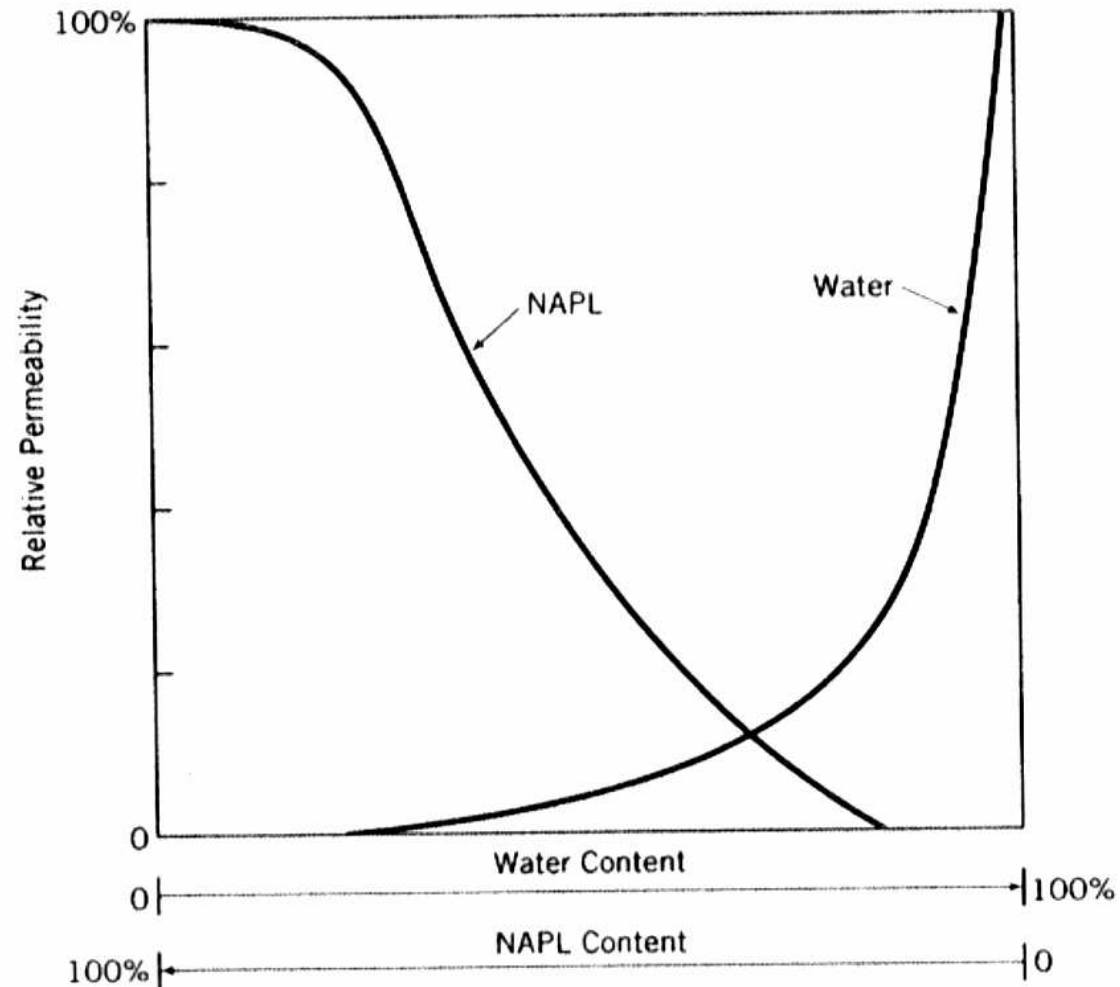


A black and white photograph of a forest stream. The water flows over rocks, creating white rapids. The forest is dense with tall, thin trees. The text 'OCHRANA PODZEMNÍCH VOD' is overlaid in the center of the image.

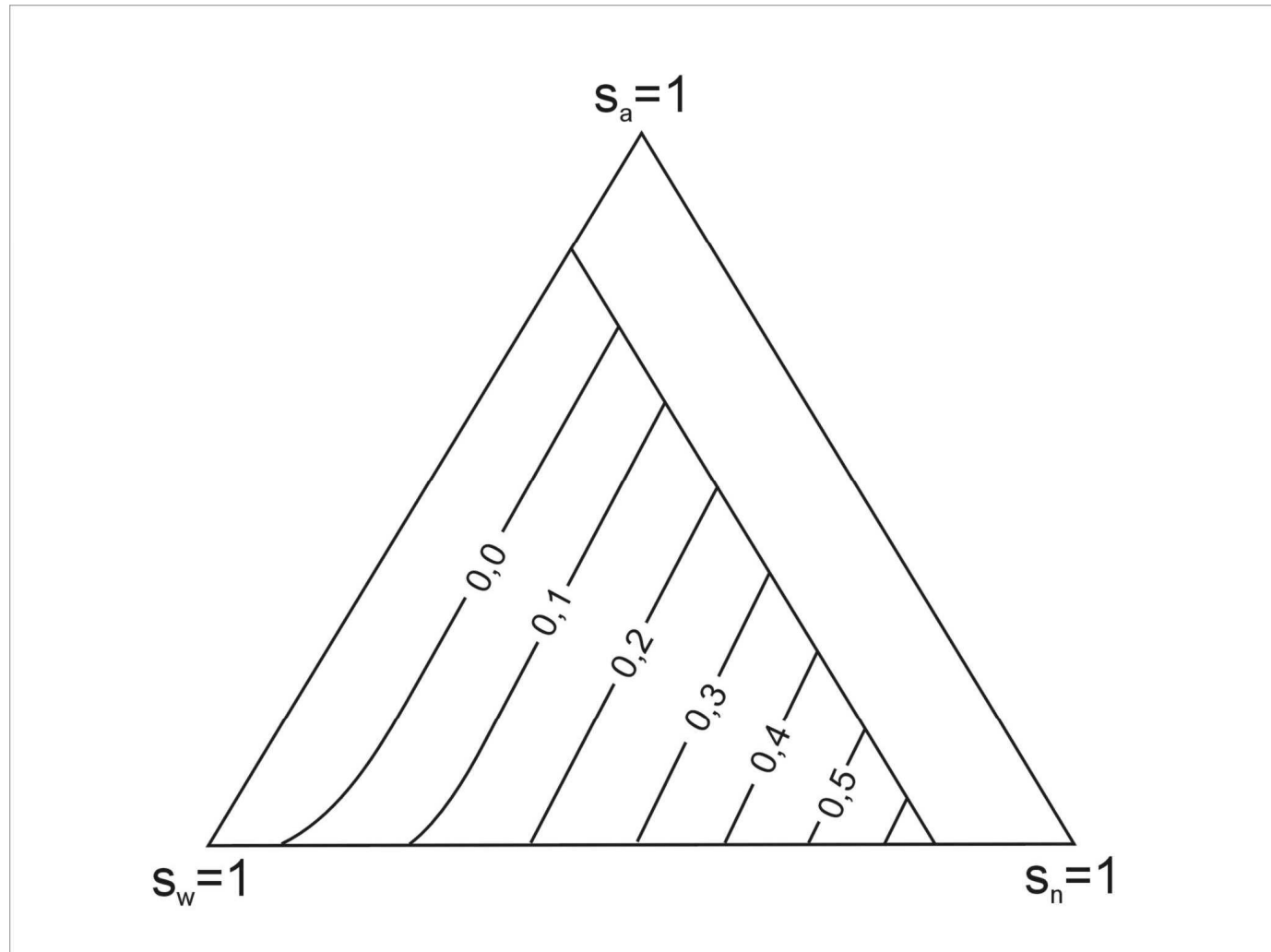
OCHRANA PODZEMNÍCH VOD

RELATIVNÍ PROPUSTNOST

- v multifázovém prostředí spolu fluida soupeří o volný prostor (objem pórů)
- propustnost prostředí pro jedno fluidum je potom mírou nasycení prostředí tímto fluidem
- platí i v satureované zóně pro systémy NAPL – voda, NAPL – voda – vzduch, apod.



