

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvorna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ošep, N., 2016. Vpliv prekrova na transport radionuklidov iz odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentor Vrankar, L.): 59 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5975/>

Datum arhiviranja: 5-10-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ošep, N., 2016. Vpliv prekrova na transport radionuklidov iz odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Vrankar, L.): 59 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5975/>

Archiving Date: 5-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

NEJC OŠEP

**VPLIV PREKROVA NA TRANSPORT
RADIONUKLIDOV IZ ODLAGALIŠČA NIZKO IN
SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV**

Diplomska naloga št.: 330/VKI

**THE INFLUENCE OF COVER ON TRANSPORTATION
OF RADIONUCLIDES FROM LOW AND
INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE
DISPOSAL FACILITY**

Graduation thesis No.: 330/VKI

Mentor:

prof. dr. Goran Turk

Somentor:

dr. Leopold Vrankar

Ljubljana, 23. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERATTA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent **Nejc Ošep**, vpisna številka **26106137**, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Vpliv prekrova na transport radionuklidov iz odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov**

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	621.039.7(043.2)
Avtor:	Nejc Ošep
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	dr. Leopold Vrankar
Naslov:	Vpliv prekrova na transport radionuklidov iz odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	59 str., 8 pregl., 28 sl., 51 en.
Ključne besede:	Radioaktivni odpadki, odlagališče radioaktivnih odpadkov, transport radionuklidov, prekrov, modeliranje, porozna snov, prekrov

Izvleček

Uporaba radioaktivnih snovi v znanstvene namene, industriji, medicini, ter za pridobivanje jedrske energije povzroča nastajanje radioaktivnih odpadkov. Pred njihovimi škodljivimi učinki se lahko zavarujemo tako, da poskrbimo za njihovo varno odlaganje. Razumevanje transportnih mehanizmov v porozni snovi je ključno, da zagotovimo dolgotrajno varnost odlagališč radioaktivnih odpadkov. S pomočjo matematičnih modelov lahko opišemo podzemne tokove ter možne Transporte radionuklidov iz odlagaliča skozi geološke formacije.

V teoretičnem delu naloge so opisane fizikalne osnove radioaktivnosti, sistem razvrščanja radioaktivnih odpadkov ter odlagalne možnosti za nizko in srednje radioaktivne odpadke, katerim sledijo podatki o vrstah in količinah radioaktivnih odpadkov v Sloveniji. V nadaljevanju sledijo teoretične osnove toka podzemne vode ter z njo povezani prenosni pojavi v porozni snovi.

Eksperimentalni del obsega izdelavo modela odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. Izdelana sta bila model odlagališča NSRAO brez prekrova ter model odlagališča NSRAO s prekvrom, na podlagi katerih smo primerjali vpliv prekrova na tok vode skozi odlagališče in transport radionuklidov cezija (^{137}Cs) in joda (^{129}I). Modeli in izračuni so bili izdelani s pomočjo programskega paketa HYDRUS-1D.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	621.039.7(043.2)
Author:	Nejc Ošep
Supervisor:	Prof. Goran Turk, Ph. D.
Co-advisor:	Leopold Vrankar, Ph. D.
Title:	The influence of cover on transportation of radionuclides from low and intermediate level radioactive waste disposal facility
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Notes:	59 p., 8 tab., 28 fig., 51 eq.
Keywords:	Radioactive waste, radioactive waste disposal facility, radionuclide migration, modeling, porous media, cover

Abstract

The usage of radioactive substances in science, industry, medicine and nuclear power plants is generating radioactive waste. The only way we can effectively protect ourselves from their deleterious effects is by appropriate waste disposal. In order to secure long-term safety of the disposal facilities, we have to understand the transport mechanisms in porous materials. We can then use mathematical models to describe the underground currents and possible transportation routes of radionuclides from the disposal facilities through geological formations.

Theoretical part of the thesis contains the description of physical principles of radioactivity, classification system of radioactive waste and disposal possibilities for low-level and intermediate waste with information on type and quantity of radioactive waste in Slovenia. Theoretical basis of groundwater flow and related phenomena of flow in porous materials is also described.

Experimental part describes the making of mathematical models for disposal facilities, that deal with low and intermediate level waste (LILW). First model describes the disposal of LILW without cover, the second describes the disposal of LILW with cover layer. The results were summarized and indicate the influence of cover on groundwater flow through hazardous waste dump and transportation of radionuclides of Caesium (^{137}Cs) and Iodine (^{129}I). Models and calculations were made with HYDRUS-1D software.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Goranu Turku, ter somentorju dr. Leopoldu Vrankarju. Zahvaljujem se tudi mag. Sandiju Viršku za pomoč in koristne nasvete pri modeliranju.

Zahvaljujem se tudi družini, ki mi je omogočila študij, ter Katarini za podporo in potrpežljivost v času študija in med izdelavo diplomske naloge.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERATTA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
1 UVOD.....	1
2 TEORETIČNE OSNOVE	2
2.1 Osnove radioaktivnosti.....	2
2.1.1 Jedro atoma	2
2.1.2 Radioaktivni razpad	3
2.1.2.1 Razpad alfa.....	5
2.1.2.2 Razpad beta.....	5
2.1.2.3 Razpad gama.....	5
2.1.2.4 Nevtronsko sevanje.....	5
2.1.3 Jedrske reakcije.....	6
2.2 Radioaktivni odpadki	6
2.2.1 Razvrščanje radioaktivnih odpadkov	7
2.2.1.1 Dolgoživost in kratkoživost radioaktivnih odpadkov	8
2.2.2 Politika ravnanje z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom	8
2.2.3 Odlagalni sistemi za NSRAO	9
2.2.3.1 Odlaganje v vkopane silose	9
2.2.3.2 Odlaganje v podzemne rove.....	11
2.2.3.3 Površinsko odlagališče.....	13
2.2.4 Podatki o radioaktivnih odpadkih v Sloveniji.....	15
2.2.4.1 Radoaktivni odpadki in izrabljeno jedrsko gorivo v NEK.....	16
2.2.4.2 Radoaktivni odpadki na inštitutu Jožef Stefan.....	19
2.2.4.3 Radioaktivni odpadki v zdravstvu	19
2.2.4.4 Centralno skladišče radioaktivnih odpadkov (CSRAO).....	19

