro případ selhání jednoduché kapilární bariéry.

Evropská směrnice (*Směrnice Rady 1999/31/ES*) vyžaduje k pokrytí skládek odpadu třídy II použití dvou nezávislých komponent. To se zpravidla zajišťuje umělou a minerální vrstvou. Alternativou je užití umělého těsnění (geotextilie) v kombinaci s kapilární bariérou. V tomto případě se umělá vrstva může umístit nad nebo pod kapilární bariérou, TASI (německá zkratka pro *Technickou direktivu o komunálních skládkách – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen*) však doporučuje vložit umělé těsnění mezi kapilární blok a kapilární vrstvu. Takto vytvořená kombinovaná kapilární bariéra je ve srovnání s klasickým kombinovaným těsněním levnější,

konstrukčně výhodnější a méně náchylná k poškození konsolidací. Zůstává pouze požadavek minimálního sklonu [6–8, 1].

Základem matematického modelu proudění vody v obecně nenasycené zóně je Richardsova rovnice. Rovnice samotná ale nestačí, abychom správně formulovali problém; je třeba dodat dva konstituční vztahy, jimiž jsou hydraulická vodivost a retenční křivka. Vzhledem k tomu, že retenční křivku můžeme v jistém smyslu, tj. při zahrnutí hystereze, považovat za prostou funkci, máme dvě možnosti: difuzní a kapacitní formu Richardsovy rovnice. Většinou bývá vhodnější kapacitní forma, s níž budeme nadále pracovat.

Obecně není retenční křivka jednoduchou funkcí; pro vztah mezi tlakovou výškou a vlhkostí je charakteristická hystereze. Při navrhování a testování kapilárních bariér bývá hystereze zanedbána [4, 9], podrobnější studie však ukazují, že má nezanedbatelný vliv na jejich účinnost [10–13].

Experimentální stanovení retenční křivky není jednoduché; zpravidla se určuje pouze hlavní drenážní větve. Mnohem náročnější měření zvlhčovací větve nebývá k dispozici. Použijeme-li při modelování proudění drenážní větve retenční křivky, nadhodnotíme účinnost bariéry. Vzhledem k tomu, že k zatěžování kapilárního rozhraní – a k jeho případnému prolomení – dochází při vzrůstající vlhkosti v kapilární vrstvě, je správnější zahrnout do modelu hysterezi. Níže podrobně uvádíme, jakým způsobem jsme do použitých matematických modelů zvlhčovací větve implementovali.

Tato studie se zaměřuje na určení parametru  $\alpha$  pro zvlhčovací větve retenční křivky (ozn.  $\alpha^w$ ) a na jeho vliv na účinnost kapilárních bariér. Kromě standardně využívaného vztahu mezi parametry  $\alpha$  zvlhčovací a drenážní větve,  $\alpha^w = 2\alpha^d$  [14], bylo využito i analogie na základě výsledků měření drenážní i zvlhčovací větve retenční křivky, které provedla Trpkošová [15]. Výpočtem parametru  $\alpha^w$  se zabývali Likos et al. [16], když z výsledků experimentů se zvlhčovací větvi určili van Genuchtenovy parametry  $a$ ,  $m$  a  $n$ .

K testování efektivnosti kapilární bariéry při odlišných hodnotách parametru  $\alpha$  slouží numerické modelování. Vzhledem k náročnosti experimentálního testování kapilárních bariér se využívá opakovaně prokázané skutečnosti, že matematické modely jsou dostatečně účinné a přesné k tomu, aby spolehlivě simulovaly experimentální měření, viz např. [1, 17–20]. Pomocí separátních modelů pro hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve retenční křivky bylo dále možné vyhodnotit případný vliv hystereze na fungování kapilárních bariér.

## Hydromechanické charakteristiky prostředí

K numerickému modelování proudění vody v kapilárních bariérách užíváme kapacitní formu Richardsovy rovnice ve dvou prostorových proměnných. Využitými konstitučními vztahy jsou hydraulická vodivost  $K(h)$  a retenční křivka ve tvaru  $\theta(h)$ , kde  $h$  je tlaková výška a  $\theta$  je vlhkost.

Richardsova rovnice je pak vyjádřena následovně:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K(h) \frac{\partial}{\partial x_i} (h + x_2) \right) \quad (1)$$

kde:

$C(h) = \partial\theta / \partial h$ [L <sup>-1</sup> ]	je	kapacitní funkce
$t$ [T]		čas
$x_1, x_2$ [L]		kartézské souřadnice
osa $x_2$		orientována svisle vzhůru

Retenční křivka je rovnovážný konstituční vztah udávající hodnotu vlhkosti v závislosti na tlakové výšce. K jejímu vyjádření se obvykle využívá van Genuchtenův vztah [21]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (-ah)^n)^m} \quad \text{pro } h < 0 \quad \text{a} \quad \theta(h) = \theta_s \quad \text{pro } h \geq 0, \quad (2)$$

kde:

$\theta_r$ a $\theta_s$ [-]	jsou	reziduální a nasycená vlhkost
$a$ [L <sup>-1</sup> ], $m$ [-] a $n$ [-]		van Genuchtenovy parametry

Obecně platí  $a > 0$ ,  $m \in (1; 0)$  a  $n > 1$ . Zpravidla navíc předpokládáme  $m = 1 - 1/n$ . Pro stanovení těchto parametrů z měřených dat retenční křivky slouží program RETC [22].

