

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Diplomski sveučilišni studij

Smjer: **GEOTEHNIKA**

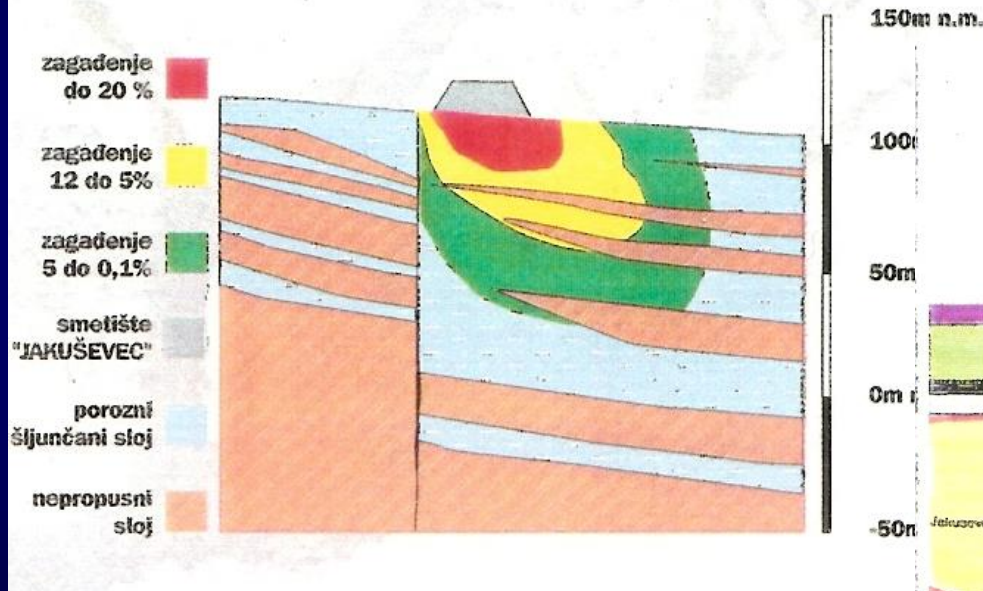
# Geotehnika i zaštita okoliša 8

Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić  
Građevinski fakultet Zagreb

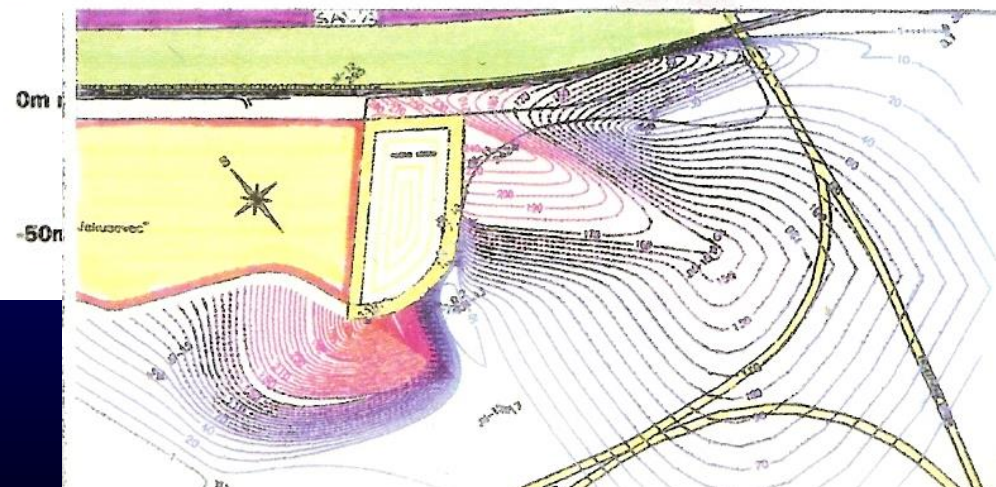
# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

## Primjer: ODLAGALIŠTE JAKUŠEVAC

### OBLAK ZAGAĐENJA PO DUBINI



### FAKTORI ZAGAĐENJA NA DUBINI 13m NA TEMELJU MJERENJA IZ 11.mj.1995. - amonijak -



# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

## Funkcije tla i utjecaj zagađenja

- Nosiva struktura i gradivo – manji do nikakav
- Podzemlje-izvor vode, rast biljaka – jak do zabrane korištenja
- Element u biosferi i ekološkom ciklusu – manji do drastični utjecaj
- Zagađeno tlo utječe i na površinske vode, zrak, more..- može znatno utjecati na kvalitetu života ili se odraziti na gospodarstvo

# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

- Realni rizici: uništenje biosfere, trovanje ljudi, oštećenja podzemnih instalacija, nepovoljne promjene geotehničkih svojstava T
- Percepcija rizika (uočavanje i predviđanje) T+PR
  - indirektna šteta (gubitak vrijednosti, ugleda)
  - politički problem
- Etički aspekti (“počisti što si zaprljao”)

# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

- Pristup rješavanju problema: S-P-T metodologija

Source

Path

Target

Izvor zagađenja > put > cilj (ljudi, vodonosnici, polje, građ.)  
emisija (ispuštanje) - transfer (prijenos) – utjecaj

Stvarni problemi – kompleksniji, više izvora i ciljeva, promjenljivo u vremenu

**Bitno: prepoznati i rješavati pravi problem**

# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

- IZVOR – zagađeno tlo (industrija, otpad, promet, namjerni ili slučajni incidenti...)
  - prvenstveno kemikalije, mikroorganizmi, tehnologija
- CILJ – kompleksan problem, definira ga osjetljivost i mjesto u okolišu.
  - Maksimalna dopuštena razina utjecaja najčešće se definira kroz maksimalne dopuštene koncentracije nekog zagađivača (eventualno: razina do koje ne treba ništa poduzimati i razina na kojoj se zahtijeva intervencija)

# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

- TRANSPORT – vrijeme pronosa: minute ili stoljeća?
  - treba ocijeniti maksimalno raspoloživo vrijeme za intervenciju uključujući prepoznavanje problema, istraživanja, projektiranje zaštitnih mjera, skupljanje suglasnosti i izvedbu (što prije - što bliže izvoru)
- Pronos čestica – disperzija ( + ili - ? )

# ZAGAĐENJE TLA I PODZEMNEVODE

Kategorije putova pronosa čestica - zagađivača:

- Pare i plinovi do površine,
- Izluživanje i erozija tla do površinskih voda,
- Izluživanje (otpuštanje čestica) do drenaže
- Luženje prema dubljim vodonosnicima
- Direktno preuzimanje u hranidbenom lancu
- Prodiranje i odstranjivanje



# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA KROZ TLO I PODZEMNU VODU

- Rezultat: prognoza utjecaja na cilju u nekom budućem vremenu
- Početno modeliranje s pretpostavljenim, dostupnim ili procijenjenim parametrima radi uvida u: očekivane utjecaje, osjetljivost rezultata na promjene parametara
- Istraživanja za određivanje parametara (hidrološka, geotehnička, fizikalno-kemijska svojstva, biološka..)
- Modeliranje pronosa s točnijim parametrima, za varijante rješenja o odabrano rješenje
- Nezahvalan posao: rješenje se “dokazuje” za daleku budućnost, a troškovi se stvaraju danas

# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

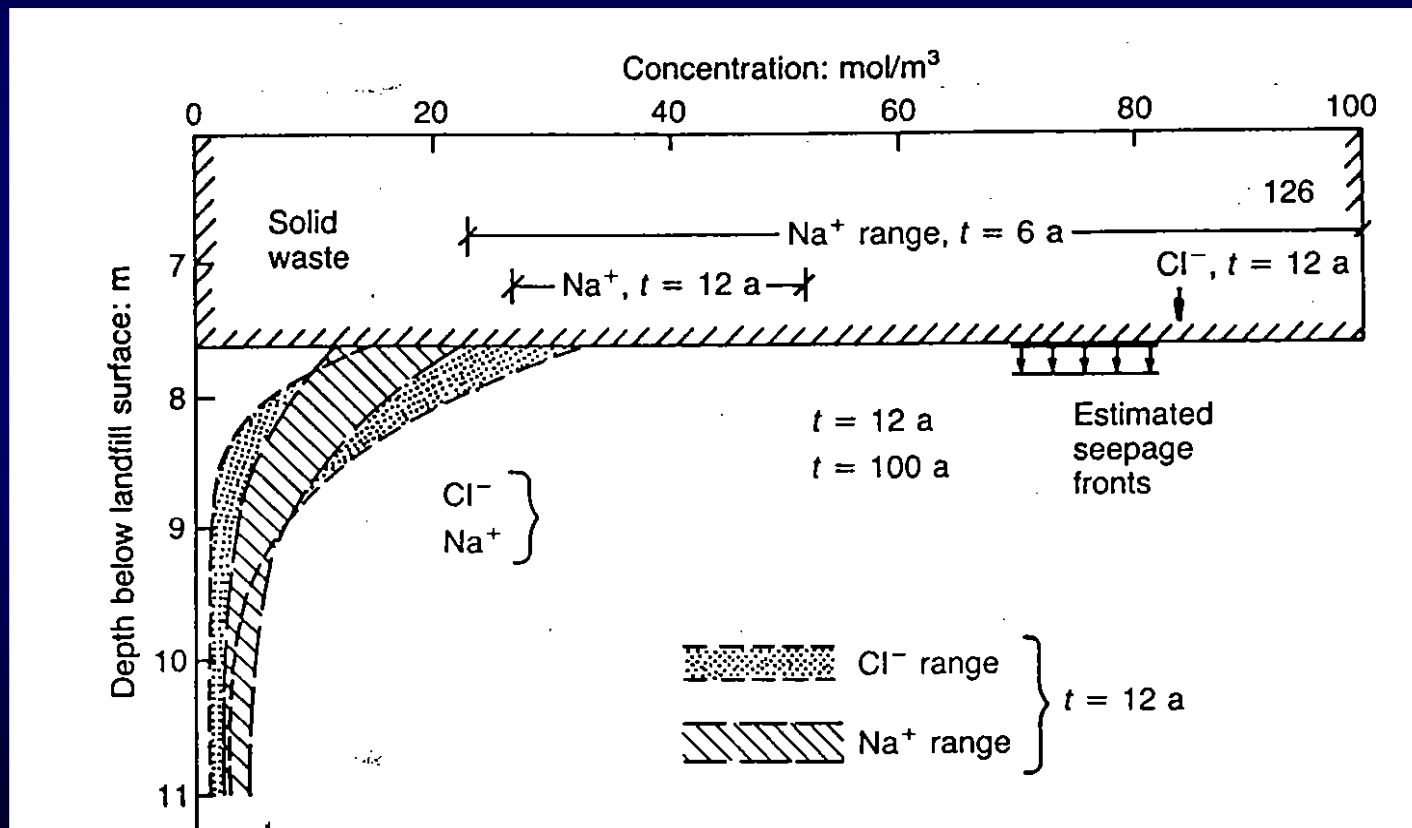
- Razvoj u vremenu, mjesto (geometrija), koncentracija (masa u jediničnom volumenu)

Osnovni fizikalni procesi:

- **Advekcija** – prijenos (pronos, transport) čestica s fluidom (lat. *advehere-dovoziti*)
- **Difuzija** – spontano miješanje ili prodiranje jedne tvari u drugu neposredno ili kroz poroznu pregradu; transport mase iz veće koncentracije u manju (lat. *razliti, rasprostirati, raširiti*)
- **Disperzija** – mehaničko miješanje (*rasap, širenje*), širenje kroz heterogenosti u polju tečenja

# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

- Razvoj u vremenu, mjesto (geometrija), koncentracija (masa u jediničnom volumenu)
- Primjer: tlo ispod odlagališta otpada, mjerene conc. Na, Cl



# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

- Kemijski procesi:

**Adsorpcija** – (*lat. sorbere-srkati, upijati, usisavati*) – nakupljanje, pripijanje tvari (čestica) na druge tvari, tijela samo površinskim slojem (apsorpcija – čitavom masom; upijanje, otapanje)

Process	Definition	Significance
Sorption	Partitioning of contaminant between pore water and porous medium	Adsorption reduces rate of contaminant migration and makes contaminant removal difficult
Radioactive Decay	Irreversible decline in the activity of a radionuclide	Important attenuation mechanism when half-life for decay is $\leq$ residence time; results in byproducts
Dissolution/Precipitation	Reactions resulting in release of contaminants from solids or removal of contaminants as solids	Dissolution is significant at the source or at the migration front; precipitation is an important attenuation mechanism, particularly in high pH system ( $\text{pH} > 7$ )
Acid/Base	Reactions involving a transfer of protons ( $\text{H}^+$ )	Controls other reactions (e.g., dissolution/precipitation)

Complexation	Combining of anions and cations into a complex form	Affects speciation that can affect sorption, solubility, etc.
Hydrolysis/Substitution	Reaction of a halogenated organic compound with water or a component ion of water (hydrolysis) or with another anion (substitution)	Typically makes an organic compound more susceptible to biodegradation and more soluble
Oxidation/Reduction (Redox)	Reactions involving a transfer of electrons	Important attenuation mechanism in terms of controlling precipitation of metals
Biodegradation	Reactions controlled by microorganisms	Important attenuation mechanism for organic compounds; may result in undesirable byproducts

# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

- Osnovne jednačbe

$J_{ad} = qc - \theta D \frac{\partial c}{\partial x}$ <p><math>J_{ad}</math> - adveksijsko-disperzivno-difuzijski fluks mase (masa/površina/vrijeme)</p> $m(t) = A_0 \int J_{ad} dt$	<p><math>q</math> = Darcyev fluks  <math>c</math> = koncentracija mase  <math>\theta</math> = porozitet (volumska vlažnost)  <math>D</math> = disperzijsko difuzijski koeficijent  <math>x</math> = smjer transporta</p>
$q = ki = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \theta v$	<p><math>k</math> = koef. propusnosti  <math>i</math> = hidraulički gradijent  <math>h</math> = ukupni potencijal</p>
$D = \alpha_L v + D^*$	<p><math>\alpha_L</math> = longitudinalna disperzivnost tla  <math>D^*</math> = efektivni difuzijski koeficijent</p>

- Osnovne jednadžbe

<p>za reaktivne otopine</p> $\frac{\partial m}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{ad} + S$	<p><math>m =</math> ukupna masa zagadjuvača  <math>t =</math> vrijeme  <math>S =</math> opći izvor ili ponor mase</p>
$m = \theta c + \rho_d c_s = \theta R_d c$	<p><math>\rho_d =</math> suha gustoca tla  <math>c_s =</math> adsorbirana koncentracija zagadjuvača  <math>R_d =</math> retardacijski koeficijent</p>
$R_d = 1 + \left( \frac{\rho_d}{\theta} \right) K_d$	$K_d = \frac{c_s}{c}$
$S = -\lambda_w \theta c - \lambda_s \rho_d c_s = -\theta \Lambda c$	<p><math>\lambda_w =</math> kons tan ta raspada u vodenoj otopini  <math>\lambda_s =</math> kons tan ta raspada u cvrstoj fazi  <math>\Lambda =</math> zajednicka kons tan ta raspada</p>
$\Lambda = \lambda_w + \lambda_s (R_d - 1)$	
$\lambda = \frac{0.693}{t_{50}}$	<p><math>t_{50} =</math> vrijeme poluraspada</p>
$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \Lambda c$	<p>opća forma advekcijsko-disperzijsko-reaktivne jednadžbe za 1-D transport s linearnim reverzibilnim upijanjem (sorpcijom) i raspadom prvog reda- stacionarno tečenje i konstantni porozitet</p>

# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

## Osnovne jednadžbe - koeficijenti

Table 6 - Free-solution diffusion coefficients for representative inorganic molecules at infinite dilution in water at 25°C (after Robinson and Stokes 1959, Shackelford 1989, Shackelford and Daniel 1991).