- skutečné prostředí – existují 3 fluida
- konstrukce ternárních diagramů



- uvažují prostředí proměnlivě satureované vodou, NAPL a vzduchem s vodou jako smáčejícím fluidem

**Darcyho zákon v obecné formě
pro 1-D proudění**

$$q_i = -\frac{k_i}{\mu_i} (\Delta P_i - \rho_i \cdot g \cdot \Delta h)$$

k_i efektivní propustnost média pro i -té fluidum

μ_i viskozita

P tlak

ρ hustota

g gravitační konstanta

h výška

**vztah relativní propustnosti
k propustnosti prostředí**

$$k_{ri} = \frac{k_i}{k}$$

k_{ri} relativní propustnost i -tého fluida

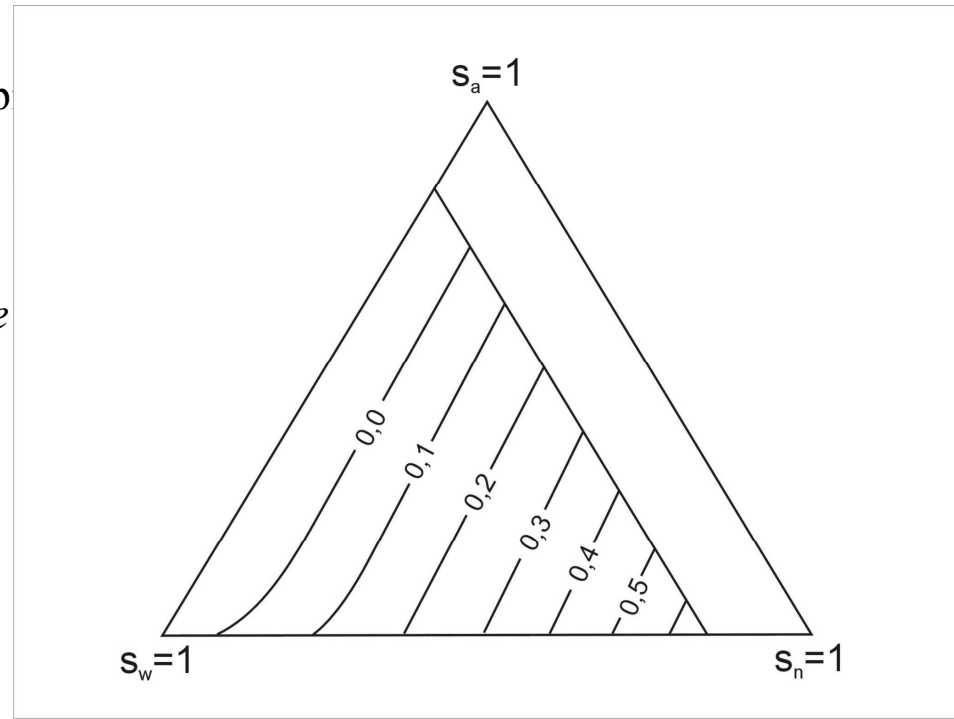
k_i efektivní propustnost i -tého fluida

k propustnost média (v m^2)

ideální případ – součet všech relativních propustností je při daném nasycení jednotlivými fluidy roven 1

Frick (1962) – emp

$$k_{rn} = (1 - s_e)$$



dí

$$= \frac{(s_w - s_{wr})}{(1 - s_{wr})}$$

Stone (1973) - obecný vzorec - 3 fázové prostředí – podle vzorce se konstruují ternární diagramy

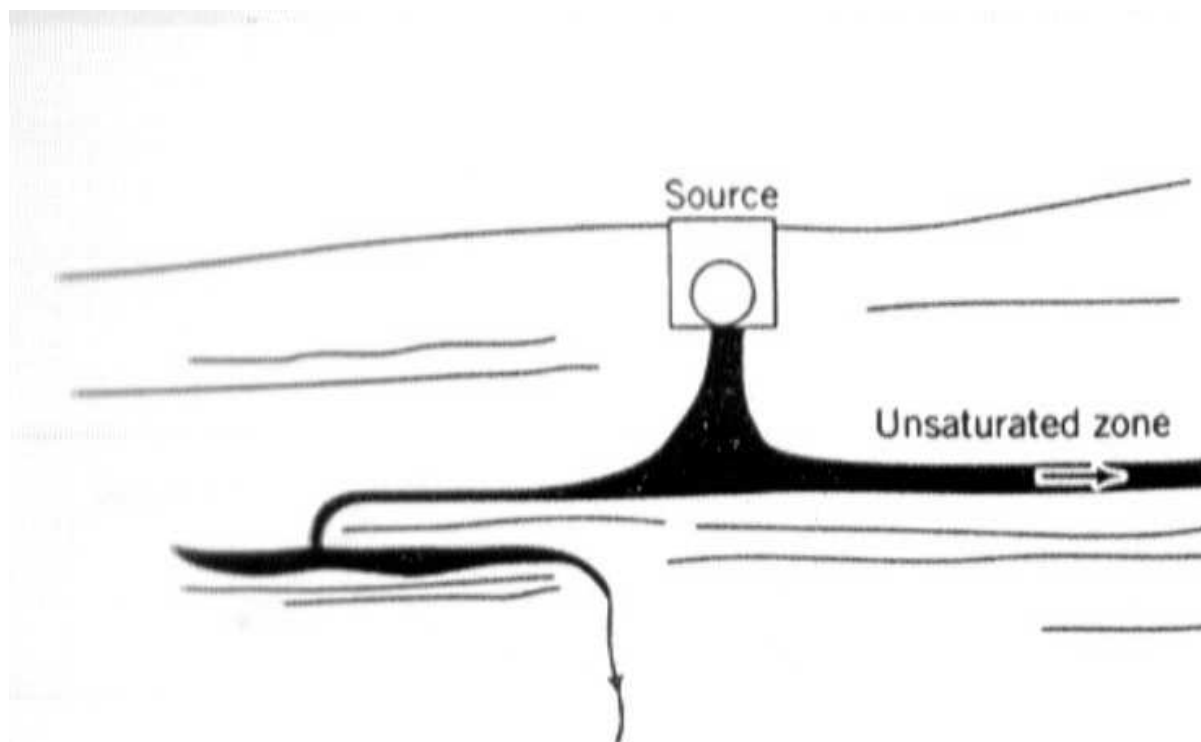
$$k_{rn} = k_{rnw}^* \left[\left(k_{rnw} / k_{rnw}^* + k_{rw} \right) \left(k_{rna} / k_{rnw}^* + k_{ra} \right) - \left(k_{rw} + k_{ra} \right) \right]$$

- k_{rnw}^* relativní propustnost NAPL při reziduálním nasycení vodou
- k_{rnw} relativní propustnost NAPL (funkce nasycení systému vodou)
- k_{rna} relativní propustnost NAPL (funkce nasycení systému vzduchem)