V numerických simulacích prováděných v rámci této studie byl k vyjádření závislosti hydraulické vodivosti na tlakové výšce použit obvyklý distribuční model:

$$K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \left( \frac{1 - F(\theta)}{1 - F(\theta_s)} \right)^2} \quad [\text{LT}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

$$F(\theta) = \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^n \quad [-] \quad (4)$$

viz [23, 21].

Do kapacitní formy Richardsovy rovnice vstupuje hydraulická vodivost ve tvaru:

$$K(h) = \frac{K_s}{\sqrt{(1 + (-ah)^n)^m}} \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{(1 + (-ah)^n)^m} \right)^m \right)^2, \quad [\text{LT}^{-1}] \quad (5)$$

který dostaneme dosazením vhodné větve retenční křivky (2) do rovnice 3.

Průběh zvlhčování a průběh odvodňování nejsou dány jedinou funkcí. Obecná změna vlhkosti závisí na probíhajícímu procesu (rostoucí nebo klesající tlaková výška) a na hodnotách vlhkosti a tlakové výšky v bodech obratu; zavedení hystereze do matematického modelu proudění znamená ztrátu jednoznačnosti funkce  $\theta(h)$ . Jednoduchý, a přitom dostatečně spolehlivý model hystereze je prezentován v článku [24]. V modelu je využito zjednodušení  $\theta_r^d = \theta_r^w = \theta_r$ ,  $n^d = n^w = n$  a  $a^d < a^w$  [25]. Zde a dále horními indexy  $d$  a  $w$  označujeme drenážní a zvlhčovací větve. Autoři do rovnice 2 také zavádějí nenulovou

vstupní hodnotu vzduchu podle [26], vztah  $a^w = 2a^d$  a předpoklad, že během zvlhčovacích fází nedochází k uzavírání vzduchu v pórech, tj. že platí  $\theta_r^d = \theta_r^w = \theta_r$ . Drenážní, resp. zvlhčovací větve vyšších řádů retenční křivky pak dostávají jednoduchou lineární transformaci založenou pro daný bod obratu na rozdílu hodnot aktuální vlhkosti a vlhkosti dané hlavní drenážní větvi pro aktuální tlakovou výšku, resp. na rozdílu hodnot aktuální vlhkosti a vlhkosti dané hlavní zvlhčovací větvi pro aktuální tlakovou výšku. Pro potřeby tohoto článku je důležité, že navržená metoda dává v případě hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve nejen rozdílné vstupní hodnoty vzduchu, ale i rozdílné hodnoty tlakových výšek inflexního bodu obou větví.

V této studii považujeme retenční křivku za jednoznačnou funkci danou hlavní zvlhčovací větvi. To odpovídá výše uvedené skutečnosti, že kritickým procesem v kapilární bariéře je rostoucí tlaková výška. Protože v každé fázi reálného procesu je při dané hodnotě tlakových výšek vlhkost rovna nebo vyšší než vlhkost udávaná hlavní zvlhčovací větvi, může být hydraulická vodivost kapilární vrstvy daným zjednodušením poněkud podhodnocena, a tím může být podhodnocena i účinnost kapilární bariéry. Porovnání výsledků s experimenty, jež byly k dispozici, však ukazuje velmi dobrou shodu a potvrzuje spolehlivost použité metody. Toto zjištění je navíc v souladu se závěry uvedenými v publikaci [24].

## METODIKA

### Studované materiály a jejich parametry

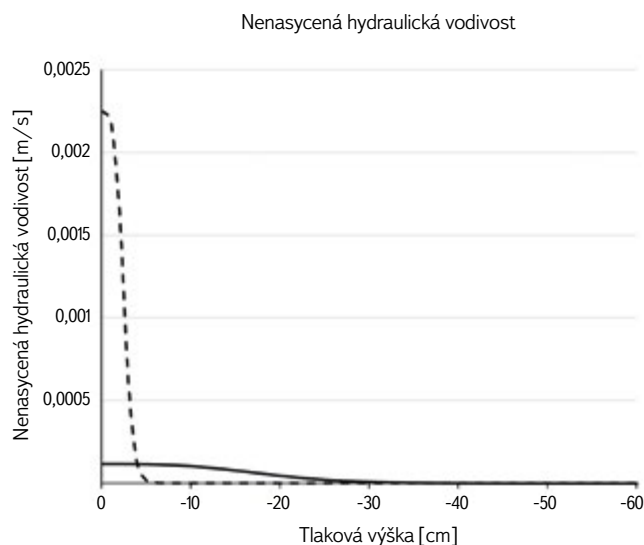
Pro účely této studie byla převzata jedna reálná, dobře zdokumentovaná kapilární bariéra, která slouží jako standard pro srovnání s dalšími variantami, a byl vygenerován jeden hypotetický materiál jako vhodná alternativní kapilární vrstva. Takto získané tři základní materiály, dvě různé kapilární vrstvy a jeden kapilární blok, pak byly využity k vytvoření několika možných variant hlavních zvlhčovacích větví (stále s možností srovnání s měřenou zvlhčovací větvi) generovaných podle pravidel uváděných v odborné literatuře. Výchozí materiály kapilární vrstvy a kapilárního bloku byly převzaty z dokumentace experimentálního testování kapilární bariéry provedeného na Ruhrské univerzitě v Bochumi [27] a laboratorního měření použitých materiálů provedeného na Přírodovědecké fakultě UK [1, 28]. Pro kapilární blok jde o homogenní materiál (dále označovaný  $B_0$ ) s velikostí zrn 2–8 mm. Podle Powersovy klasifikace [29] náleží do kategorie „slabě zaoblený“; částice mají dobře zaoblené hrany a hůře zaoblené vrcholy. Pro kapilární vrstvu se jedná o materiál (dále označovaný  $L_0$ ) vzniklý v říčním prostředí, z něhož byly vápnité části a větší zrna odstraněny. Podle Powersovy klasifikace náleží do kategorie zaoblený, částice mají zaoblené jak hrany, tak vrcholy.