Molecule	$D_0$ ( $\times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s)
HBr	3.40
HCl	3.34
CsCl	2.04
KBr	2.02
KI	2.00
KCl	1.99
NaBr	1.63
NaCl	1.61
NaI	1.61
BaCl <sub>2</sub>	1.39
LiCl	1.37
CaCl <sub>2</sub>	1.34

Table 7 - Effect of molar concentration on free-solution molecular diffusion coefficients at 25°C (after Robinson and Stokes 1959, Shackelford 1989).

Conc. (M)	Diffusion Coefficient, $D_0$ ( $\times 10^{-9}$ m <sup>2</sup> /s)					
	∞(1)	0.05	0.5	1.0	2.0	3.0
HBr	3.40	3.15	3.38	3.87	ND	ND
HCl	3.34	3.07	3.18	3.43	4.04	4.65
KBr	2.02	1.89	1.88	1.97	2.13	2.28
KCl	1.99	1.86	1.85	1.89	2.00	2.11
KI	2.00	1.89	1.95	2.06	2.25	2.44
NaBr	1.63	1.53	1.54	1.59	1.66	ND
NaCl	1.61	1.51	1.47	1.48	1.52	1.57
NaI	1.61	1.52	1.58	1.66	1.84	1.99
CaCl <sub>2</sub>	1.34	1.12	1.14	1.20	1.31	1.27

(1) Infinite dilution values from Table 3.

Table 5 - Free-solution diffusion coefficients for representative inorganic ions at infinite dilution in water at 25°C (after Shackelford 1989, Shackelford and Daniel 1991).

Ion	$D_0$ ( $\times 10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)
OH <sup>-</sup>	52.8
F <sup>-</sup>	14.7
Cl <sup>-</sup>	20.3
Br <sup>-</sup>	20.8
I <sup>-</sup>	20.4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.87
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	19.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10.6
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9.22
H <sup>+</sup>	93.1
Li <sup>+</sup>	10.3
Na <sup>+</sup>	13.3
K <sup>+</sup>	19.6
Rb <sup>+</sup>	20.7
Cs <sup>+</sup>	20.5
Be <sup>2+</sup>	5.98
Mg <sup>2+</sup>	7.05
Ca <sup>2+</sup>	7.92
Sr <sup>2+</sup>	7.90
Ba <sup>2+</sup>	8.46
Pb <sup>2+</sup>	9.25
Cu <sup>2+</sup>	7.13
Fe <sup>2+</sup>	7.19
Cd <sup>2+</sup>	7.17
Zn <sup>2+</sup>	7.02
Ni <sup>2+</sup>	6.79
Fe <sup>3+</sup>	6.07
Cr <sup>3+</sup>	5.94
Al <sup>3+</sup>	5.95

Table 9 - Hydrolysis half-lives for selected organic compounds at 25°C (from ETC8 1993).

Compound	$t_{0.5}$ (days)
methyl chloride	334
ethyl chloride	38
dichloromethane	573
trichloromethane	508
tetrachloromethane <sup>(1)</sup>	2500
1,1,1-trichloroethane <sup>(2)</sup>	422
1,1,1,2-tetrachloroethane	36

Table 10 - Half-lives of halogenated aliphatics for first-order decay in the presence of zero-valent iron filings (from Shackelford 1996).

Organic Compound	$t_{0.5}$	
	(hours) <sup>(1)</sup>	(days) <sup>(2)</sup>
<b>Methanes:</b>		
carbon tetrachloride	0.34	5.4
tetrachloromethane		
tribromomethane	0.24	
trichloromethane	33.0	
dichloromethane	NA	6.5
<b>Ethanes:</b>		
hexachloroethane	0.22	6.1
1,1,2,2-tetrachloroethane	19.2	10.2
1,1,1,2-tetrachloroethane	4.4	5.2
1,1,1-trichloroethane	5.3	5.5
1,1,2-trichloroethane		7.8
<b>Ethenes:</b>		
tetrabromoethene		6.7
tetrachloroethene	17.9	13.9
trichloroethene	13.6	7.1
1,1-dichloroethene	40.0	55
trans-dichloroethene	55.0	6.7
cis-dichloroethene	432.0	37
vinyl chloride	106.0	14.9

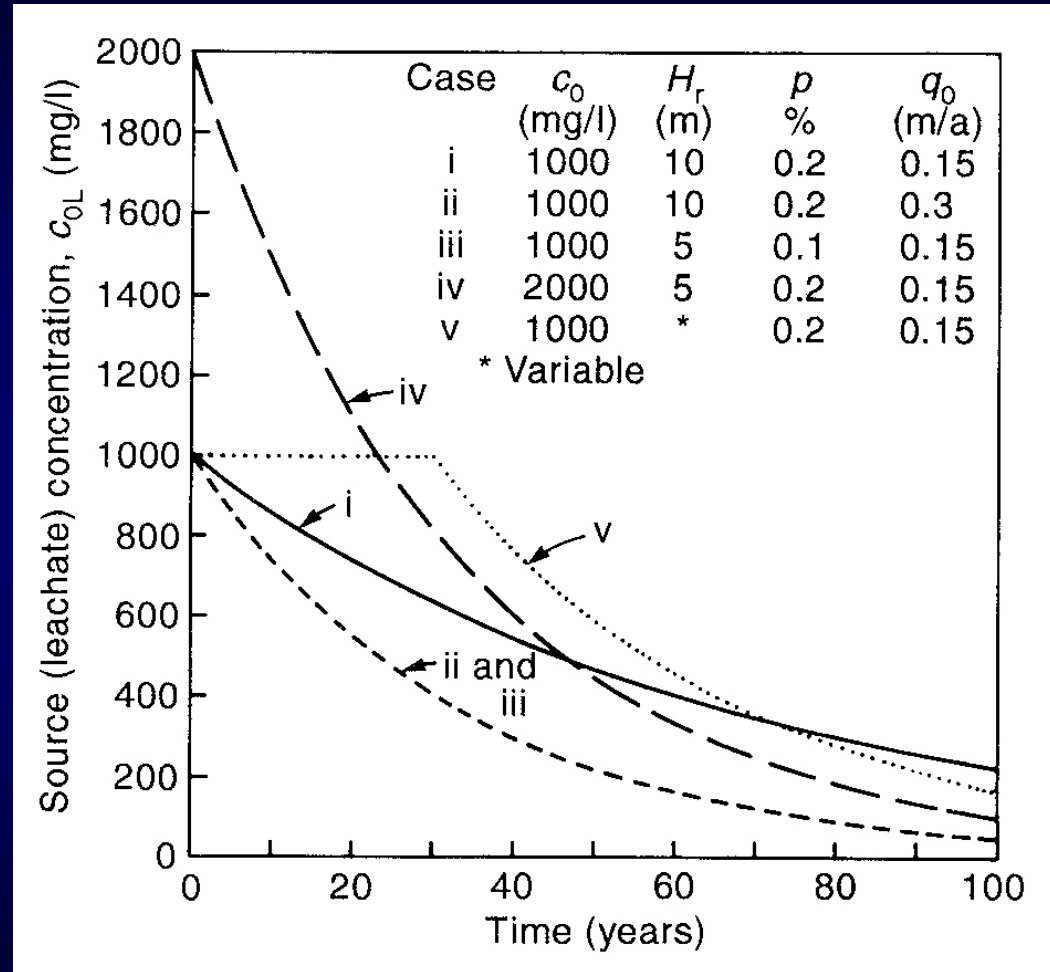
(1) from Gillham et al. (1993)