3	TRANSPORT RADIONUKLIDOV SKOZI POROZNO SNOV	22
3.1	POROZNA SNOV	22
3.1.1	Osnovne lastnosti porozne snovi	23
3.1.2	Fizikalni modeli	25
3.1.2.1	Kontinuumski model.....	25
3.1.2.2	Dvojni porozni model	26
3.2	GIBANJE PODZEMNE VODE	27
3.2.1	Darcyjev zakon	27
3.2.2	Hidravlična prevodnost.....	29
3.2.3	Glavne enačbe toka	30
3.2.3.1	Nespremenljiv nasičen tok.....	30
3.2.4	Transportni mehanizmi	31
3.2.4.1	Advekcija	31
3.2.4.2	Difuzija in disperzija.....	32
3.2.5	Enačbe transporta snovi	33
3.2.6	Sorpcija in ostale kemijske reakcije.....	36
3.2.6.1	Faktorji, ki vplivajo na sorpcijo	36
3.2.6.2	Sorpcijske izoterme.....	37
3.2.7	Tok in transport v nezasičeni coni	37
3.2.7.1	Nezasičena hidravlična prevodnost.....	39
3.2.7.2	Enačba nezasičenega toka.....	40
4	MODEL ODLAGALIŠČA NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV	41
4.1	Programski paket HYDRUS-1D.....	44
4.1.1	Matematično modeliranje pretoka vode v programskem paketu.....	44
4.1.2	Metoda končnih diferenc	45
4.1.3	Metoda končnih elementov	46
4.2	Model transporta	48
4.2.1	Geometrija modela.....	48
4.2.2	Lastnosti uporabljenih materialov.....	50
4.2.3	Robni pogoji	51
4.2.4	Migracije radionuklidov.....	51
4.3	Rezultati.....	52
4.3.1	Pretok vode skozi model odlagališča	52
4.3.2	Migracije radionuklidov skozi odlagališče	53
5	ZAKLJUČEK.....	57
	VIRI.....	58

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: NSRAO, uskladiščeni leta 2014 v NEK	16
Preglednica 2: Število izrabljenih gorivnih elementov v zadnjih 10 letih	18
Preglednica 3: Vrste odpadkov in število paketov v CSRAO konec leta 2014	20
Preglednica 4: Poroznost in prepustnost za nekatere materiale	24
Preglednica 5: Hidravlična prevodnost K za različne materiale	29
Preglednica 6: Hidravlične lastnosti uporabljenih materialov v modelu	50
Preglednica 7: Parametri materialov glede na izbran radionuklid in parametri radionuklida	51
Preglednica 8: Lastnosti uporabljenih radionuklidov	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz silosa v odlagališču Forsmark na Švedskem.....	10
Slika 2: Obstoječe odlagališče Olkiluoto na Finskem	11
Slika 3: Shematski prikaz odlaganja v podzemnih rovih.....	12
Slika 4: Shematski prikaz odlagališča Forsmark na Švedskem.....	13
Slika 5: Shematski prikaz odlagališča El Cabril.....	15
Slika 6: Sistem odvodnjavanja v površinskem odlagališču Centre de la Manche.....	15
Slika 7: Količina RAO v skladišču NEK.....	17
Slika 8: Zamenjava izrabljenih gorivnih elementov in število elementov v bazenu NEK.....	18
Slika 9: Število paketov in deleži posameznih vrst radioaktivnih odpadkov, skladiščenih v CSRAO konec leta 2014	21
Slika 10: Prostornina skladiščenih radioaktivnih odpadkov v CSRAO ob koncu posameznega leta ...	21
Slika 11: Kontinuumski model	26
Slika 12: Dvojni porozni model.....	27
Slika 13: Izguba tlačne višine v peščenem vzorcu.....	27
Slika 14: Elementarni kontrolni volumen	30
Slika 15: Faktorji, ki vplivajo na longitudinalno disperzijo	33
Slika 16: Ohranitev mase v elementarni kocki	34
Slika 17: Odnos θ in ψ v nesaturirani zemljini.....	38
Slika 18: Model odlagališča NSRAO brez prekrova	42
Slika 19: Model odlagališča NSRAO s prekrivom	43
Slika 20: Geometrija modela odlagališča NSRAO brez prekrova.....	49
Slika 21: Geometrija modela odlagališča NSRAO s prekrivom.....	49
Slika 22: Opazovalne točke na modelu odlagališča.....	50
Slika 23: Pretok vode skozi model odlagališča brez prekrova v opazovalnih točkah	52
Slika 24: Pretok vode skozi model odlagališča s prekrivom v opazovalnih točkah	53
Slika 25: Specifične aktivnosti ^{137}Cs v opazovalnih točkah modela odlagališča brez prekrova in s prekrivom	54
Slika 26: Migracije radionuklidov ^{137}Cs skozi profil modela odlagališča brez prekrova in s prekrivom	54
Slika 27: Specifične aktivnosti ^{129}I v opazovalnih točkah modela odlagališča brez prekrova in s prekrivom	55
Slika 28: Migracije radionuklidov ^{129}I skozi profil modela odlagališča brez prekrova in s prekrivom	55

1 UVOD

Radioaktivnost v sodobni družbi uporabljamo na številnih področjih. Največ radioaktivnih snovi v Sloveniji se nahaja v jedrski elektrarni Krško, kjer proizvedejo okoli 40 % vse proizvedene elektrike v Sloveniji. Poleg proizvodnje električne energije, nam radioaktivne snovi in ionizirajoče sevanje koristijo tudi v medicini in industriji, kjer bistveno izboljšujejo učinkovitost nekaterih storitev. Izhajajo tudi iz dejavnosti in procesov, kjer je radioaktivnost naravnega izvora. V to skupino spada pridobivanje in predelava različnih rud in mineralov, ki vsebujejo radioaktivne elemente. Snovi, ki pri teh dejavnostih ostanejo in so radioaktivne, imenujemo radioaktivni odpadki.

Radioaktivni odpadki so snovi, katerih uporaba ni več mogoča ali smiselna, njihova specifična aktivnost pa presega zakonsko določeno mejo. Skupna značilnost vseh odpadkov je, da predstavljajo nevarnost za ljudi in okolje, zato je potrebno z njimi ravnati tako, da se morebitno tveganje zmanjša na najmanjšo sprejemljivo raven.