Pomocí tenzní aparatury navržené podle Havlíčka a Myslivce [30] byly naměřeny drenážní i zvlhčovací větve retenčních křivek u obou materiálů. Díky tomu bylo možné získané charakteristiky použít pro porovnání numerických výsledků s výsledky laboratorních měření ve sklopném žlabu a následně, po potvrzení spolehlivosti numerických simulací, pro vyhodnocení vlivu hystereze při matematickém modelování kapilárních bariér. Hlavní drenážní, resp. hlavní zvlhčovací větve materiálu kapilární vrstvy označujeme nadále  $L_0^d$ , resp.  $L_0^w$ . Podobně hlavní drenážní větve a hlavní zvlhčovací větve kapilárního bloku označujeme  $B_0^d$  a  $B_0^w$ .

Pro další studium vlivu parametrů kapilární vrstvy na účinnost bariéry byl pomocí softwaru Rosetta [31] vygenerován vlastní materiál kapilární vrstvy označený  $L_1$  a definovaný souborem parametrů  $\theta_r$ ,  $\theta_s^d$ ,  $a^d$ ,  $n^d$  tak, aby těmito parametry určený materiál svými zrnitostními vlastnostmi odpovídal požadavkům na materiál kapilární vrstvy podle Píchy [2].

Nenasycená hydraulická vodivost testovaných materiálů byla určena pomocí vztahu (5), s nasycenou vodivostí  $K_s = 1,18 \times 10^{-4}$  m/s převzatou z materiálu  $L_0$ .

Hydraulické vodivosti materiálů  $L_1$  a  $B_1$  kapilární vrstvy a bloku odpovídající drenážním větvi retenčních křivek jsou uvedeny na obr. 1. V grafu je vidět, jak se obě funkce liší a jak se jejich rozdíl mění s měnící se tlakovou výškou.



Obr. 1. Nenasycená hydraulická vodivost kapilární bariéry. Křivky závislosti nenasycené hydraulické vodivosti na tlakové výšce pro kapilární vrstvu LD a kapilární blok BD. Data odpovídají drenážní větvi retenční křivky  
Fig. 1. Unsaturated hydraulic conductivity of the capillary barrier. The curve of dependence unsaturated hydraulic conductivity on the pressure head for capillary layer LD and capillary block BD. The data correspond to the drainage branch of the retention curve

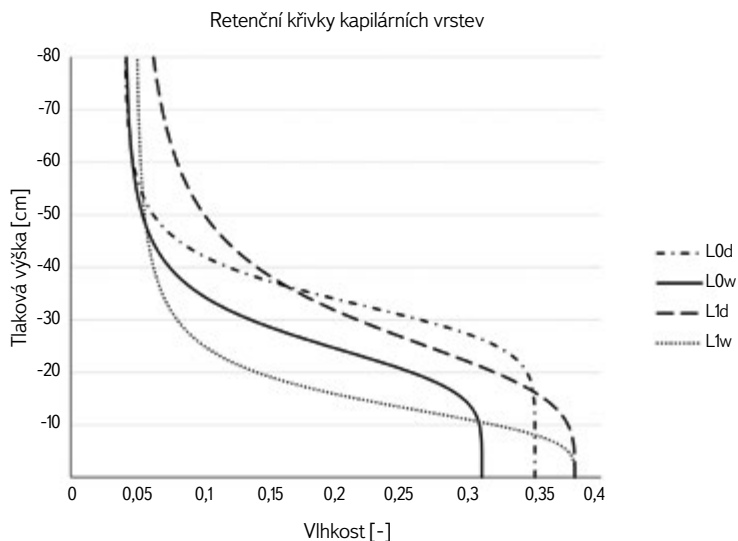
Vzhledem k tomu, že obecně nelze v matematickém modelu kapilární bariéry zanedbat hysterezi a pracovat pouze s hlavní drenážní větvi, věnujeme se v této studii podrobněji konstrukci hlavní zvlhčovací větve z obvykle měřených parametrů drenážní větve, konkrétně možnosti změny pouze parametru  $a$  [14, 24].

Obecně platí  $a^w > a^d$ . Byly posuzovány dva základní přístupy pro určení parametrů  $a^w$ . V prvním případě byly využity výsledky laboratorního měření z předchozích studií [11] a vyhodnocena vzájemná souvislost parametrů  $a$  zvlhčovací a drenážní větve retenční křivky. Z výsledků měření vyplývá přepočtový vztah  $a^w = 1,1a^d$  pro kapilární blok a  $a^w = 1,4a^d$  pro kapilární vrstvu. Dále byl zkoumán výše citovaný vztah  $a^w = 2a^d$  podle Scotta et al. [14].