(2) from Wilson (1995)

ion

# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

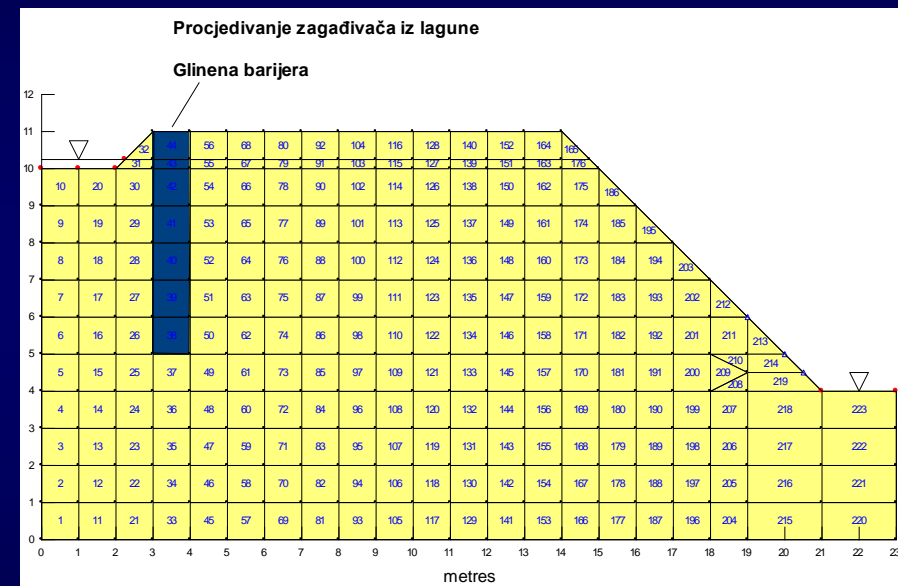
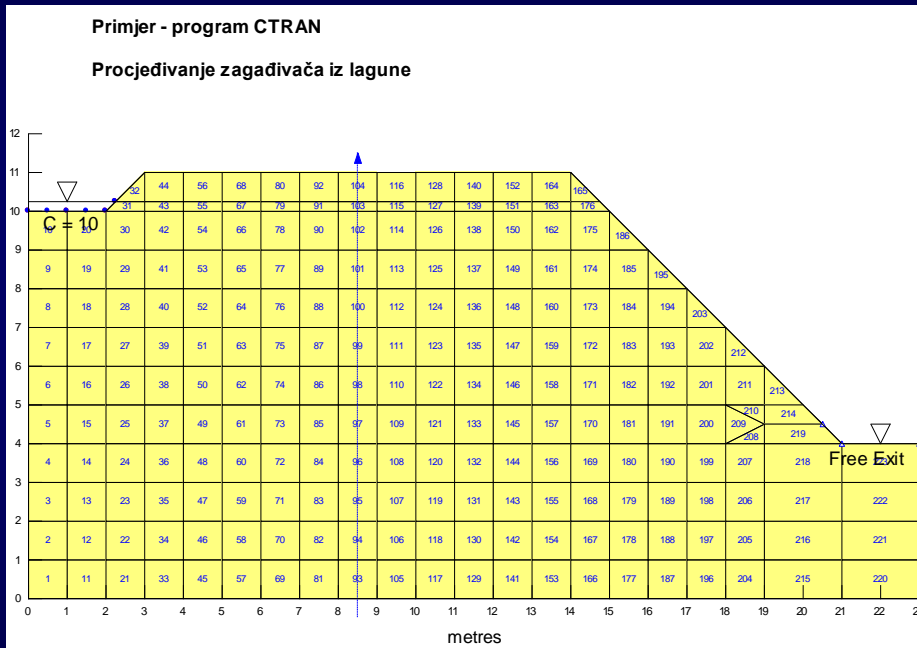
Osnovne jednačbe - primjeri





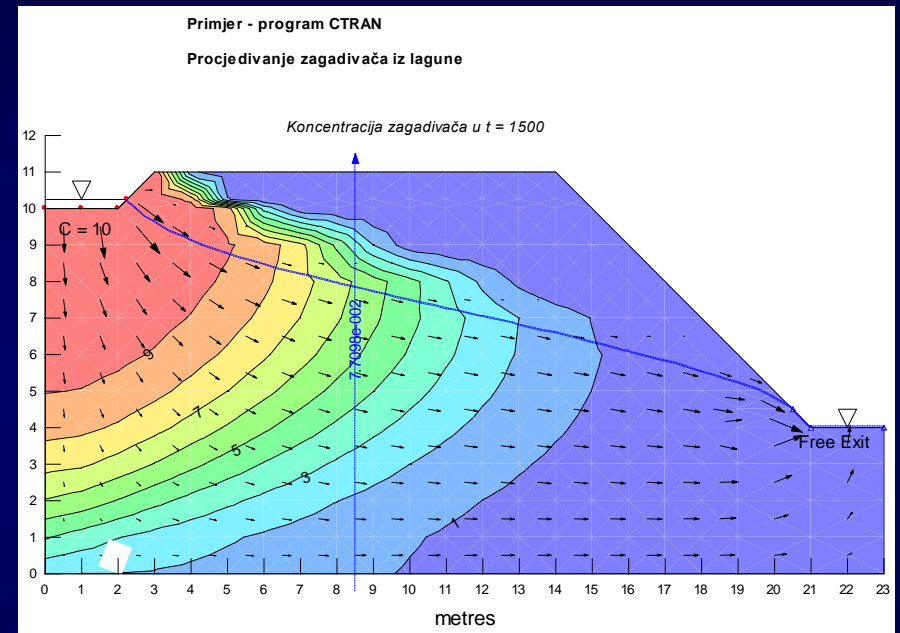
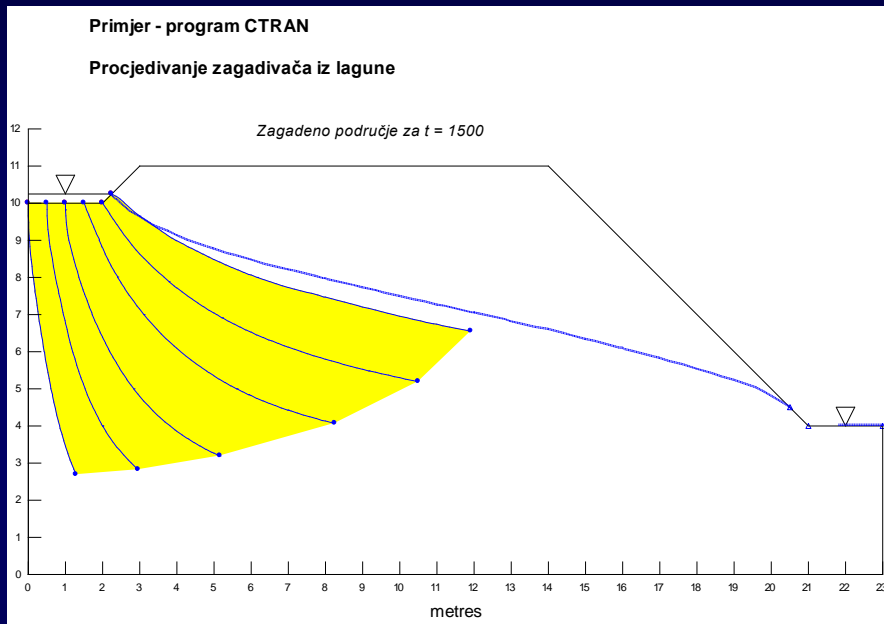
# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