Odlaganje te vrste odpadkov je predvsem z družbene sprejemljivosti težavno, četudi v večini sosednjih držav obstajajo številne dobre prakse varnega odlaganja. Trenutno težavo glede odlaganja predstavljajo le še visoko radioaktivni odpadki in izrabljeno jedrsko gorivo, vendar tudi na tem področju potekajo številne študije in raziskave v podzemnih laboratorijih širom Evrope.

Temeljna naloga odlaganja radioaktivnih odpadkov je izolacija radioaktivnih snovi od geosfere in biosfere. Preprečiti moramo migracijo radioaktivnih snovi iz odlagališča, kar zagotovimo z vrsto naravnih in umetnih pregrad. Umetne pregrade predstavljajo inženirski objekti, naravne pa geološke formacije, ki so sestavljene iz neporozne snovi.

Porozna snov je pojem, ki ga zasledimo na številnih področjih znanosti in tehnologije. Porozno snov sestavljata trdni del in pore, katere so lahko zapolnjene s tekočino in plini. Migracija radionuklidov je fizikalno povezana predvsem s prenosnimi pojavi v porozni snovi, ki vplivajo na hitrost in intenzivnost onesnaženja biosfere. Zaradi tega je poznavanje prenosnih pojavov v bližini odlagališča radioaktivnih odpadkov zelo pomembno. (Vrankar, 2004)

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Osnove radioaktivnosti

Osnovni elementi, ki sestavljajo vsako snov so atomi. Atom je najmanjši delec snovi, ki ga kemijsko ne moremo več razdeliti. Danes je poznanih 118 elementov, od katerih jih 98 najdemo v naravnem okolju, ostali so pridobljeni umetno. Atom je sestavljen iz atomskega jedra in elektronske ovojnice po kateri se gibljejo elektroni, ki imajo negativni električni naboj in različno energijo. Premer jedra je v primerjavi s celotnim atomom 10^5 krat manjši, vendar predstavlja 99,95 % mase atoma. Elektroni krožijo okoli jedra po elektronski ovojnici, ki določa kemične, mehanske, in ostale lastnosti atoma. Atomi istega elementa imajo vedno enako število protonov. Število protonov v atomu opiše vrstno število, ki ga označujemo s simbolom (Z). Atomi so navadno električno nevtralni, kar pomeni, da je naboj protona enak naboju elektrona in znaša $e_0 = \pm 1,06 \cdot 10^{-19}$ As. Imenujemo ga tudi osnovni ali elementarni naboj. Pri nevtralnih atomih se število protonov ujema s številom elektronov. (Ogrizek Woermann, 2012)

2.1.1 Jedro atoma

Da bi razumeli izvor radioaktivnega sevanja, je pomembno predvsem jedro atoma. Atomsko jedro sestavljajo protoni in nevtroni, ki jih v jedrski fiziki skupaj poimenujemo nukleoni. Nevtroni nimajo naboja in so nevtralni, protoni pa so pozitivno nabiti. Število protonov in nevtronov v jedru predstavlja masno število, ki ga označujemo s simbolom (A). Atom, katerega jedro ima določeno vrstno in masno število, imenujemo nuklid, katerega definiramo tako, da navedemo kemijski element X in števili Z , N in A . Med temi nukleonskimi števili obstaja povezava:

$$N = A - Z \quad (1)$$

$${}^A_ZX_N \quad (2)$$

V primerjavi s protoni, pa lahko imajo jedra istega elementa različno število nevtronov. Takšne nuklide imenujemo izotopi. Izotopi so torej elementi, ki imajo enako vrstno število Z oziroma število protonov, enako število elektronov, razlikuje pa se masa njihovih jeder, kar pomeni, da imajo različno število nevtronov N . Velika večina kemijskih elementov ima svoje izotope. Najdemo jih v naravi, ali pa so ustvarjeni umetno. Obstajajo stabilni in nestabilni, slednji težijo k razpadu z enim od naključnih procesov radioaktivnega razpada. V naravnem okolju najpogosteje najdemo izotop vodika, ki ima maso 1 in v jedru nima nevtrona. Imenujemo ga navadni ali lahki vodik. Poleg lahkega vodika poznamo še težki vodik ali devterij, ki ima masno število 2. Obstaja še izotop tricij ali supertežki vodik, ki ima masno število 3, vendar tega v naravi ne najdemo. Med težjimi jedri omenimo jedra urana, med katerimi sta

najbolj poznana ^{238}U in ^{235}U . Večina izotopov, ki jih najdemo v naravi ima določeno izotopsko sestavo, ki določa relativne masne deleže različnih izotopov v atomu. Za primer vzemimo izotopsko sestavo urana:

0,0050 – 0,0059 % ^{234}U ; 0,7198 – 0,7202 % ^{235}U ; 99,2739– 99,2752 % ^{238}U .

Poznamo več kot 3300 nuklidov, 255 od teh je stabilnih, ostala jedra pa doživijo eno ali več jedrskih sprememb in se tako preoblikujejo v stabilno jedro. Jedra nestabilnih elementov v določenem časovnem obdobju razpadejo v jedra kakega drugega elementa. Če poznamo hitrost razpadanja nekega izotopa, lahko na podlagi tega ugotovimo starost nekega predmeta. Starost nam pomaga določiti količina koncentracije izotopa v predmetu. Za potrebe medicine, jedrske tehnologije in industrije, so radioaktivne izotope večinoma ustvarili umetno. (Ogrizek Woermann, 2012)

Nuklidi, ki so nestabilni, se spreminjajo v stabilne s spremembami v jedru in oddajanjem delcev in energije. Ti procesi se imenujejo radioaktivni razpad, nestabilni nuklidi, ki so tem procesom podvrženi pa radioaktivni nuklidi ali radionuklidi. (Ogrizek Woermann, 2012)

2.1.2 Radioaktivni razpad

Pri radioaktivnem razpadu se notranja energija nestabilnih jeter manjša. Razliko energije odnesejo delci ali elektromagnetno valovanje, ki ob cepitvi iz jedra odletijo z določeno kinetično energijo. Visokoenergijske delce in elektromagnetno valovanje imenujemo radiativno sevanje. Ker je radioaktivni razpad naključen proces, nanj zunanji dejavniki, kot so tlak, temperatura, kemijske spremembe, ne vplivajo. Prav tako ne moremo z gotovostjo trditi, kdaj bo katero od jeter razpadlo, ampak lahko na podlagi večjega števila enakih jeter predvidimo verjetnost razpada. Verjetnost razpada določenega števila jeter na enoto časa opiše razpadna konstanta λ . Enačbo radioaktivnega razpada lahko definiramo z enačbo:

$$n(t) = n_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

kjer je:

$n(t)$ – število radioaktivnih jeter po času t ,

n_0 – število radioaktivnih jeter po času ($t = 0$),

λ – razpadna konstanta.