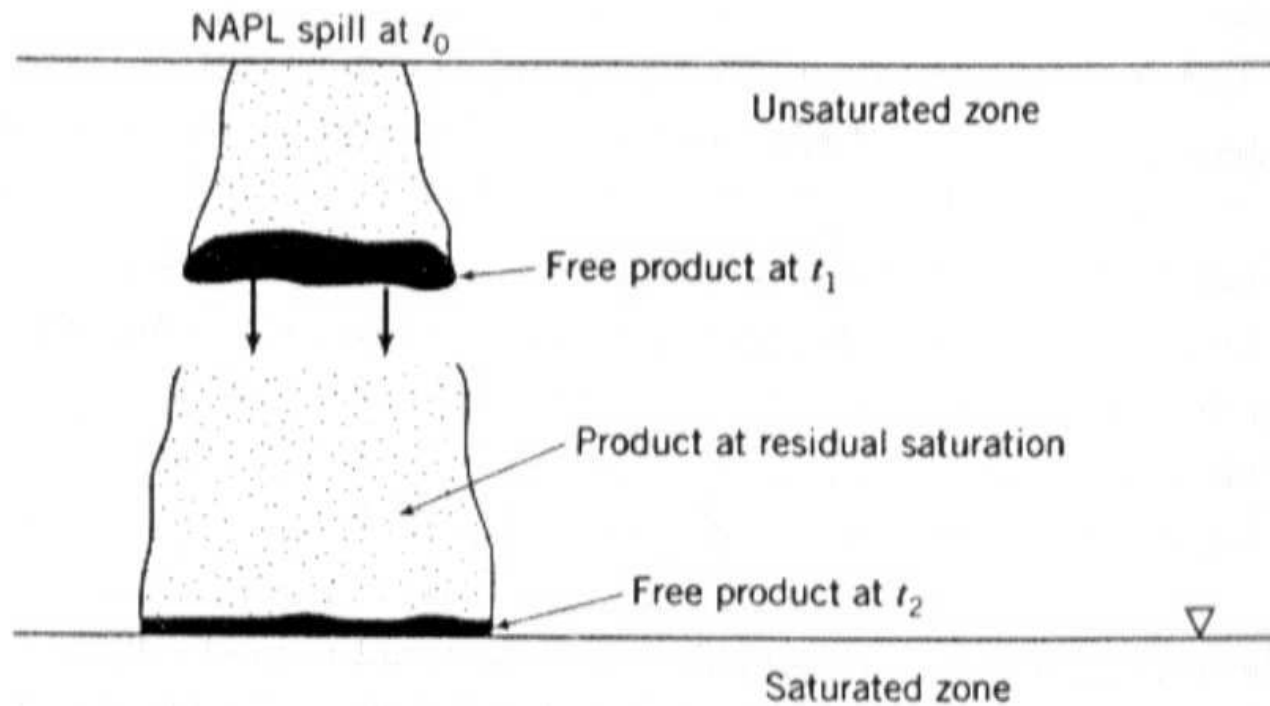
MIGRACE NAPL HORNINOVÝM PROSTŘEDÍM

nesaturovaná zóna

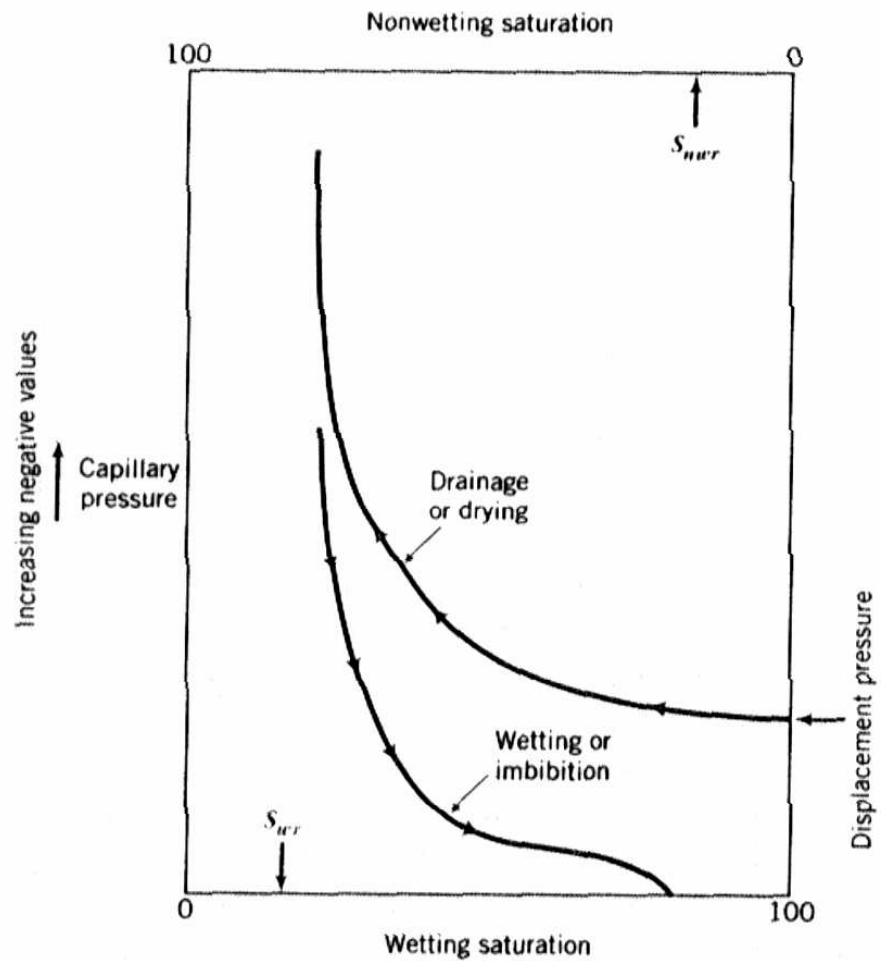
- převažuje vertikální pohyb ve směru působení gravitace



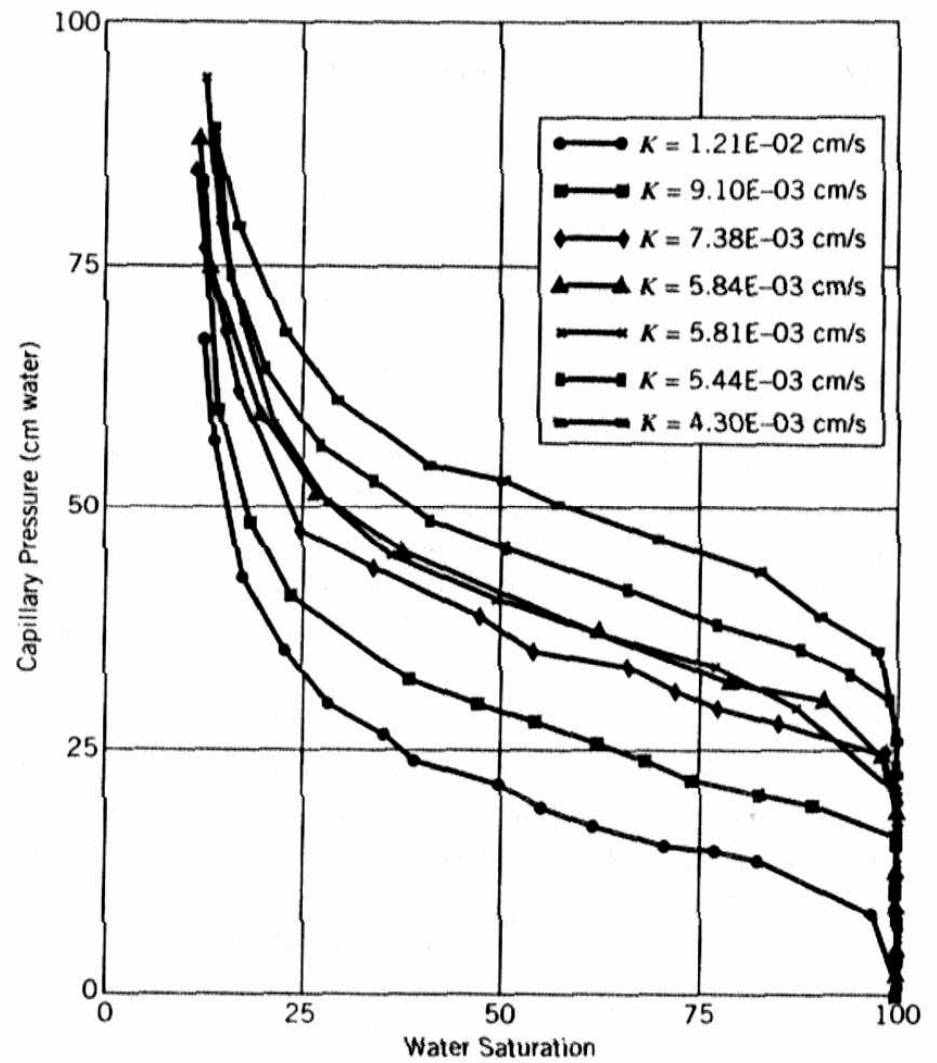
- migrace volné fáze NAPL je ovlivněna distribucí otevřených pórů a vody, potenciálně je lepší v suchém prostředí (viz koncept relativní propustnosti a kapilárního (vstupního) tlaku), zvýšená přítomností puklin, trhlin, rozvolněných prostor v okolí kořenů rostlin, apod.