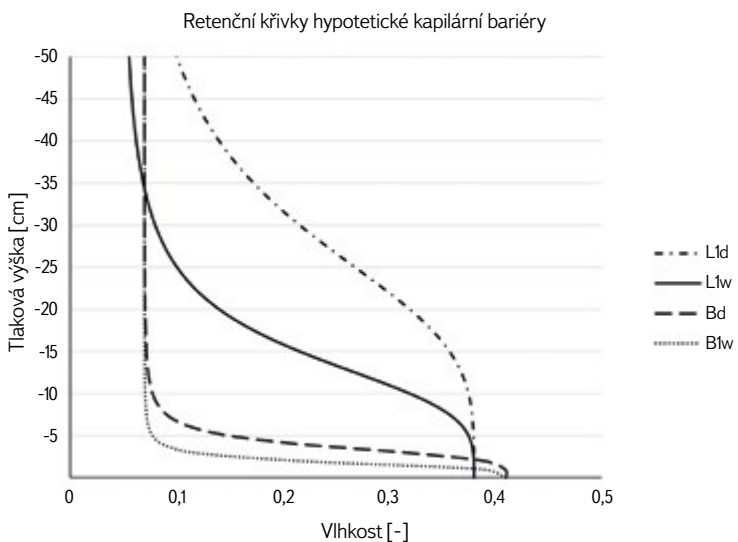
Vstupní parametry numerických modelů pro drenážní i zvlhčovací větve retenčních křivek studovaných materiálů kapilární bariéry jsou shrnuty v tab 1.

K získání parametrů  $a^w$  a  $n^w$  ze známých parametrů  $a^d$  a  $n^d$  jsme tedy zvolili zjednodušení  $n^d = n^w$  navržené ve studii Dohnala et al. [24], kde je porovnáním numerických simulací s experimentálním měřením potvrzena jeho dostatečná přesnost. Z uvedených dat vyplývá, že byly měněny pouze hodnoty parametru  $a$  pro zvlhčovací větve retenční křivky. Varianta č. 1 odpovídá použití vztahu  $a^w = 2a^d$  podle [14]. Pro variantu č. 2 byly využity přepočtové vztahy  $a^w = 1,4a^d$  pro kapilární vrstvu i blok. Ve variantě č. 3 byly uvažovány vztahy  $a^w = 1,4a^d$  pro kapilární vrstvu a  $a^w = 1,1a^d$  pro kapilární blok. Retenční křivky studovaných materiálů odpovídající zmíněným variantám parametru  $a^w$  kapilární vrstvy a kapilárního bloku bariéry jsou graficky znázorněny na obr. 2 a 3. Jsou v nich patrné rozdíly mezi drenážními a zvlhčovacími větvemi.

Na obr. 4 jsou pro srovnání vykresleny zvlhčovací větve retenční křivky kapilárního bloku podle změny parametru  $a^w$ .



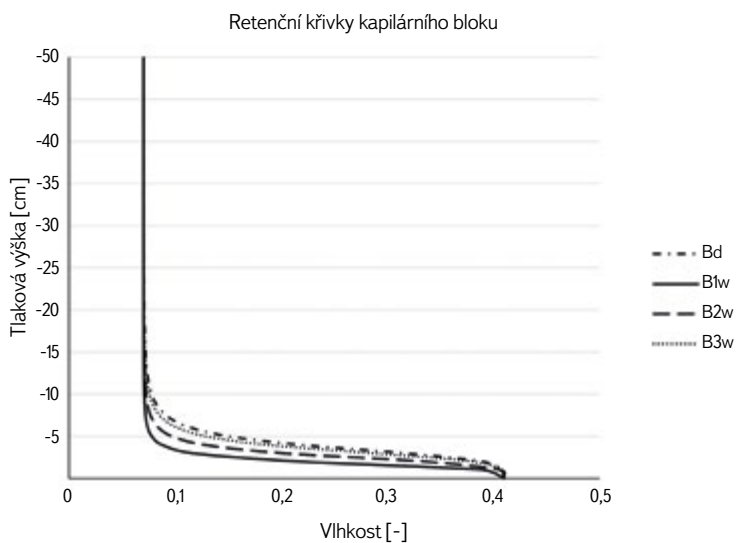
Obr. 2. Hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve retenčních křivek reálného ( $L_d$ ) a vygenerovaného ( $L_w$ ) materiálu kapilární vrstvy  
Fig. 2. Main drainage and main wetting branches of the retention curve of real ( $L_d$ ) and composed ( $L_w$ ) capillary-layer materials



Obr. 3. Hystereze retenčních křivek kapilární vrstvy a kapilárního bloku hypotetické kapilární bariéry. Křivky L1d a B1d znázorňují drenážní větve retenčních křivek kapilární vrstvy a kapilárního bloku, L1w a B1w zobrazují zvlhčovací větve retenční křivky kapilární vrstvy a kapilárního bloku  
Fig. 3. Retention curve hysteresis of capillary layer and capillary block of the hypothetical capillary barrier. Curves L1d and B1d represent the drainage branch of the retention curves of the capillary layer and the capillary block; L1w and B1w depict the wetting branch of the retention curves of the capillary layer and the capillary block

Tab. 1. Parametry testovaných materiálů  
Tab. 1. Parameters of the tested materials

	Ks [m/s]	$\Theta_r$	$\Theta_s^d$	$\Theta_s^w$	$\alpha^d$ [cm <sup>-1</sup> ]	$\alpha^w$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n^d$	$n^w$
L_0	1,18E-04	0,04	0,35	0,31	0,03	0,04	7,39	5,24
B_0	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,32	4,56	4,17
L_1	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,074	3,89	3,89
B_1	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,58	4,56	4,56
L_2	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,052	3,89	3,89
B_2	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,406	4,56	4,56
L_3	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,052	3,89	3,89
B_3	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,32	4,56	4,56