## Osnovne jednačbe - primjeri



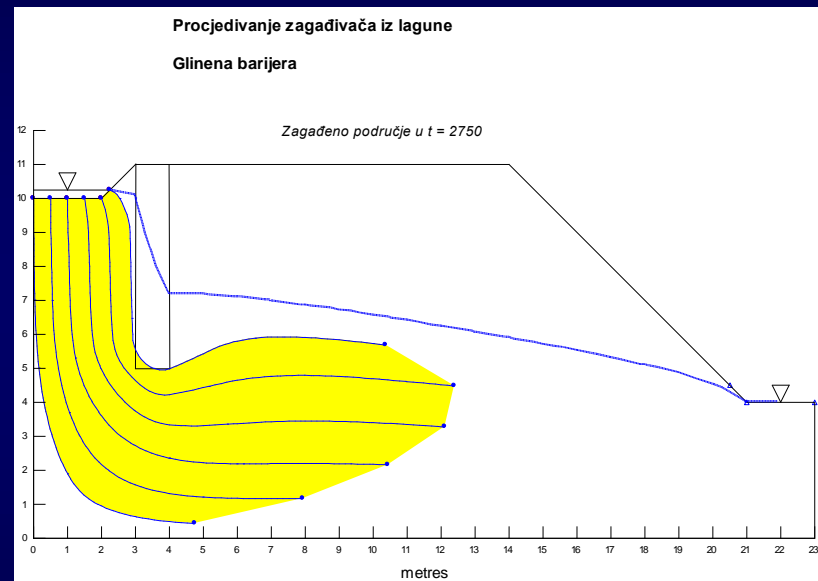
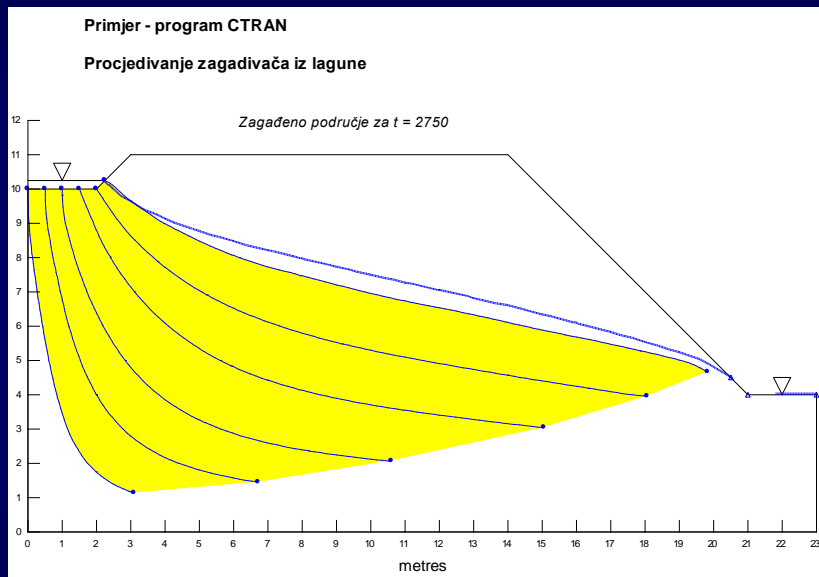
# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

## Osnovne jednačbe - primjeri



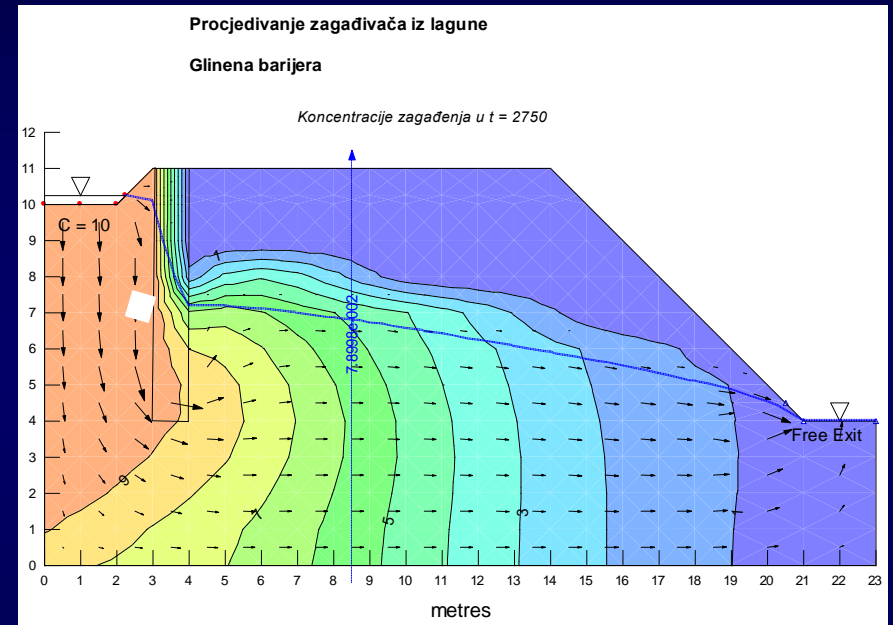
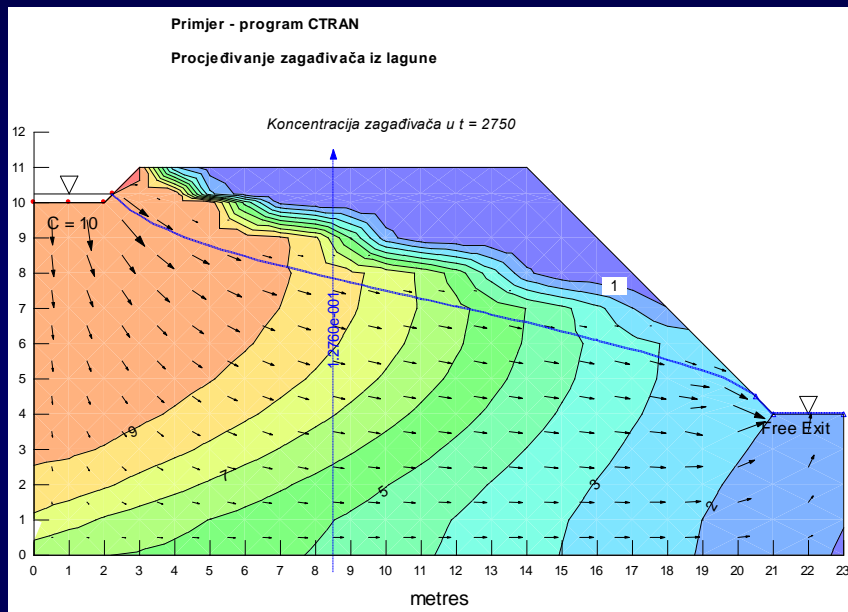
# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

Osnovne jednačbe - primjeri



# MODELIRANJE PRONOSA ČESTICA

## Osnovne jednačbe - primjeri



# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- Ukoliko sve prethodne analize i procjene pokažu da očekivani utjecaj nije prihvatljiv, treba poduzeti mjere za poboljšanje, popravak ili sanaciju (remedial measures)
- Načelno su te mjere:
  - 1. skupe                      2. vremenski zahtjevne
  - 3. nesavršene              4. nesigurne za buduće efekte
- Potrebne su cost-benefit analize za razne varijante

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

S - tehničke mjere na izvoru ispuštanja:

- Odstranjivanje izvora iskapanjem
- Uništavanje izvora (bio)kemijskim ili fizikalnim postupcima
- Smanjivanje ispuštanja zagađenja (bio)kemijskom ili fizikalnom stabilizacijom
- Sprečavanje širenja zagađenja (containment) inženjerskim barijerama (pregradama)

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

P - tehničke mjere na putu pronosa čestica:

- pregrađivanje ili presijecanje puta
- Preusmjeravanje na manje osjetljivi cilj
- Stvaranje uspora ili zastoja na putu
- Povećana (bio)kemijska aktivnost na putu
- Povećano otapanje ili raspršenje zagađivača na putu

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

T – moguće tehničke mjere na cilju:

- Preseliti, pomaknuti cilj
- Ojačati cilj (poboljšanje cilja)
  
- Ovo može biti efikasno npr. kad su ciljevi urbano podzemlje, tvornička infrastruktura, instalacije, pa čak i životinje
- Za ljude, vodonosnike, ili poljoprivredno zemljište uglavnom nema smisla



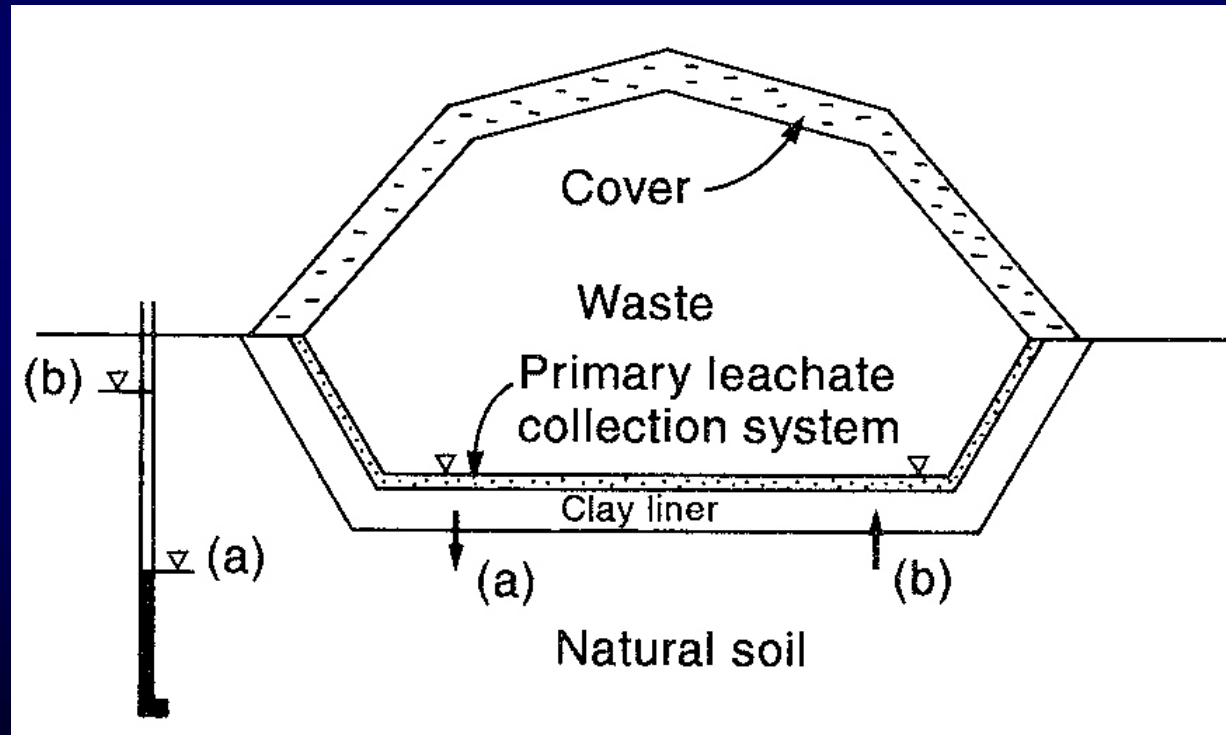
# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

Sprečavanje širenja zagađenja – strategije:

- Projektiranje i izvedba potpunog sprečavanja širenja za određeni period trajanja (a nakon toga bez kontrole)
- Projektiranje za kontinuirano kontrolirano ispuštanje zagađivača u okoliš
- Projektiranje potpunog sprečavanja širenja s praćenjem i uvedenim postupcima za obnovu ugrađenih materijala ili sanacionim mjerama ukoliko sprečavanje zakaže

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- Sprečavanje barijerama ( prvenstveno za hidrostatske potencijale, ali treba uključiti i druge potencijale npr. kemijske, električne, osmozu, temperaturne razlike, istjecanje plina)

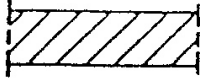
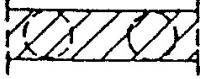
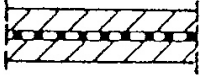
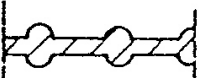
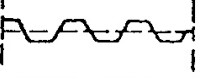



# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- Horizontalne barijere ispod zagađenog područja (injektiranje ili mlazno injektiranje tla)
- Vertikalne barijere:
  - plitki iskopi s umetanjem geomembrane
  - zabijanje betonskog ili čeličnog žmurja ili HDPE membranskih elemenata u tlo
  - vibro zabijanje čeličnih profila u kombinaciji s injektiranjem
  - zagatne stijene od sekantnih pilota: bušeni, miješanjem u tlu (deep mixing) ili mlaznim injektiranjem

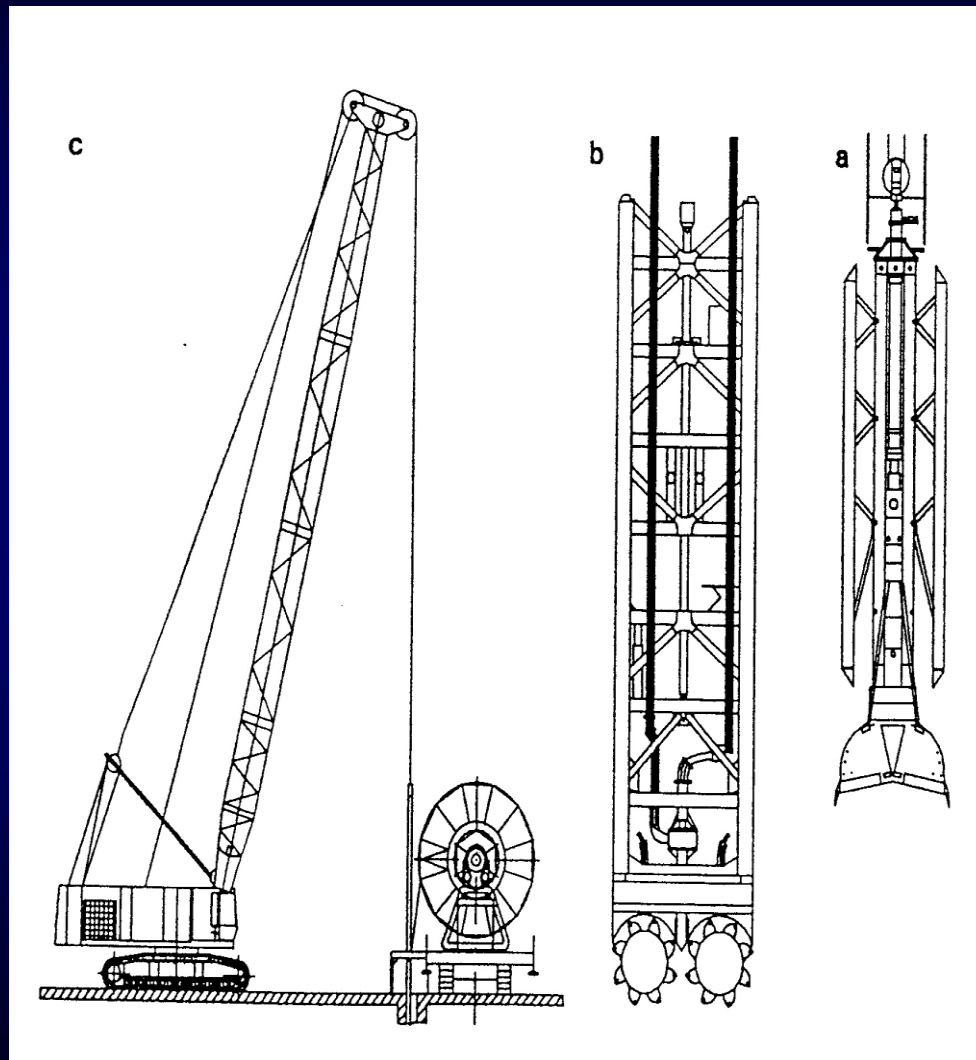
# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- Vertikalne barijere