- formování kapalného rezidua pórech, kterými volná fáze NAPL prošla (smáčející fluidum)
- srovnatelné s formováním reziduálního nasycení vody (smáčející fluidum)
- po průchodu fronty volné fáze NAPL nastává v hornině drenáž (na konci fronty volné fáze NAPL)

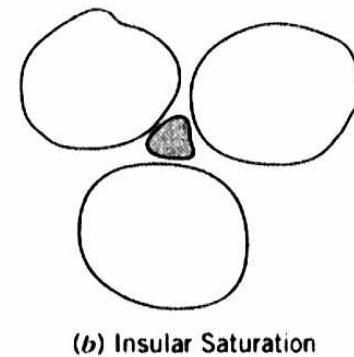
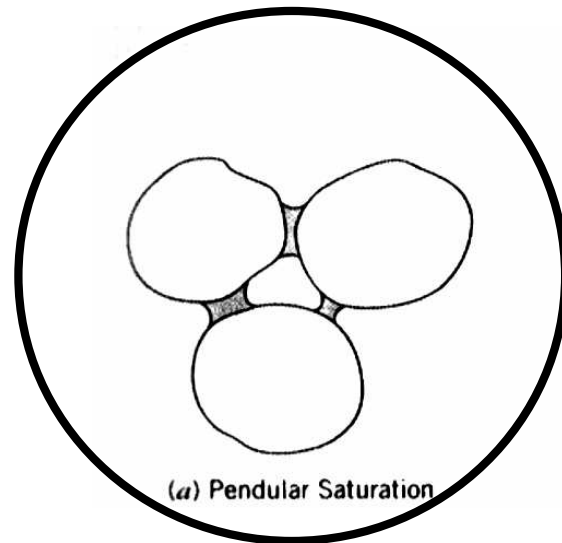


Observations: wetting or imbibition curve.



NAPL ve formě kapalného rezidua

- vytváří nejčastěji povlaky zrn (event. stěn nebo zúžení puklin) nebo na kontaktu zrn
- forma izolovaných těles



- hodnoty s_r pro všechny smáčeující kapaliny zhruba srovnatelné
- obecně platí, že hodnoty s_r rostou s poklesem zrnitosti
- obecně platí, že hodnoty s_r rostou s rostoucí viskozitou NAPL a vlhkostí prostředí
- $s_r = 0,1 - 0,2$ (0,23 – jílovité spraše)
- schopnost nesaturované zóny zadržet NAPL se označuje jako **retenční kapacita**

$$R = 1000s_r n$$

- udává zachycený objem NAPL (v litrech) na 1 m³ horniny

- hrubé šterky – jednotky l/m^3 (20)
- šterk s pískem – vyšší jednotky až kolem $10 l/m^3$ (max. 50)
- písek hrubý až střední – 10 – 20 (max. 80) l/m^3
- střední až jemný písek – 20 – 30 (max. 120) l/m^3
- jemný až jílnatý písek – 40 (max. 160) l/m^3
- v případě zvrstvených a nehomogenních sedimentů je retenční kapacita ještě větší (až $100 l/m^3$)
jemnozrnné písky 40 – 160 l/m^3

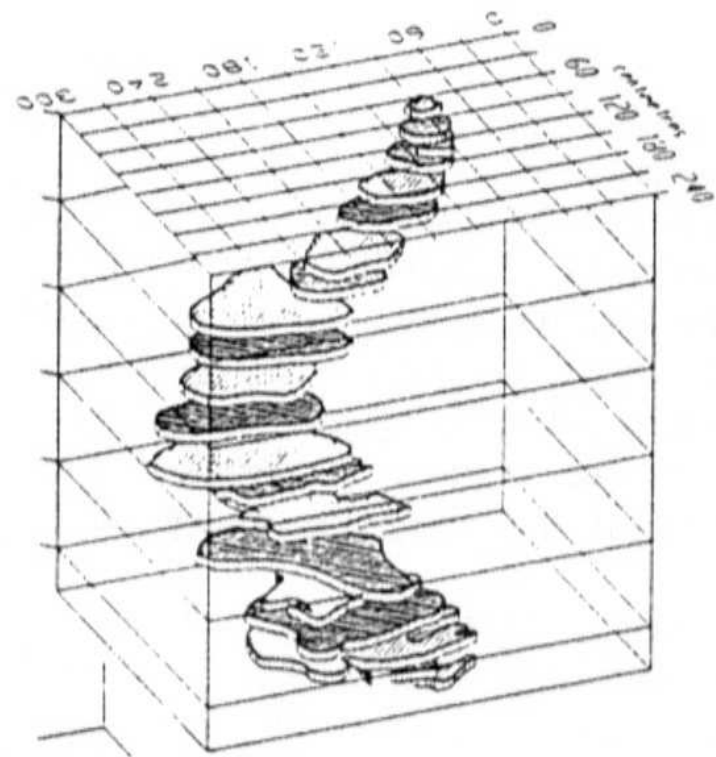
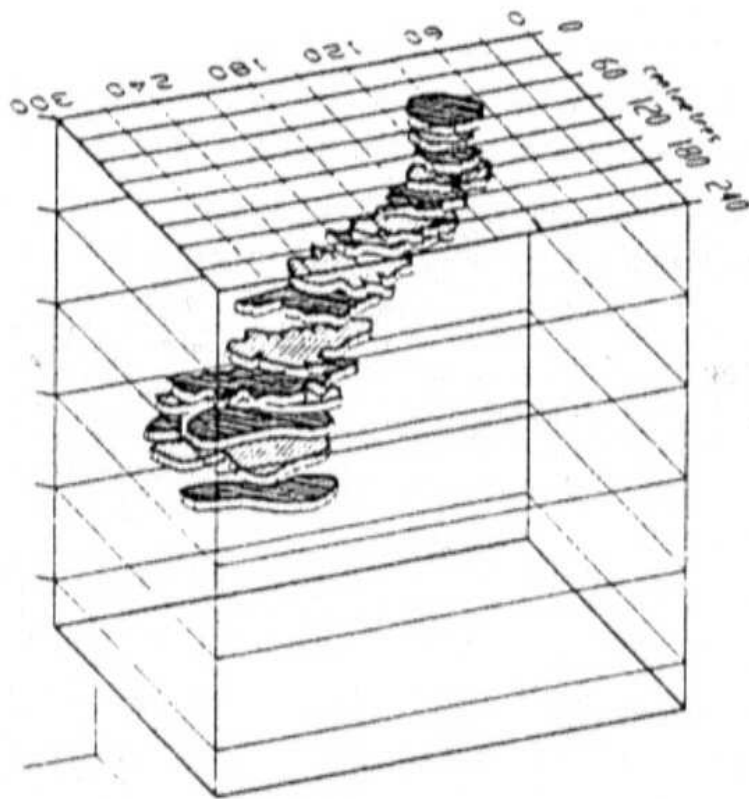
pokud není nasycena retenční kapacita, pohyb nemůže probíhat

naopak je-li retenční kapacita nasycena (opakované úniky NAPL) – pohyb beze ztrát a mnohem rychlejší