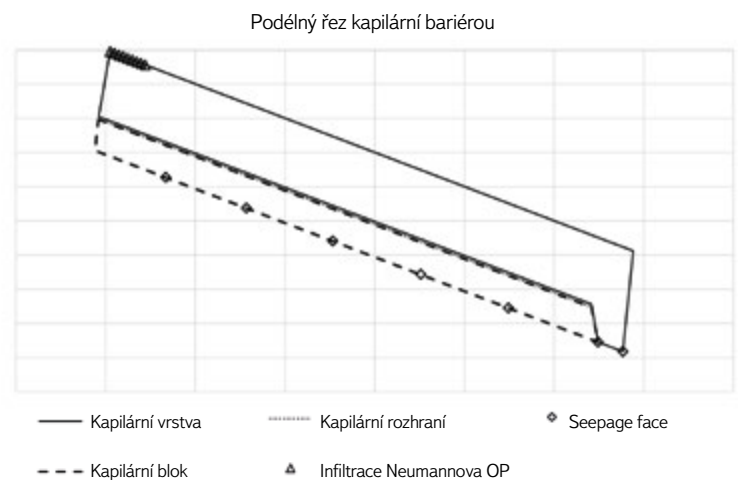
Obr. 4. Retenční křivky kapilárního bloku s odlišnými hodnotami parametru  $\alpha^w$ .  
Porovnání retenční křivky kapilárního bloku pro drenážní větev BD a tři variant B1w, B2w a B3w pro zvlhčovací větev reflektující změnu parametrem  $\alpha_w$ .  
Fig. 4. Capillary block retention curves with different values for parameter  $\alpha^w$ .  
Comparison of the capillary block retention curves for draining branch BD and the three variants B1w, B2w and B3w of the wetting branch reflecting the changes in the parameter  $\alpha_w$ .

## Vliv parametru $\alpha$ na modely kapilárních bariér

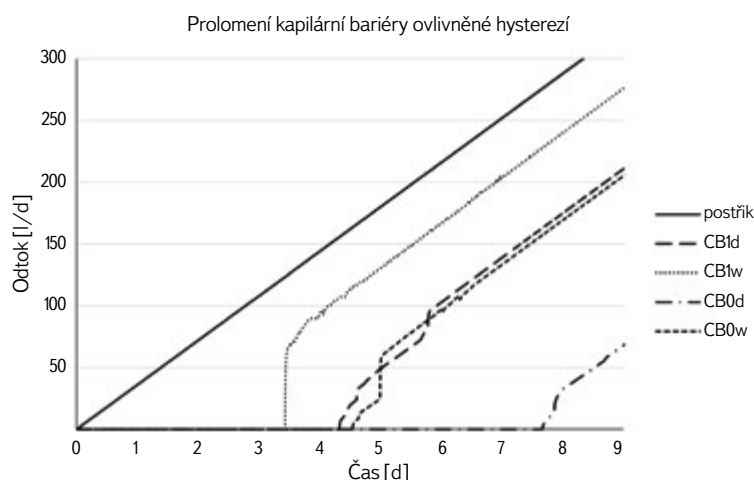
Parametr  $\alpha$  můžeme považovat za rozhodující faktor k vyjádření změny retenční křivky při změně procesu z vysoušení na zvlhčování a naopak. Experimentálně naměřená data hlavních zvlhčovacích větví materiálů  $B_0$  a  $L_0$  [1] umožnila určit užitím programu RETC parametry těchto hlavních zvlhčovacích větví. Kromě efektu zavřeného vzduchu byly zaznamenány, oproti příslušné hlavní drenážní větví, změny nejen parametru  $\alpha$ , ale i parametru  $n$ . To ovšem mohlo být způsobeno tím, že hlavní drenážní větev nebyla vzata v úvahu. Výzkum procesů, při nichž se opakovaně měnil směr změny vlhkosti [24], ukazuje, že matematický model zahrnující hysterezi užitím parametrů  $\alpha^d$ ,  $\alpha^w$  a  $n^d$  dává dostatečně přesnou simulaci procesů zahrnujících oba směry změny vlhkosti.

Jelikož jsme se zaměřovali na vliv volby parametru  $\alpha^w$  na účinnost kapilární bariéry, pracovali jsme s numerickými modely několika variant této volby.

Matematické modely byly formulovány ve dvou prostorových proměnných (ve svislém řezu vedeném spádníci bariéry). K výpočtům byl použit program S2D\_dual [32], který řeší kapacitní formu Richardsovy rovnice metodou konečných prvků. Pomocí numerických modelů bylo možné sledovat vývoj vsakujícího se postříku v prostoru a čase v závislosti na měnících se parametrech. Byl sestaven model kapilární bariéry se základními hodnotami hydromechanických charakteristik. Počáteční tlaková výška byla nastavena na hodnotu -40 cm [1]. Okrajové podmínky se liší podle místa hranice. V místě infiltrace byla nastavena Neumannova okrajová podmínka odpovídající lineárně narůstající hodnotě postříku, díky čemuž bylo možné porovnávat jednotlivé verze modelů a vyhodnotit čas prolomení kapilární bariéry ovlivněný měnicími se parametry. Odtok z kapilární bariéry byl modelován pomocí okrajové podmínky Seepage face v místech drenáže kapilární bariéry. Na zbývajícím okraji modelované oblasti, jež je reprezentována nepropustnou hranicí, byla nastavena nulová Neumannova okrajová podmínka. Okrajové podmínky jsou graficky znázorněny na obr. 5.