Število radioaktivnih jeter se s časom zmanjšuje eksponentno. Razpolovni čas $t_{1/2}$ je definiran kot čas, v katerem se število radioaktivnih jeter zmanjša za polovico. Razpolovni čas $t_{1/2}$ in razpadna konstanta λ sta medsebojno povezana z enačbo:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (4)$$

Glede na razpolovni čas lahko radioaktivne izotope delimo na kratkožive in dolgožive, slednji imajo razpolovne čase dolžine več milijonov let. To pomeni, da se število radioaktivnih jeder manjša zelo počasi. Predstavnik takšnih dolgoživih radionuklidov sta kalijev izotop ^{40}K z razpolovnim časom $1,28 \cdot 10^9$ let in uran ^{238}U s časom $4,468 \cdot 10^9$ let. Za razliko od dolgoživih imajo kratkoživi razpolovni čas "le" 5,29 let (^{60}Co).

Če delamo z radioaktivnimi viri je za nas pomembno število jeder, ki razpadejo v časovni enoti, katera vrsta razpada poteka, in kolikšno energijo ima odleteli delec ali elektromagnetno valovanje. Poznati moramo aktivnost izvora A . Z aktivnostjo izvora opišemo število razpadov radioaktivnih jeder v časovni enoti. Več radioaktivnih jeder vsebuje izvor in če hitreje razpadejo, večja je aktivnost izvora. Če predpostavimo, da v času dt razpade dN radioaktivnih jeder, potem je aktivnost izvora podana kot:

$$A = - \frac{dN}{dt} \quad (5)$$

Enoto za aktivnost izvora imenujemo becquerel (Bq) in je definirana kot 1 razpad/s. V literaturi še marsikje zasledimo staro enoto curie (Ci), ki je definirana z aktivnostjo 1 grama ^{226}Ra in znaša $3,7 \cdot 10^{10}$ razpadov/s. Velikokrat imamo podano tudi število razpadov na enoto časa in enoto mase nekega elementa. Imenujemo jo specifična aktivnost As in ima enoto Bq/g.

Sevanje je proces, pri katerem se prenaša energija v obliki toka delcev ali se širijo elektromagnetni valovi. Ločimo ionizirajoče in neionizirajoče sevanje. V katero podskupino sevanje spada, vplivajo učinki, ki jih ima sevanje na snov. Ionizirajoče sevanje lahko pri prehodu skozi snov iz atomov izbija elektrone, če je prenesena energija dovolj velika. Preostanek atoma imenujemo ion, proces pa ionizacija. Med ionizirajoča sevanja spadajo: sevanje radioaktivnih snovi, (alfa, beta in gama sevanje), rentgensko sevanje, nevtronsko sevanje, kozmično sevanje in delno ultravijolično sevanje.

V naravnem okolju glede na vrsto sevanja, ki nastane ob delitvi jedra, ločimo: razpade alfa, beta in gama, ter nevtronsko sevanje. Nevtronsko sevanje je mogoče pretežno zaslediti v jedrskih elektrarnah pri cepitvi jedrskega goriva. Poleg omenjenega, je v naravi prisotno tudi sevanje, ki pride iz Sonca. Sicer pa sevanja razdelimo na naravna in umetna. Slednje uvrščamo med naravna, prej omenjena pa spadajo med umetna. Umetna sevanja uvrščamo med ionizirna sevanja, za katere je značilno, da le-ta izbijejo elektrone pri prehodu skozi atom in tako nastanejo prosti elektroni oziroma ioni.

2.1.2.1 Razpad alfa

Aktivna jedra alfa so običajno težka jedra. Med protoni v jedru delujejo močne elektrostatske odbojne sile, ki onemogočajo, da bi jedro ostalo stabilno. Jedro sprosti notranjo energijo tako, da odda delec alfa, ki je jedro helija. Delci alfa imajo zelo veliko kinetično energijo, kar povzroča velike hitrosti odletelih delcev, vendar imajo doseg le nekaj centimetrov oziroma jih ustavi že list papirja. Kože človeka sevanje alfa ne predre, je pa človeku nevarno, če ga zaužijemo s hrano ali ga vnesemo v telo z dihanjem. Med pomembnejšimi sevalci alfa je plin radon (^{222}RN), ki povzroča glavni del naravne obsevanosti pri ljudeh. (Rožman, 2010)

2.1.2.2 Razpad beta

Pri aktivnih jedrih beta razmerje med številom nevtronov in protonov ne ustraja območju, kjer bi bili stabilni. Aktivna jedra beta imajo torej presežek nevtronov ali protov, in glede na to, katerih je v jedru več, ločimo 2 podvrsti razpada beta. Če je v jedru več nevtronov, jedra razpadejo z razpadom beta minus (β^-), jedra s presežkom protonov pa z razpadom beta plus (β^+). Ob razpadu beta minus, iz jedra odleti delec beta minus, ki je elektron. Pri beta plus, pa iz jedra izleti delec beta plus, ki ga imenujemo pozitron in je zelo podoben elektronu, le da ima pozitivni električni naboj. Sevanje beta je prodornejše od sevanja alfa, vendar zaradi manjše prinešene energije povzroča manjšo škodo. Tudi ta vrsta sevanja je za ljudi navarna predvsem, ko ga zaužijemo s hrano ali vdihavanjem. (Rožman, 2010)