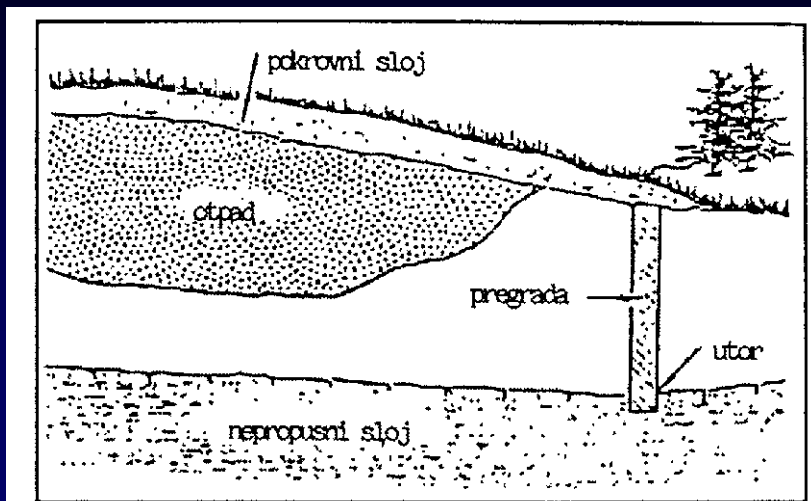
Principle	Cut-off wall system	Plan view	Soils	Material
Excavation of soil in place and installation of a sealing material	Diaphragm wall one-phase method		Limited application in the case of peat/humic acid	Bentonite-cement suspension with/without filler
	Diaphragm wall two-phase method		As above	Bentonite suspension, natural concrete
	Composite diaphragm wall		As above, only in the one-phase method	Bentonite-cement suspension, add. sealing elements (e.g. HDPE)
Displacement of soil in place and installation of a sealing material	Thin wall		Suitable for driving or vibrating in	Bentonite-cement susp. with filler
	Sheet pile wall			Steel
Reduction of permeability of soil in place	Grout curtain		Injectable Soils	Cement, clay-cement, susp., silica gels

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

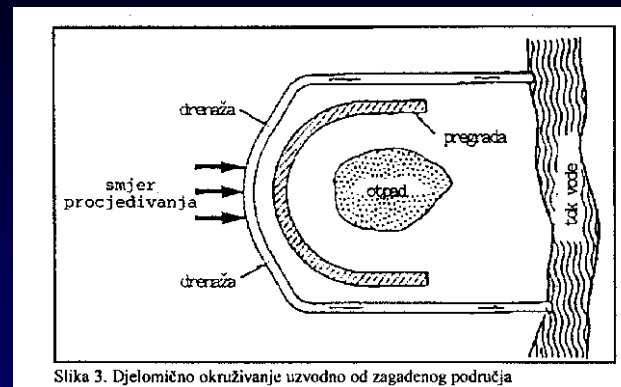
- Vertikalne barijere - izvedba



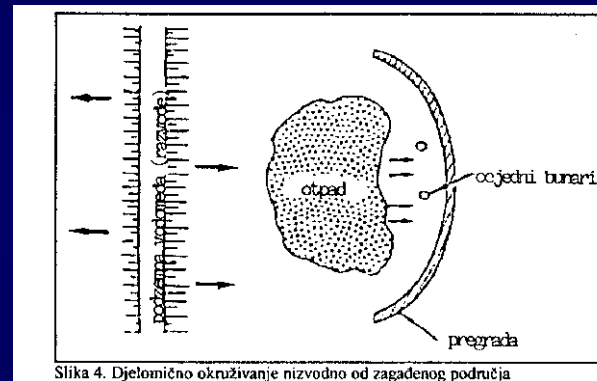
# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE



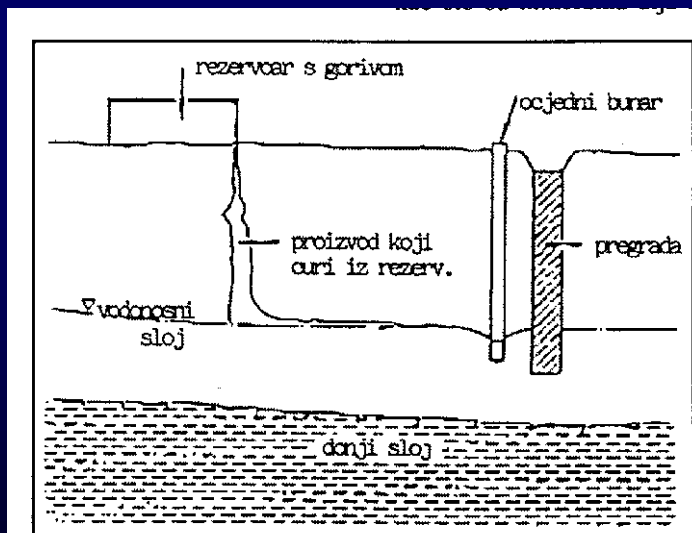
Slika 1. Pregrada utisnuta u nepropusni sloj koji se nalazi ispod zagađenog područja



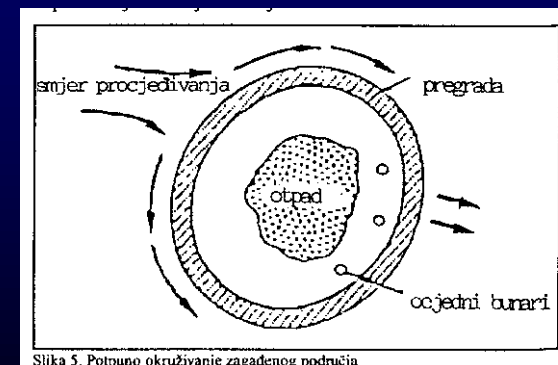
Slika 3. Djelomično okruživanje uzvodno od zagađenog područja



Slika 4. Djelomično okruživanje nizvodno od zagađenog područja



Slika 2. Lebdeća pregrada



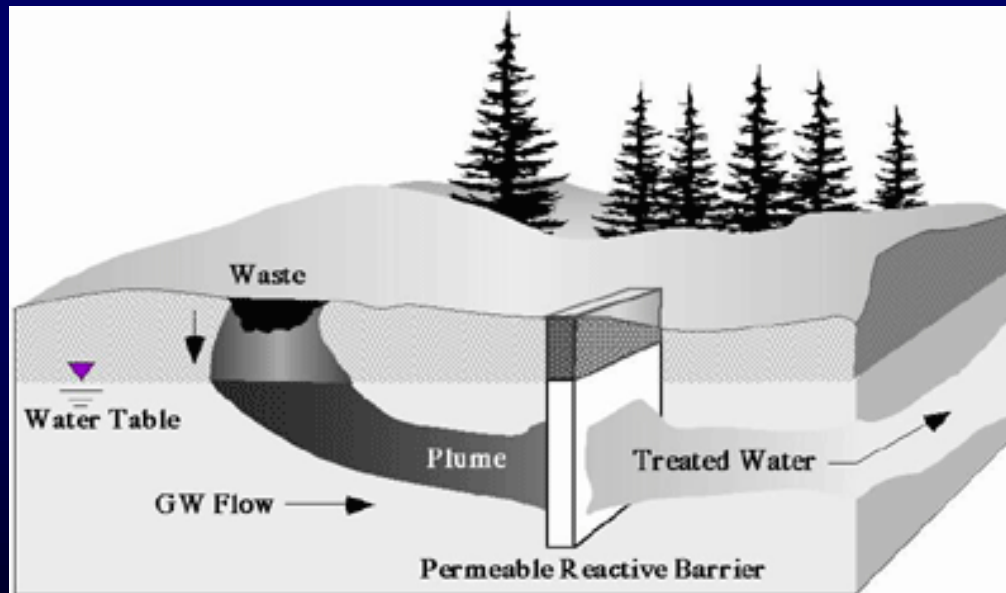
Slika 5. Potpuno okruživanje zagađenog područja