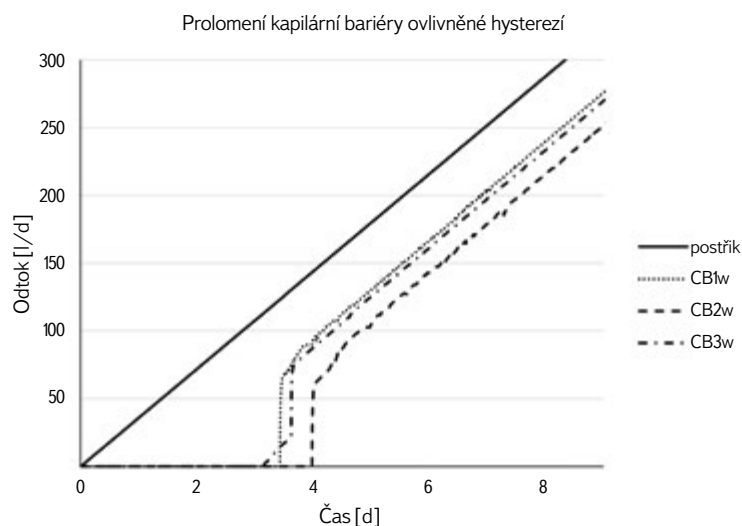


Obr. 5. Řez kapilární bariérou s vyznačenými okrajovými podmínkami pro infiltraci odpovídající nenulové Neumannově okrajové podmínce a okrajová podmínka drenáže z kapilárního bloku Seepage face. Na zbývajícím části hranice je nulová Neumannova okrajová podmínka. Délka kapilární bariéry je 6 m a výška 60 cm  
Fig. 5. Section through the capillary barrier with marked boundary conditions for infiltration corresponding to the non-zero Neumann boundary condition and drainage from the capillary block as a Seepage face boundary condition. The remaining part of the boundary is the zero Neumann boundary condition. The length of the capillary barrier is 6 m and the height is 60 cm



Obr. 6. Účinnost kapilární bariéry ovlivněná hystezí. Graf znázorňuje lineárně narůstající postřik stejný pro všechny simulace, odtok z kapilárního bloku CB0d a CB0w pro drenážní a zvlhčovací větve retenční křivky výchozí kapilární bariéry a CB1d a CB1w pro drenážní a zvlhčovací větve retenční křivky varianty 1 hypotetické kapilární bariéry podle Scotta et al. [14]

Fig. 6. Capillary barrier efficiency affected by hysteresis. The graph shows linearly increasing irrigation (the same for all simulations), outflow from capillary block CB0d and CB0w for the drainage and wetting branch of the default capillary barrier retention curve, and CB1d and CB1w for the drainage and wetting branch of the retention curve of variant 1 of the hypothetical capillary barrier according to Scott et al. [14]



Obr. 7. Účinnost kapilární bariéry v závislosti na volbě parametru  $\alpha^w$  zvlhčovací větve retenční křivky. Postřik v grafu znázorňuje lineárně narůstající intenzitu postřiku, zvlhčovací křivky 1, 2 a 3 odpovídají odtoku z kapilárního bloku pro tři varianty výpočtu  $\alpha^w$  zvlhčovací větve retenční křivky

Fig. 7. Capillary barrier efficiency depending on the choice of parameter  $\alpha^w$  of the retention curve wetting branch. Irrigation in the chart shows a linearly increasing intensity of irrigation; wetting curves 1, 2 and 3 correspond to the outflow from the capillary block for three variants of calculation  $\alpha^w$  of the wetting branch retention curve

Postřik byl pro všechny počítané varianty totožný, aby bylo možné výstupy mezi sebou porovnávat. Drenážní a zvlhčovací větve retenční křivky byly modelovány jako separátní verze modelů s odlišnými vstupními parametry. Bylo tedy možné vyhodnotit a ověřit vliv hystereze a volby parametru  $\alpha^w$  na fungování kapilárních bariér u všech modelovaných variant (obr. 6).

Kromě základní varianty modelu kapilární bariéry pro drenážní větve retenční křivky byly modelovány tři varianty pro zvlhčovací větve retenční křivky. Varianty výpočtu pro různé zvlhčovací větve jsou založeny na měnícím se parametru  $\alpha^w$  zvlhčovací větve retenční křivky kapilární vrstvy, případně i bloku. Výsledky jsou znázorněny na obr. 7.

## DISKUZE A ZÁVĚR

V této práci jsme srovnávali účinnost několika kapilárních bariér, jež se lišily kapilární vrstvou určenou testovanými volbami parametru  $a$ . Vzhledem k tomu, že pro výchozí materiál jsou k dispozici výsledky experimentálních testů, mohli jsme potvrdit, že matematický model bariéry dává dostatečně přesné výsledky už při použití samotné hlavní zvlhčovací větve. Srovnání s experimentálními výsledky dále ukázalo, že v případě účinnosti bariér nelze zanedbat hysterezi a pracovat pouze s drenážní větví kapilární bariéry. Byly tak potvrzeny předchozí experimenty [11, 28].