2.1.2.3 Razpad gama

Po razpadu alfa ali beta so novonastala jedra v vzbujenem energijskem stanju in zato jedra niso stabilna. Taka energijsko vzbujena jedra hitro preidejo v osnovno energijsko stanje, ob tem pa višek energije v obliki elektromagnetnega valovanja odnese foton, ki izleti iz jedra. Fotone imenujemo tudi žarki gama in imajo v primerjavi z rentgenskimi žarki precej višjo enegijo in so prodornejši. Pri razpadu gama ostane število protonov in nevtronov ves čas enako. (Rožman, 2010)

2.1.2.4 Nevtronsko sevanje

Nevtronsko sevanje lahko opišemo kot tok nevtronov. Zasledimo ga zlasti pri jedrskih reakcijah pri cepitvi urana v jedrskih reaktorjih. Ker nevtroni nimajo električnega naboja, se brez težav približajo atomskemu jedrom in vanje vstopajo. Pri reakcijah z nevtroni ločimo dva procesa: sipanje in absorpcijo. Za sipanje je značilno, da se nevtroni odbijajo od jeder, pri čemer nastajajo nova jedra ali delci ob prenosu energije. Do jedrske spremembe pa pride pri absorpciji, ko jedro zajame nevtron. Za nevtronsko sevanje je značilna velika prodornost. (Koželj in drugi, 2006)

2.1.3 Jedrske reakcije

Proces spreminjanja atomskih jeder, pri čemer jedra reagirajo z drugimi jedri ali delci, imenujemo jedrske reakcije. Jedra atomov se spreminjajo tudi pri naključnem radioaktivnem razpadu. Glavna razlika med radioaktivnim razpadom in jedrsko reakcijo je, da lahko na jedrsko reakcijo vplivamo tako, da jo sprožimo, ustavimo, pospešimo ali upočasnimo. Radiativni razpad pa je naključni jedrski proces, na katerega zunanji dejavniki nimajo vpliva. (Rožman, 2009)

Jedrska reakcija se navadno sproži s curkom delcev (to so lahko nevtroni, protoni, fotoni, delci α). Snov, ki jo želimo spremeniti, obsevamo s curkom delcev. Med prehodom curka skozi snov nekateri zadanejo jedra in tako sprožijo reakcijo. Ločimo tri vrste jedrskih reakcij:

- radioaktivnost, ki zaradi naključnega procesa razpadanja jeder s tehnološkega vidika ni zanimiva,
- fisija ali razhajanje jeder,
- fuzija ali spajanje jeder.

2.2 Radioaktivni odpadki

Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (Uradni list RS, št. 102/04 – uradno prečiščeno besedilo, 70/08 – ZVO-1B, 60/11 in 74/15) pravi, da so radioaktivni odpadki "snovi v plinasti, tekoči ali trdni obliki, predmeti ali oprema, ki so odpadek sevalnih dejavnosti ali intervencijskih ukrepov in zanje ni predvidena nadaljnja uporaba, ki pa vsebujejo radioaktivne snovi ali so radioaktivno kontaminirani tako, da presegajo ravni opustitve nadzora." (Resolucija o Nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom za obdobje 2006-2015 (Uradni list RS št.15/2006))

Razvrščenost radioaktivnih odpadkov je odvisna od:

- stopnje radioaktivnosti,
- vrste radioaktivnosti,
- agregatnega stanja.

Kako se radioaktivni odpadki razvrščajo, določata ZVISJV in Pravilnik o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom (JV7).

Po najbolj splošni klasifikaciji radioaktivne odpadke razdelimo v tri skupine. Z ozirom na njihovo specifično aktivnost jih delimo na: nizko (kratica NRAO), srednje (SRAO) in visoko (VRAO) radioaktivne odpadke. V literaturi zasledimo tudi kratico NSRAO, ki opredeljuje skupaj nizko in srednje radioaktivne odpadke. V skupino VRAO poleg visoko radioaktivnih odpadkov spada tudi izrabljeno jedrsko gorivo (IJG) in ostanki, ki nastanejo s predelavo le tega. Vendar izrabljeno jedrsko gorivo ni

nujno obravnavati kot odpadki, saj lahko s predelavo pridobimo uran in plutonij, ter ju ponovno uporabimo, hkrati pa bistveno zmanjšamo količino odpadkov.

2.2.1 Razvrščanje radioaktivnih odpadkov

Pravilnik o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom radioaktivne odpadke glede na agregatno stanje deli na trdne, tekoče in plinaste. (Pravilnik o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom (JV7, Ur. l. RS št.49/2006)) Nadalje se odpadki v trdni obliki glede na stopnjo ter vrsto radioaktivnosti razvrščajo v pet skupin:

- 1) prehodni radioaktivni odpadki; radioaktivni odpadki, katerim se po največ 5 letih skladiščenja specifična aktivnost zmanjša pod mejo ravni za opustitev nadzora, nato se odložijo kot navadni odpadki;
- 2) zelo nizko radioaktivni odpadki (ZNRAO); za to vrsto odpadkov se lahko pristojni upravni organ za jedrsko in sevalno varnost odloči, da se opusti nadzor nad njimi;
- 3) nizko in srednje radioaktivni odpadki (NSRAO); pri ravnanju z NSRAO ni potrebno upoštevati njihove toplotne moči, ter so razvrščeni v dve podskupini:
 - i. kratkoživi NSRAO, pri katerih je specifična aktivnost v radioaktivnih odpadkih vsebovanih sevalcev alfa z razpolovnim časom, daljšim kot 30 let, enaka ali nižja od 4000 Bq/g v posameznem paketu, vendar v povprečju ne več kot 400 Bq/g v celotni količini NSRAO;
 - ii. dolgoživi NSRAO, specifična aktivnost sevalcev alfa presega omejitve za kratkožive NSRAO;
- 4) visoko radioaktivni odpadki (VRAO), ob razpadu radionuklidov prisotnih v visoko radioaktivnih odpadkih sprošča toliko toplote, da je to potrebno upoštevati pri njihovem ravnanju;
- 5) radioaktivni odpadki z naravnimi radionuklidi; ti odpadki nastajajo pri pridobivanju in predelavi jedrskih mineralnih surovin ali v drugih industrijskih procesih in niso zaprti vir sevanja;