- laboratorní stanovení hodnot retenční kapacity
- zjištění hodnot retenční kapacity z retenčních čar
(křivky kapilární tlak – nasycení smáčeující kapalinou)

vliv charakteru vstupu NAPL do horninového prostředí

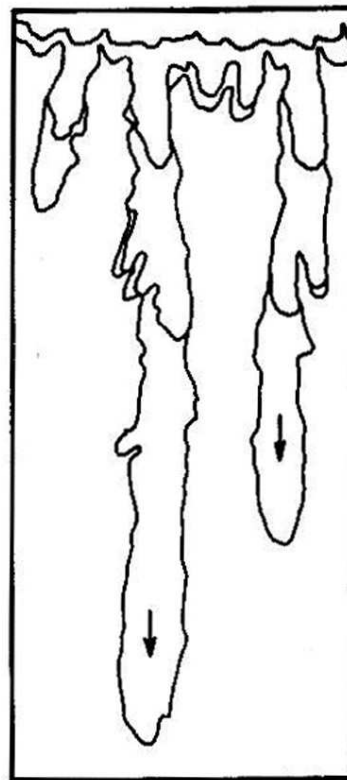
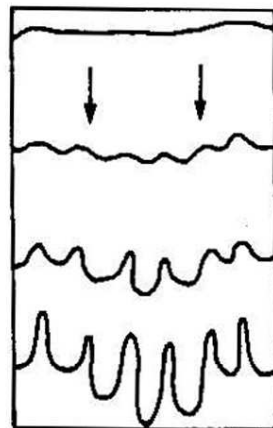
- jednorázové úniky větších objemů látek – nejmenší riziko z hlediska hloubkového dosahu
- opakované úniky – vyšší riziko z hlediska hloubkového dosahu
- bodové opakované úniky - nejvyšší riziko z hlediska hloubkového dosahu



kalkulace skutečného dosahu volné fáze (event. objemu horniny vyplněného kapalným reziduem) je jen teoretická

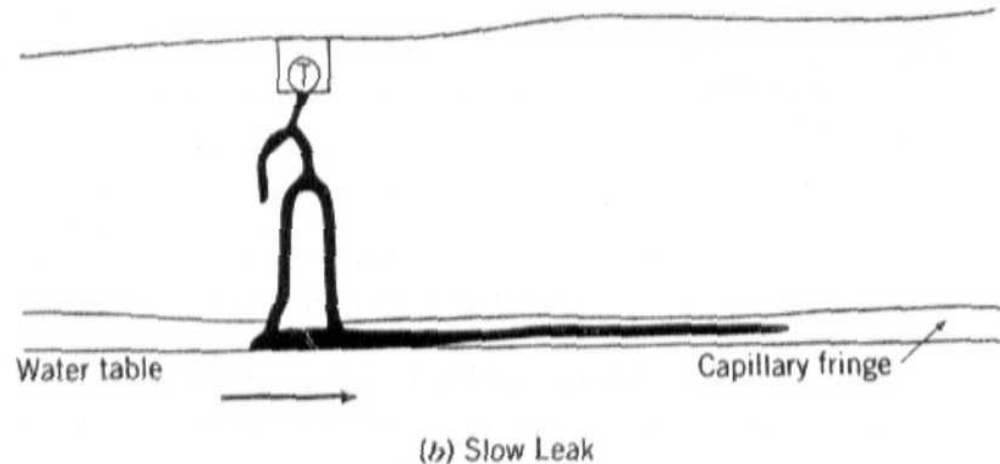
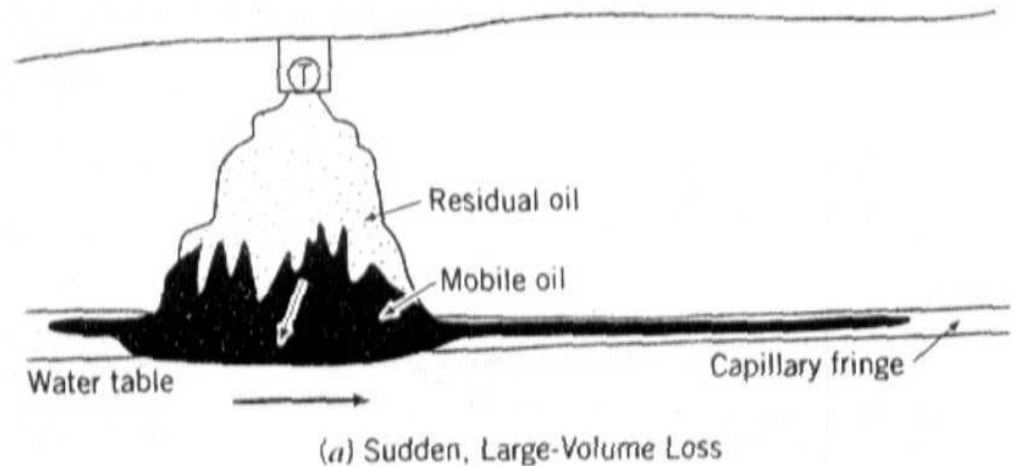
pouze orientační výpočty