Série testů zaměřených na odvození hlavní zvlhčovací větve ve známých (tj. měřeními určených) parametrech hlavní drenážní větve ukázala, že významnou roli v tomto kroku má určení parametru  $\alpha^w$ , a že je dokonce možné, jak navrhuje citovaná publikace, zachovat parametry  $\theta_r^d$ ,  $n^d$ , případně i  $\theta_s^d$ , a hlavní drenážní větve definovat pouze vhodně určeným parametrem  $\alpha^w$ . Ukazuje se, že původně navrhovaná a v některých případech osvědčená volba  $\alpha^w = 2a^d$  nemusí být tím nejlepším řešením. V případě výchozí bariéry  $B^0$ ,  $L^0$  je zřejmé, že takto zvolený parametr  $\alpha^w$  by mohl vést k podhodnocení účinnosti bariéry.

Ze získaných výsledků je patrné, že co nejpřesnější určení parametrů retenční křivky hraje podstatnou roli pro stanovení efektivity kapilární bariéry. Pokud máme dva fyzicky existující materiály, kapilární blok a kapilární vrstvu, a chceme zjistit účinnost jimi vytvořené kapilární bariéry, pak se můžeme spolehnout na test provedený matematickým modelem. Pro kapilární blok nám v takovém případě stačí parametry hlavní drenážní větve. Pro kapilární vrstvu, vzhledem k citlivosti výsledku na hodnotu parametru  $\alpha^w$ , je vhodné určit parametry hlavní zvlhčovací větve měřeními. Pokud máme k dispozici jen parametry hlavní drenážní větve, je vhodné použít model hlavní zvlhčovací větve založený na změně pouze parametru  $a$ . Výsledky této studie ukazují, že v takovém případě je třeba volit pro  $\alpha^w$  vhodnou hodnotu v intervalu  $1,1 a^d \leq \alpha^w \leq a^d$ .

## Poděkování

Projekt „Hydromechanické charakteristiky retenčních křivek a jejich vliv na proudění podzemní vody“ byl financován Grantovou agenturou Univerzity Karlovy pod č. 296215.

## Literatura

- [1] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. The Influence of Artificial Sealing on the Capillary Barrier's Function. *Waste Management*. 2010, 30(1), s. 125–131.
- [2] PÍCHA, P. Laboratory Testing of the Capillary Barrier. *Acta Universitatis Carolinae – Geologica*. 2004, 1–4, s. 29–36.
- [3] MANCARELLA, D., DOGLIONI, A., SIMONE, V. On Capillary Barrier Effects and Debris Slide Triggering in Unsaturated Layered Soils. *Engineering Geology*. 2012, 147–148, s. 14–27.
- [4] STORMONT, J. C. The Effectiveness of Two Capillary Barriers on a 10% Slope. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1996, 14(4), s. 243–267.







- [5] PARENT, S. É., CABRAL, A. R. Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2006, 24(3), s. 689–710.
- [6] SEHRBROCK, U. Kombi-Kapillardichtung Kostengünstige Dichtungsvariante für ein Tasi Konformes Oberflächenabdichtungssystem. In: 19. *Fachtagung – Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2003.
- [7] SEHRBROCK, U. Verbundsysteme aus Kapillarsperre, Dichtungsbahnen und Geotextilien für die Oberflächenabdichtung von Deponien. In: 19. *Fachtagung – Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2005.
- [8] WOHNLICH, S., BITOMSKI, K. Kombi-Kapillar-Dichtungs-Systeme zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. In: 22. *Fachtagung Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2006.
- [9] OLDENBURG, C. M., PRUESS, K. On Numerical Modeling of Capillary Barriers. *Water Resource Research*. 1993, 29(4), s. 1 045–1 056.
- [10] MORRIS, C. E., STORMONT, J. C. Evaluation of Numerical Simulations of Capillary Barrier Field Tests. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1998, 16, s. 201–213.
- [11] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. Efficiency of Capillary Barriers in Relation to Retention Curves. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2010, 7(2), s. 201–207.
- [12] MLS, J., TRPKOŠOVÁ, D. Modelling Capillary Barriers. In: *WIT Transaction on Engineering Sciences*. 2014, s. 383–393.
- [13] ZHAO, Y., WEN, T., SHAO, L. T., CHEN, R., SUN, X., HUANG, L., CHEN, X. Predicting Hysteresis Loops of the Soil Water Characteristic Curve from Initial Drying. *Soil Science Society of America Journal*. 2020, 84(5), s. 1 642–1 649.
- [14] SCOTT, P. S., FARQUHAR, G. J., KOUWEN, N. Hysteretic Effects on Net Infiltration. In: *Conference Paper. Advances in Infiltration*, 1983, s. 163–170.
- [15] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. Hydraulické charakteristiky kapilární bariéry ve vztahu k její účinnosti. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2008, 9(2), s. 170–178.
- [16] LIKOS, W. J., LU, N., GODT, J. W. Hysteresis and Uncertainty in Soil Water – Retention Curve Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2014, 140(4), 04013050.
- [17] NAM, V. T., MIN, K. T., SHIN, H. Using Inverse Analysis to Estimate Hydraulic Properties of Unsaturated Sand from One-Dimensional Outflow Experiments. *Engineering Geology*. 2013, 164, s. 163–171.
- [18] GUZMÁN-MARTINÉZ, J. C., GARCÍA, E. F., VEGA-POSADA, C. A. Effect of Hydro-mechanical Material Parameters on the Capillary Barrier of Reinforced Embankments. *Soil and Foundations*. 2022, 62(1), 101090.
- [19] RAHARDJO, H., LEONG, E. C., FREDLUND, D. D. Design and Laboratory Verification of a Physical Model of Sloping Capillary Barrier. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011, 41(5), s. 814–830.
- [20] SCARFONE, R., WHEELER, S. J., SMITH, C. C. Numerical Modelling of the Application of Capillary Barrier Systems for Prevention of Rainfall-Induced Slope Instability. *Acta Geotechnica*. 2023, 18(1), s. 355–378.
- [21] VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980, 44(5), s. 892–898.
- [22] VAN GENUCHTEN, M. T., LEU, F. J., YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. *EPA 600/2-91-065*. 1991, 85 s.
- [23] MUALEM, Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*. 1976, 12(3), s. 513–522.
- [24] DOHNAL, M., DUŠEK, J., VOGEL, T. The Impact of the Retention Curve Hysteresis on Prediction of Soil Water Dynamics. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2006, 54(3), s. 258–268.
- [25] KOOL, J. B., PARKER, J. C. Development and Evaluation of Closed-Form Expressions for Hysteretic Soil Hydraulic – Properties. *Water Resources Research*. 1987, 23(1), s. 105–114.
- [26] VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M., ČÍSLEROVÁ, M. Effect of the Shape of the Soil Hydraulic Functions Near Saturation on Variably – Saturated Flow Predictions. *Advances in Water Resources*. 2001, 24(2), s. 133–144.
- [27] WOHNLICH, S., *Untersuchungsbericht-Dichtigkeitsnachweis der Kombikapillardichtung (KKD), in 3. Kipprinnenversuch*. Bochum, 2006.
- [28] MLS, J., TRPKOŠOVÁ, D. On the Reliability of Mathematical Modelling of Capillary Barriers. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2013, 1(4), s. 406–415.
- [29] POWERS, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Research*. 1953, 23(2), s. 117–119.
- [30] HAVLÍČEK, J., MYSLIVEC, A. The influence of Saturation and Stratification on the Shearing Properties of Certain Soils. In: *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1. Toronto: University of Toronto Press, 1965, s. 235–239.
- [31] SCHAAP, M. G., LEIJ, H. J., VAN GENUCHTEN, M. T. Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*. 2001, 251, s. 163–176.
- [32] VOGEL, T. *Documentation of the S2D code – version 2.0*. Praha: CTU, 1999 (internal).