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- Dijafragme s isplakom su često u upotrebi radi uhodane tehnike iskopa dubljeg rova i postizanja većih dubina – problem stabilnosti !
  - Ispuna rova bentonitno-glinenom isplakom
  - Bentonitno-cementna isplaka (samostvrdnjavajuća)
  - Glinobetonska dijafragma
  - Ispuna samostvrdnjavajućom isplakom i umetanjem geomembrane

# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

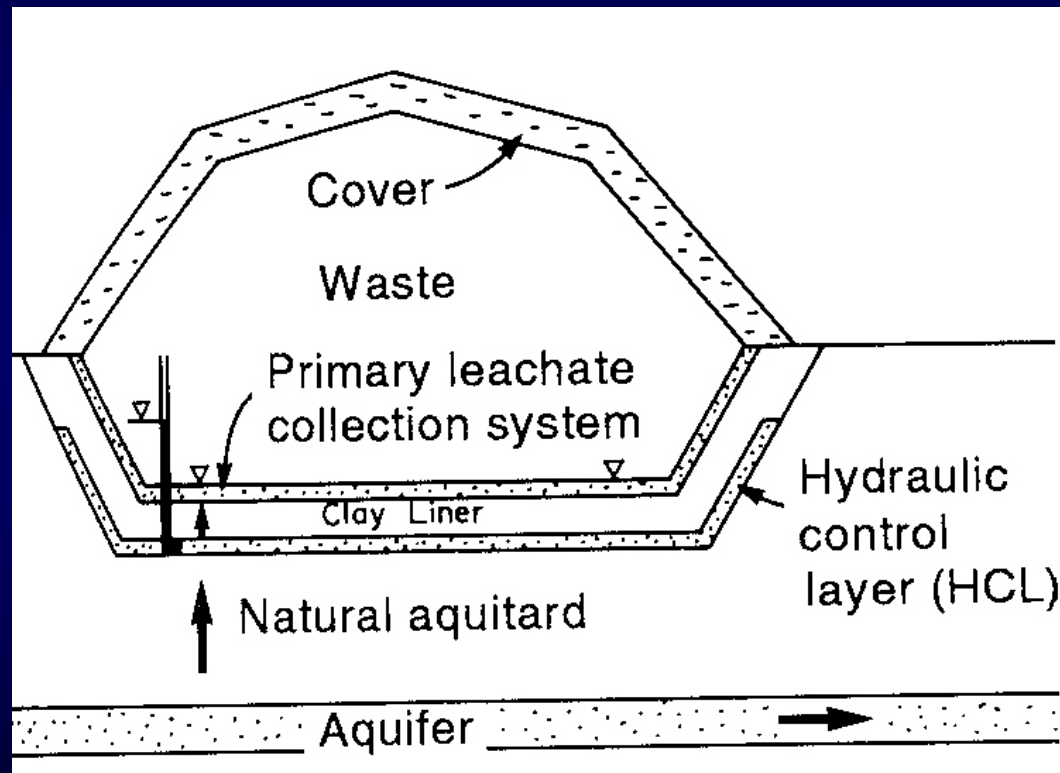
- Biobarijere npr. u naftnim bušotinama za začepljenje propusnih slojeva
- Propusne reaktivne barijere ( s materijalima koji absorbiraju zagađivače, a propuštaju vodu) – kemijski inženjering





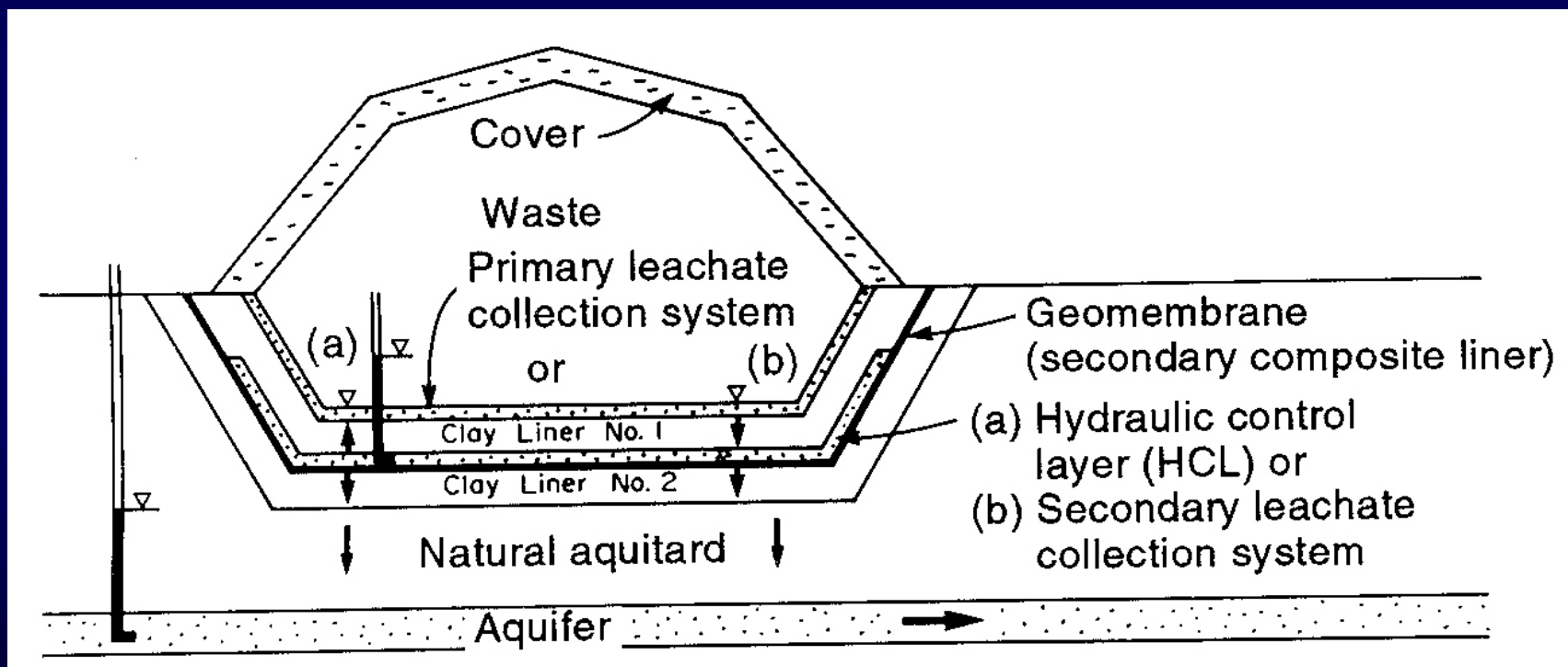
# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- “Hidraulička zamka” – geohidrološka izolacija



# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- “Hidraulička zamka” – geohidrološka izolacija



# MJERE SANACIJE I ZAŠTITE

- In-situ poboljšanje
  - Izolacija barijerama kao gore, kratkotrajno
  - In-situ obrade da se izbjegne potreba za dugotrajnim sprečavanjem širenja (izbjegavanje “kemijske tempirane bombe” u budućnosti)