V skladu z našo zakonodajo so kot nizko radioaktivni odpadki opredeljeni vsi odpadki, katerih specifična aktivnost znaša od 10^8 do $5 \cdot 10^9$ Bq/m³ za sevalce beta in gama, ali od 10^7 do 10^8 Bq/m³ za sevalce alfa. Srednje radioaktivni odpadki so za sevalce beta in gama določeni v razponu specifične aktivnosti od $5 \cdot 10^9$ do $5 \cdot 10^{14}$ Bq/m³ in od 10^8 do $5 \cdot 10^{14}$ Bq/m³ za sevalce alfa. Odpadki, katerih specifična aktivnost presega $5 \cdot 10^{14}$ Bq/m³, spadajo v skupino visoko radioaktivnih odpadkov. (Agencija ARAO, 2005)

2.2.1.1 Dolgoživost in kratkoživost radioaktivnih odpadkov

Poleg specifične aktivnosti moramo biti pri nizko in srednje radioaktivnih odpadkih pozorni tudi na življenjsko dobo vsebovanih radionuklidov. Razpolovni čas določa, kako dolgo bodo odpadki radioaktivni, kar vpliva na način ravnanja in odlaganja. Če je razpolovna doba krajša od 30 let, so odpadki kratkoživi, sicer so dolgoživi. Ob preteku razpolovne dobe, se število radioaktivnih jeder zmanjša za polovico, kar pomeni, da se običajno po preteku 10 razpolovnih dob najdlje živečega izotopa, aktivnost odpadkov zniža pod mejo, ki določa da so odpadki radioaktivni. Za kratkožive NSRAO velja, da po preteku 300-500 let niso več nevarni. Prisotni izotopi v dolgoživih NSRAO imajo razpolovne dobe večinoma daljše od 30 let, kar pomeni bistveno počasnejše upadanje aktivnosti. Ker lahko traja tudi več 10000 let, takšni odpadki zahtevajo drugačen način obdelave, priprave in odlaganja. (Resolucija o Nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom za obdobje 2006-2015 (Uradni list RS št.15/06))

2.2.2 Politika ravnanje z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom

Uporaba jedrske tehnologije in ionizirajočega sevanja nam na številnih področjih izboljšuje kakovost in udobje življenja. Na varen in gospodaren način moramo poskrbeti za radioaktivne odpadke (RAO) in izrabljeno gorivo (IG) že danes in ne smemo prelagati bremena na prihodnje generacije. Da bi dosegli osnovni cilj ravnanja z RAO in IG moramo zagotoviti varno ravnanje, shranjevanje, skladiščenje in odlaganje. To moramo zagotoviti na vseh področjih njihovega obstoja.

Splošni cilji varnega ravnanja z RAO in IG zapisani v Resoluciji o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom za obdobje 2016–2025 (ReNPROG) so:

- 1) Zaščita ljudi in okolja pred nepotrebnimi škodljivimi učinki ionizirajočih sevanj zaradi postopkov ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom, njihovega shranjevanja, skladiščenja in odlaganja v vseh fazah njihovega obstoja.
- 2) Podpirati in omogočati izvajanje sevalnih dejavnosti in uporabo virov ionizirajočega sevanja tako za pridobivanje energije kot za podporo in krepitev industrije, raziskav, medicine in drugih

institucionalnih dejavnosti v skladu z načeli te resolucije ter v okviru sprejetih predpisov v Republiki Sloveniji in mednarodnih smernic ter standardov.

- 3) V skladu z veljavnim nacionalnim okvirom, pod predpisanim nadzorom pristojnega upravnega organa, redno, na sistematičen in preverljiv način ocenjevati, preverjati, ter do razumno dosegljive mere nenehno izboljševati varnost in učinkovitost objektov ali dejavnosti za ravnanje z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom.
- 4) Zagotavljati in ohranjati ustrezne finančne in človeške vire, potrebne za izpolnitev obveznosti v zvezi z varnim ravnanjem z RAO in IG.
- 5) Preprečevati nesreče z radiološkimi posledicami in ublažiti njihove posledice, če bi do njih prišlo, v kateri koli fazi ravnanja z RAO in IG.

2.2.3 Odlagalni sistemi za NSRAO

Različne lastnosti radioaktivnih odpadkov ponujajo različne koncepte za njihovo odlaganje. Številni koncepti so že vnešeni v prakso, saj se varno odlaganje radioaktivnih odpadkov izvaja že od sredine prejšnjega stoletja.

Da zagotovimo varno odlaganje RAO, moramo radioaktivne snovi izolirati od biosfere. Migracijo radionuklidov prepračimo z vrsto zaporednih pregrad, ki so lahko inženirske ali naravne. Katero vrsto odlagališča bomo naredili, je odvisno predvsem od vrste radioaktivnih odpadkov, ki bodo tam odloženi.

Na splošno ločimo dva tipa odlaganja:

1. Pripovršinsko odlaganje (near surface type); odlaganje kratkoživih nizko in srednje radioaktivnih odpadkov.
2. Geološko odlaganje (deep geological type); odlaganje dolgoživih nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, visoko radioaktivnih odpadkov, in izrabljenega jedrskega goriva.

Pri pripovršinskem tipu odlagališča poznamo dve varianti: površinski tip odlagališča, kjer so odpadki odloženi nad nivojem podzemne vode in podzemni tip odlagališča, kjer odpadke odlagamo v vkopane silose, rove ali kaverne.

2.2.3.1 Odlaganje v vkopane silose

Sistem vkopanih silosov za odlaganje nizko in srednje radioaktivnih odpadkov uporabljajo v odlagališču SFR (Swedish Final Repository for Radioactive Waste) na Švedskem. Odlagališče se nahaja v Forsmarku, v neposredni bližini jedrske elektrarne, na globini okoli 60 m pod Baltskim morjem. Silosa

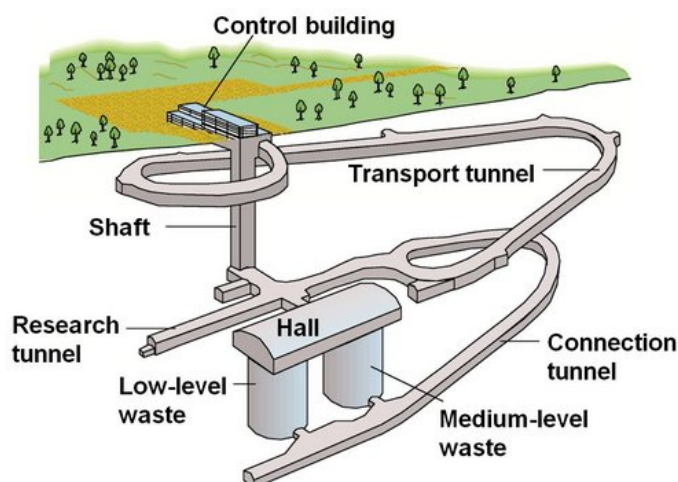
merita 25 m v premeru, 50 m v višino in sta zgrajena v kristalinični metamorfni kamnini. Med silosom in okoliško kamnino je plast bentonita, odpadki pa so zapolnjeni z betonom.