## Autoři

**Mgr. Barbora Krijt<sup>1,2</sup>**

✉ [barbora.krijt@vuv.cz](mailto:barbora.krijt@vuv.cz)

ORCID: 0000-0002-7678-3369

**doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.<sup>2</sup>**

✉ [jiri.mls@natur.cuni.cz](mailto:jiri.mls@natur.cuni.cz)

ORCID: 0000-0001-5598-9432

<sup>1</sup>Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

<sup>2</sup>Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.07.004

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

## INFLUENCE OF RETENTION CURVE PARAMETER $\alpha$ ON CAPILLARY BARRIER EFFICIENCY

**KRIJT, B.<sup>1,2</sup>; MLS, J.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

<sup>2</sup>Faculty of Science, Charles University, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Prague

**Keywords:** capillary barrier — numerical modelling — retention curve — hydraulic characteristics — hysteresis

This study was focused on calculation of parameter  $\alpha$  of wetting branch of the retention curve and its influence on the functioning of capillary barrier. Capillary barrier is a simply method of a landfill insulation. Principle of the capillary barrier is based on the different hydraulic properties of two inclined layers of soil with different grain sizes. The upper capillary layer consists of fine-grained soil and the bottom capillary block of coarse – grained soil. Under certain pressure conditions the hydraulic conductivity of the capillary layer is higher than the hydraulic conductivity of the capillary block. It follows that the water flows away along the capillary interface between the capillary layer and capillary block.

The capillary barrier unsaturated flow system is based on the Richards equation containing two unknowns. Therefore, it is necessary to supplement it with another equation, which is most often the retention curve. The phenomenon of a different course of the wetting and draying retention curve is called hysteresis. When designing and testing capillary barriers, hysteresis is often neglected [4, 9], but new studies show that it has a significant effect on its effectiveness [10–13]. The correct determination of the retention curves, including its hysteresis, is thus necessary for the subsequent solution of the flow in the unsaturated zone.

The aim of this study was to test the effectiveness of the capillary barrier affected by the changes of retention curve parameters and hysteresis. Numerical

modeling was used to test the effectiveness of the capillary barrier at different values of the parameter  $\alpha$  and including the process of the hysteresis. Thanks to the numerical modeling, it was possible to monitor the direct effect of changing parameter  $\alpha^w$  on the efficiency of the capillary barrier. Using separate models for the drainage and moistening branches of the retention curve, it was also possible to evaluate the influence of hysteresis on the functioning of capillary barriers.

As a result of compiled numerical models, it was possible to evaluate the effect of a various calculation of the parameter  $\alpha^w$  on the effectiveness of capillary barriers. The results of numerical models show a direct influence of the calculation of the parameter  $\alpha^w$  on the effectiveness of capillary

barriers. From the outputs of the numerical models, it is evident that determining the parameters of the retention curve as accurately as possible plays a significant role in assessment of the effectiveness of the capillary barriers. Verification of the importance of hysteresis in the design and testing of capillary barriers was included in the numerical models. Numerical models have confirmed previous studies, which point to the fact that neglecting hysteresis, or the wetting branch of the retention curve, will lead to an overestimation of the effectiveness of the capillary barrier.