- i v homogenním prostředí by byla větší v důsledku formování tzv. prstů

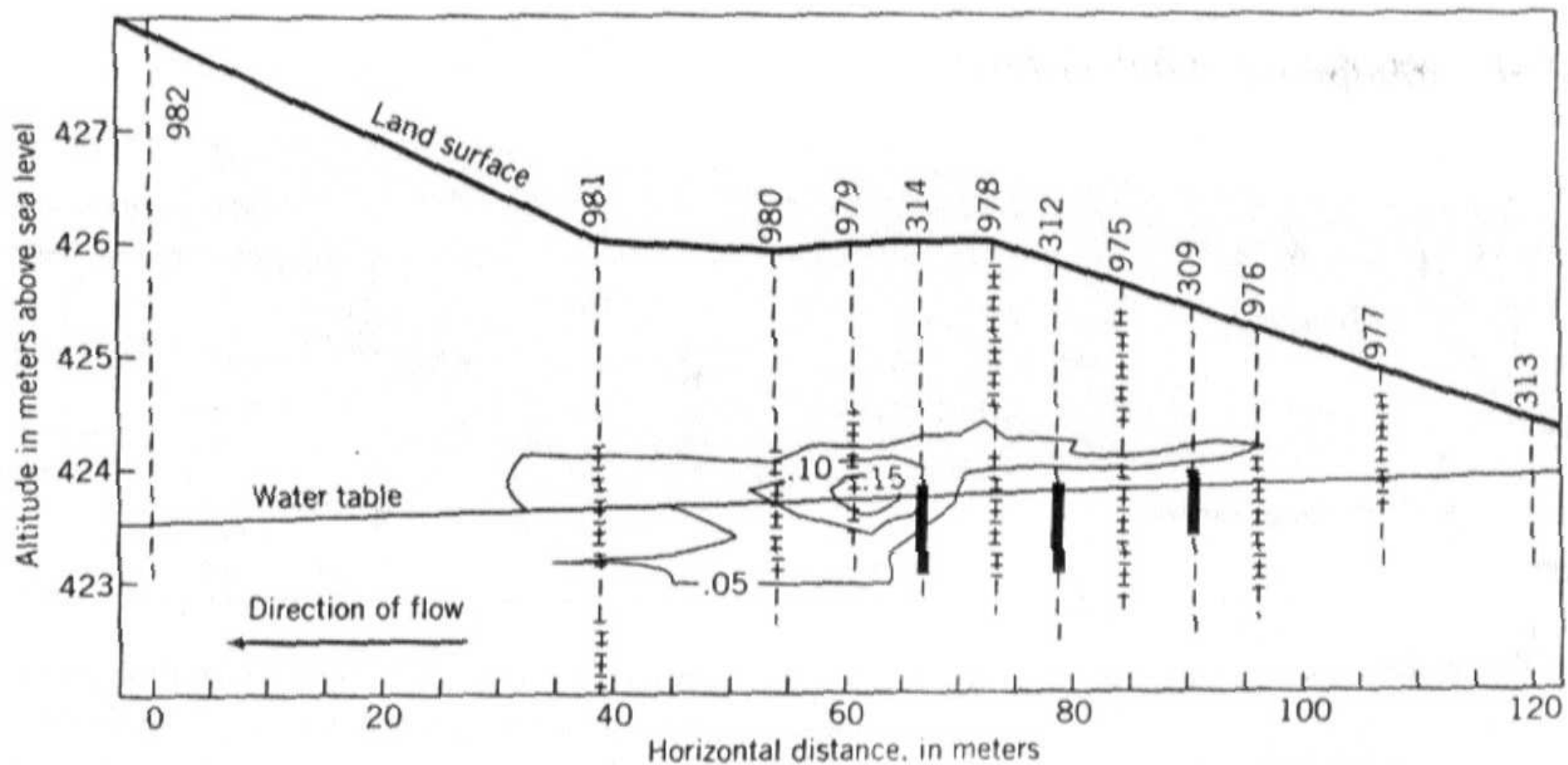


LNAPL's

- vertikální pohyb je ukončen po dosažení hranice saturované zóny
- rostoucí saturace pórů vodou snižuje propustnost pro LNAPL
- při plném nasycení pórů vodu dochází k akumulaci volné fáze LNAPL (kapilární třáseň)
- velký objem LNAPL může vyvolat zatlačené volné fáze LNAPL pod hladinu podzemní vody
- ve skutečnosti – LNAPL se akumuluje spíše nad kapilární třásní
- vstup LNAPL do vrtů – akumuluje se větší výška vrstvy volné fáze, než je ve skutečnosti – nadhodnocení objemu LNAPL v horninovém prostředí
- poměr mezi zdánlivou a skutečnou tloušťkou vrstvy volné fáze LNAPL je 2 - 4



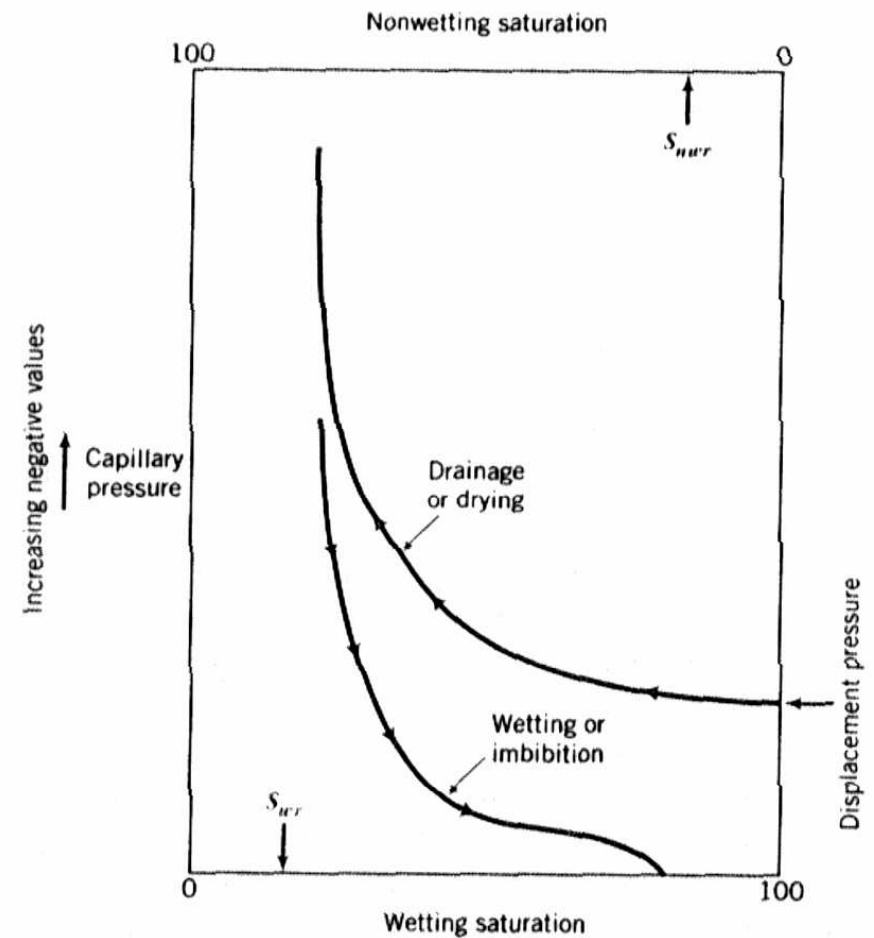
srovnání skutečného rozsahu LNAPL (izolinie hodnot nasycení) s mocností vrstvy LNAPL zjištěné v indikačních vrtech



nové metody průzkumu – dielektrické profilování, apod.

Výskyt LNAPL's při hranici s hladinou podzemní vody

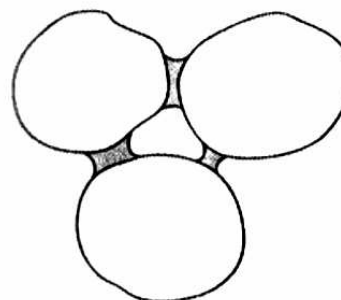
- kolísání hladiny podzemní vody umožňuje vstup volné fáze LNAPL do pórů s obsahem reziduálního nasycení vody
- pokles hladiny – drenáž
- nástup hladiny - nasávání
- při nástupu hladiny dochází k formování reziduálního nasycení LNAPL v saturované zóně
- mechanismy
 1. by-passing... smáčejší fluidum odškrtí nesmáčejší uvnitř pórů
 2. snap-off u pórů s velkým poměrem mezi velikostí hrdla a vnitřkem pórů



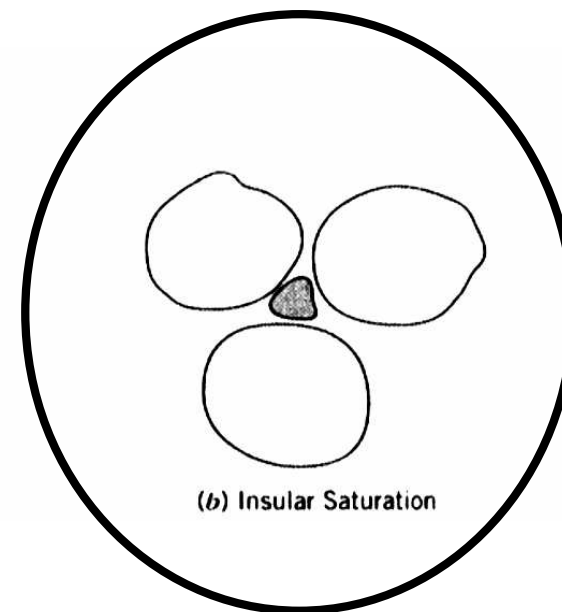
Observations: wetting or imbibition curve.