Tudi na Finskem za odlaganje NSRAO uporabljajo vkopane silose. Tudi odlagališče Olkiluoto leži v kristalinični kamnini in sicer tonalitu, na globini med 70 in 100 m. Sestavljata ga 2 silosa, višine 34 m in premera 24 m. V enega se odlagajo srednje radioaktivni odpadki (SRAO), ki so zaliti z bitumnom, v drugega pa nizko radioaktivni odpadki (NRAO). Za SRAO se uporablja debelostenski betonski silos, ki je zgrajen znotraj silosa v kamnini. Za NRAO je silos postavljen v kamnini, njegova površina pa je zaščitena z brizganim betonom. Odpadki so vloženi v sode, ti pa naprej v betonske vsebnike, ki vsebuje po 16 sodov odpadkov. Finci predvidevajo, da kontrola po zaprtju odlagališča ne bo potrebna.

Zaradi slabe nosilnosti tal odlaganje v silose načrtujejo tudi na lokaciji Fleurus-Farciennes v Belgiji, kjer odlagališče na površini zaradi geologije ni mogoče. Predviden je silos z dvema lupinama na globini med 20 in 30 m, kjer je zunanja lupina globoka cilindrična podporna stena z armiranobetonsko ploščo. Notranjo lupino predstavlja konstrukcija odlagališča samega in je enostavni betonski rezervoar. (Turk in drugi, 2009)



Slika 1: Shematski prikaz silosa v odlagališču Forsmark na Švedskem
(Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015)



Slika 2: Obstoječe odlagališče Olkiluoto na Finskem
(Posiva, 2016)

2.2.3.2 Odlaganje v podzemne rove

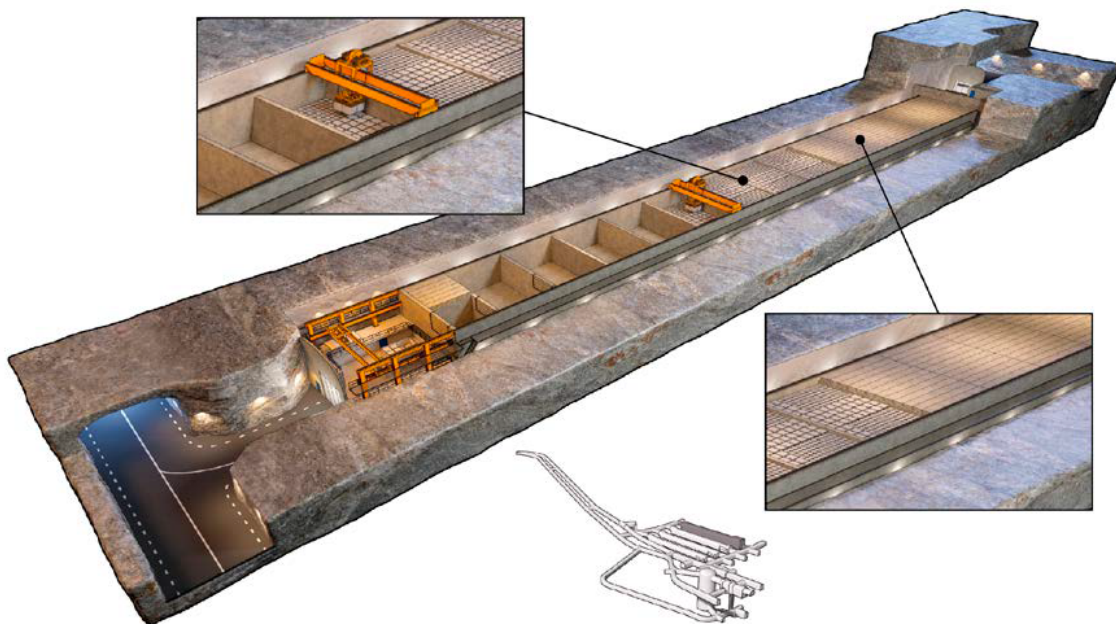
Podzemno odlagališče navadno sestavljata dva dela, in sicer, podzemni del objekta, ki je vkopan v zemljinu, in v površinski del. Podzemni del služi za transport in odlaganje odpadkov, površinski del pa za sprejem, obdelavo in pripravo odpadkov na kasnejše odlaganje, ter spremljajoče dejavnosti, ki so potrebne za normalno obratovanje odlagališča. Projekt in gradnja odlagališča morata preprečiti radiološke vplive na posameznika, družbo in okolje. Podzemno odlagališče je navadno na globini, večji od 50 m pod površjem oziroma je določena na podlagi stabilnostnih analiz. S stabilnostnimi analizami ocenjujejo karakteristike, ki ob predvidenih dodatnih podpornih ukrepih še zagotavljajo dovolj varnosti pri izkopih in gradbenih delih, ter kasneje mehansko odpornost in stabilnost objekta v času obratovanja in po zaprtju.

Podzemni del odlagališča sestavljajo pristopni in odlagalni rovi, katerih dimenzije in razporeditev so pogojene s količino in obliko odpadkov, tehnologijo odlaganja odpadkov ter lokacijo odlagališča. Med odlagalnimi rovi mora biti predpisana minimalna medosna razdalja. Rovi so razporejeni na obeh straneh pristopnega rova, ki povezuje oba dela (podzemni-površinski) odlagališča. Polnjenje začnemo v najbolj oddaljenem rovu. Posamezen rov najprej s predelnimi stenami razdelimo na prekate, v katere odlagamo pakirane odpadke. Medprostor zapolnimo s cementnim ali apneno-cementnim polnilom. Ko je prekat popolnoma zapolnjen, se zapre s čepom iz armiranega betona, polnjenje pa nadaljuje v naslednjem prekatu, ki je bližje dostopnemu rovu. Prevoz odpadkov poteka s transportnimi vozili, odlaganje v celicah pa se izvaja z mostnimi dvigali.