Výskyt LNAPL's při hranici s hladinou podzemní vody

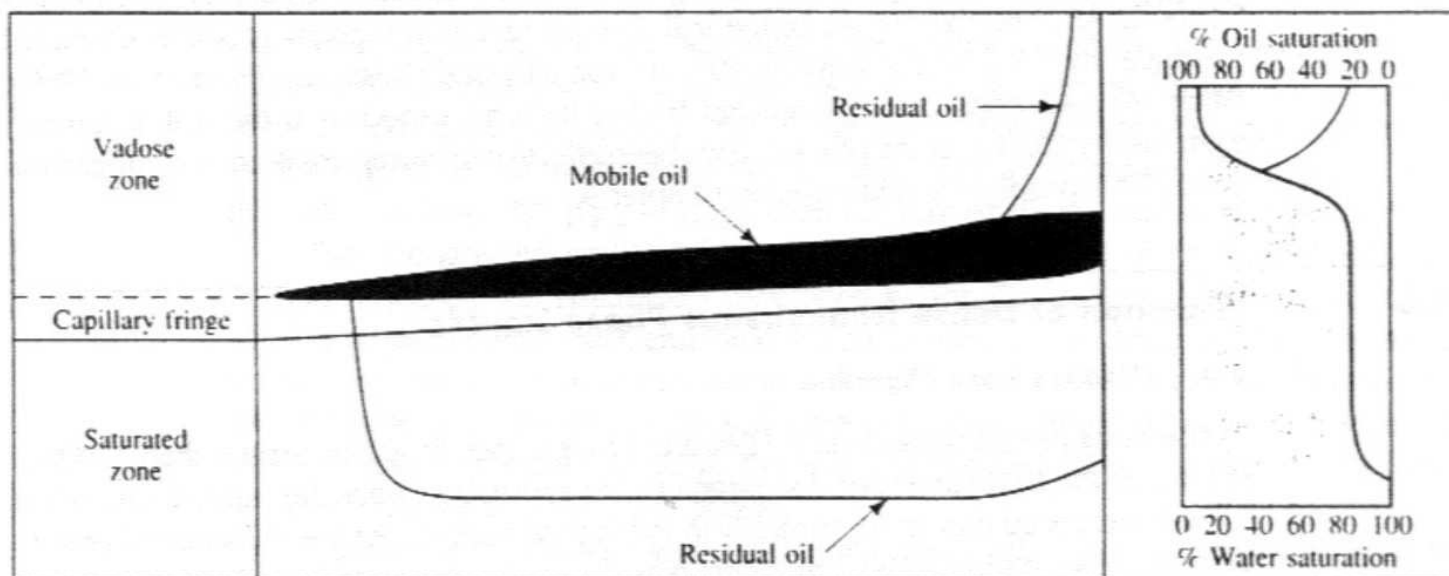
- hodnoty s_r výrazně vyšší – 0,2 – 0,5
- příčiny – reziduum LNAPL je uzavřeno spíše ve větších pórech (snadnější průnik při poklesu hladiny podzemní vody)
- důsledek formování reziduálního nasycení v saturované zóně – zdánlivý pokles objemu LNAPL (tloušťky vrstvy volné fáze ve vrtech) při nástupu hladiny a naopak zdánlivý nárůst objemu LNAPL (tloušťky vrstvy volné fáze ve vrtech) při poklesu hladiny



(a) Pendular Saturation



(b) Insular Saturation



DNAPL's v saturované zóně

- každý pór nasycený smáčejší kapalinou (vodou) klade nesmáčejší kapalině (DNAPL) odpor vyjádřený kapilárním (tzv. vstupním) tlakem

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r}$$

$$P_d = \frac{2\sigma \cos \varphi}{b}$$

- orientační výpočet velikosti póru v průlinově porózním prostředí

$$r \approx d/8$$

$$r \approx (k/n)^{0,5}$$

- akumulace volné fáze generuje tlak způsobený objemovou hmotností

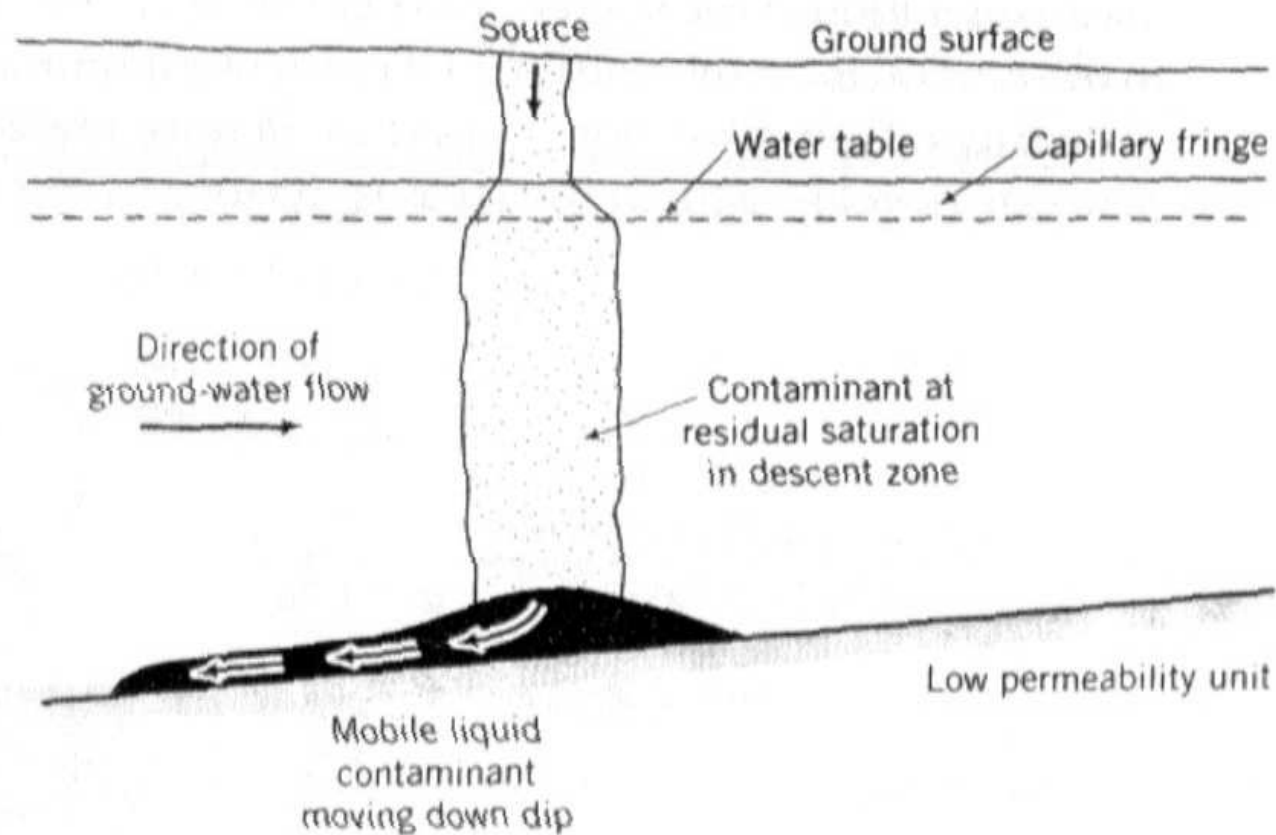
$$P_g = z_n g \rho_{nw}$$

- v saturované zóně je tento gravitační tlak přímo úměrný rozdílu objemových hmotností DNAPL a vody

$$P_g = z_n g (\rho_{nw} - \rho_w)$$

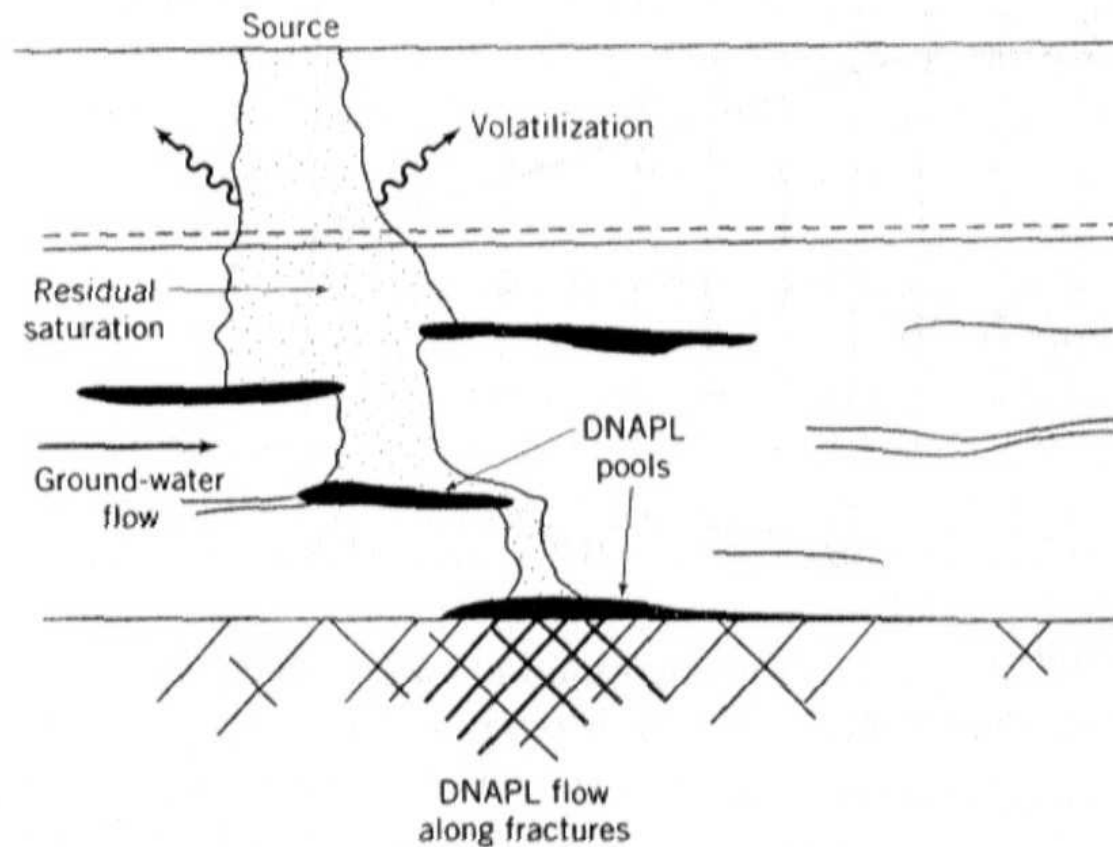
jednoduché podmínky – homogenní prostředí

- formování kapalného rezidua v nesaturované zóně
- formování kapalného rezidua v saturované zóně
- vznik akumulace volné fáze
- pohyb akumulace volné fáze DNAPL ve sklonu tlakového potenciálu tělesa (zjednodušeně - ve směru sklonu nepropustné vrstvy)



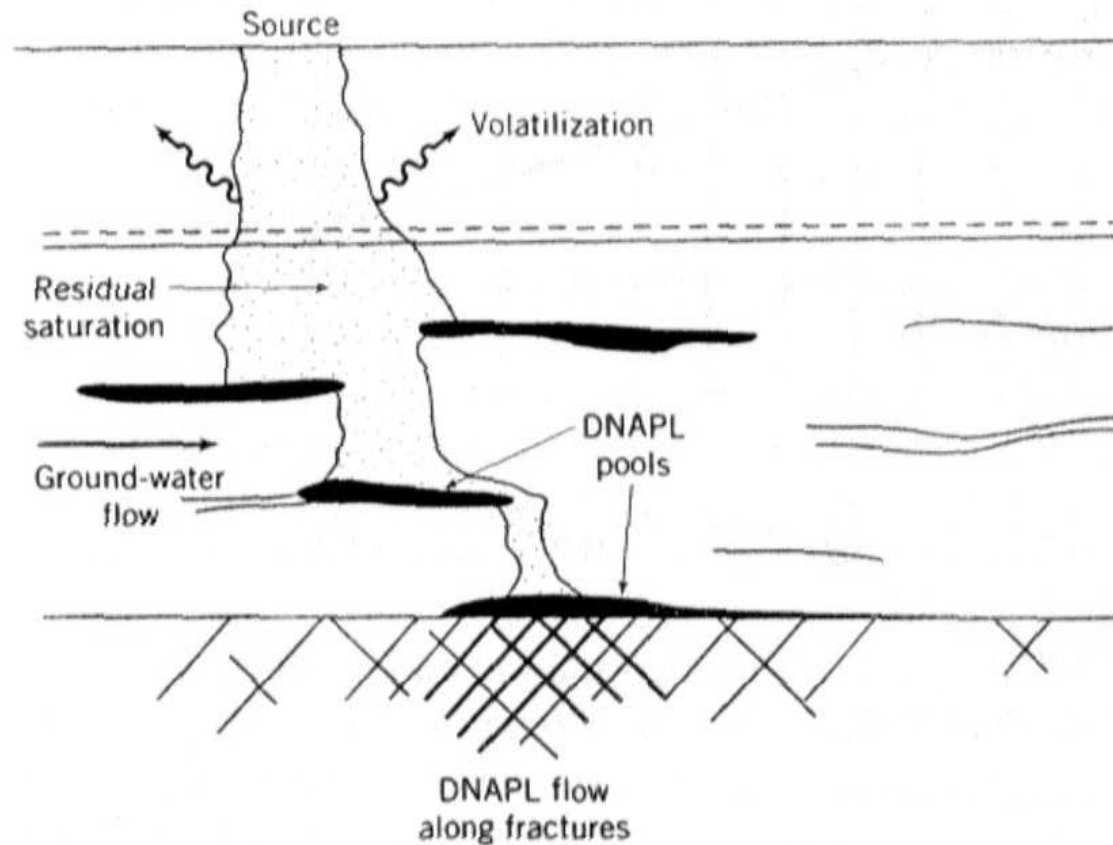
jednoduché podmínky – nehomogenní prostředí

- formování kapalného rezidua v nesaturované zóně
- formování kapalného rezidua v saturované zóně
- vznik akumulací volné fáze nad tzv. **kapilárními bariérami** (větší hodnota P_c)
- jednotlivé akumulace volné fáze jsou propojeny vertikálně polohami s kapalným reziduem
- pohyb a distribuci volné fáze a kapalného rezidua je prakticky nemožné přesně definovat



jednoduché podmínky – prostředí s puklinovou porozitou

- kumulace rizika extrémního hloubkového dosahu akumulace volné fáze
- prokázáno minimálně do hloubek stovek metrů
- příčiny
 - propojení systému puklin je zpravidla vertikální
 - při průniku do pukliny se kumuluje ve vertikálním směru mocná vrstva volné fáze



HYDROSTATICKÉ PODMÍNKY

průnik volné fáze DNAPL do saturované zóny

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg\rho_{nw}}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách nasávání

$$z_n = \frac{2\sigma \cos \varphi}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

průnik volné fáze do menších pórů (puklin) – povrch tělesa je v podmínkách drenáže

$$z_n = \frac{[P_{c(jemno)} - P_{c(hrubo)}]}{rg(\rho_{nw} - \rho_w)}$$

stabilní délka akumulace na uklánějící se vrstvě v saturované zóně

$$L_n = \frac{P_d}{(\rho_{nw} - \rho_w)g \sin \theta}$$

HYDRODYNAMICKÉ PODMÍNKY

vertikální hydraulický gradient (**rozdíl výšek hladin**) potřebný k zamezení dalšího hloubkového průniku volné fáze DNAPL (měřeno přes mocnost akumulace)

$$\Delta h = i_c z_n = \frac{z_n (\rho_{nw} - \rho_w)}{\rho_w}$$

kritická hodnota horizontálního hydraulického gradientu, potřebná k mobilizaci volné fáze DNAPL (ležící horizontálně na kapilární bariéře)

$$i_c = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r\rho_w gL}$$

hydraulický gradient potřebný k zamezení pohybu volné fáze v uklánějící se puklině nebo ležící podél ukloněné plochy

$$i_c = \frac{(\rho_{nw} - \rho_w) \sin \theta}{\rho_w}$$