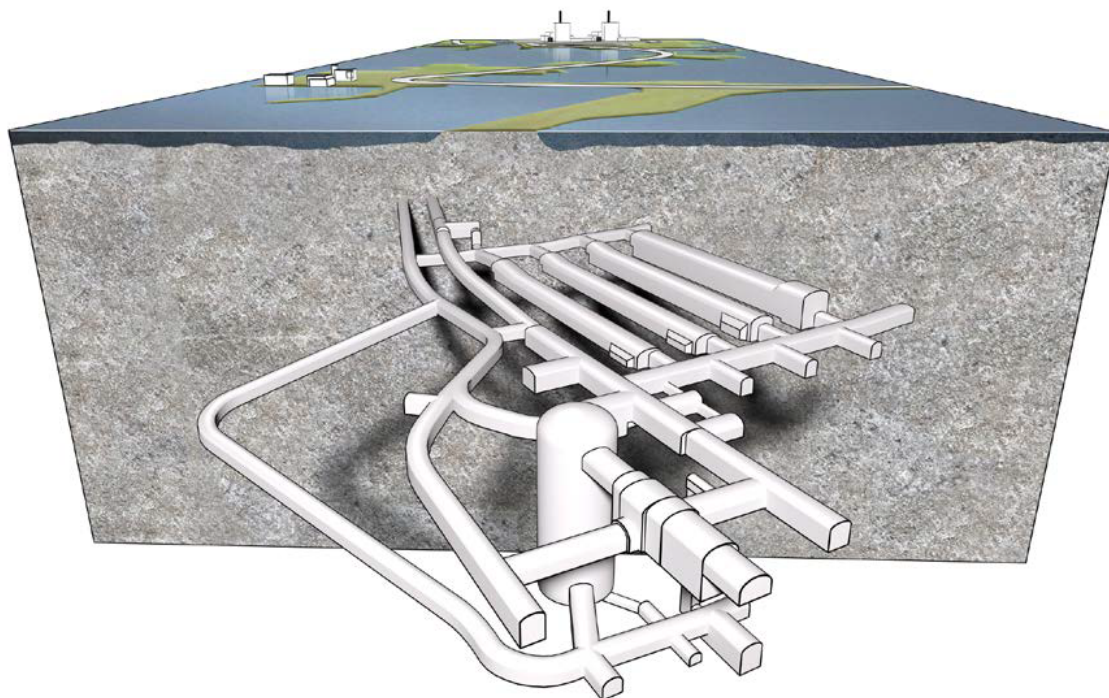
V odlagališču je potrebno ločeno zbirati in odvodnjavati čiste hribinske vode ter vode iz odlagališča. Z drenažo v oblogi odlagalnih in dostopnih rovoov zbiramo hribinsko vodo, ter jo odvedemo na površje v zbiralne bazene. Vodo iz odlagalnega in dostopnega rova pa odvedemo v poseben zbiralni bazen. Popolno ločenost sistemov zagotavljamo z vgrajeno hidroizolacijo.

Ko celoten rov zapolnimo z odpadki ter odstranimo transportno opremo, se odlagalni rov še dodatno zapolni z malto ali injekcijsko maso. Ko zapolnimo odlagalni del in del dostopnega rova, ki ga ne potrebujemo več, ostanejo nezapolnjeni samo sistemi za odvodnjavanje. Po preteku časa aktivnega nadzora odlagališča se zapolnijo tudi ti sistemi. Z zapolitvijo odlagališča ustvarimo dodatno umetno pregrado. Z zatesnitvijo omejimo prehajanje radionuklidov v okolico, hkrati pa zagotovimo kompaktnost in spojenost odlagališča z okolico.

V Evropi najdemo tak tip odlagališča v Nemčiji (Morsleben in Konrad), na Finskem (Olkiluoto) in na Švedskem. (Turk in drugi, 2009)



Slika 3: Shematski prikaz odlaganja v podzemnih rovih
(Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015)



Slika 4: Shematski prikaz odlagališča Forsmark na Švedskem
(Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015)

2.2.3.3 Površinsko odlagališče

Površinski tip odlagališča običajno leži nad nivojem podtalnice. Sestavljen je iz betonskih odlagalnih enot, katerih sestavni deli so temeljne plošče, stene in krovne plošče. V enote se odlagajo vsebniki z imobiliziranimi jeklenimi sodi, ali jekleni sodi direktno, v katere so pakirani odpadki. Za izvedbo površinskega tipa odlagališča NSRAO se priporoča sistem zaporednih in komplementarnih umetnih in naravnih pregrad, ki predstavljajo ščit med odpadki in človekom. Najboljša primera takega tipa odlagališča sta v Franciji Centre de l'Aube in v Španiji, El Cabril.

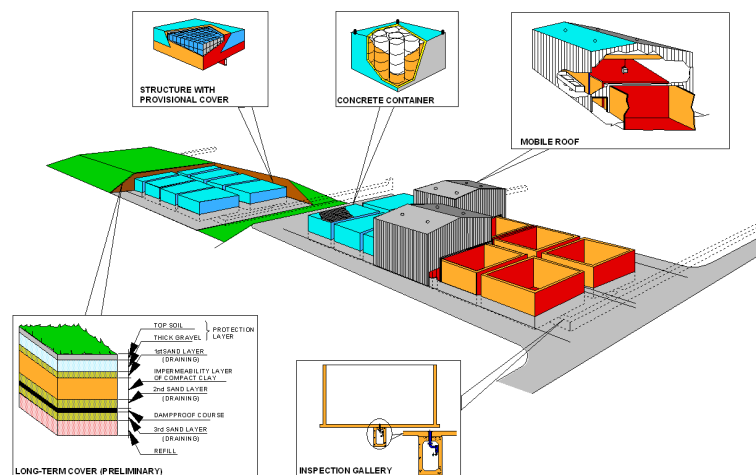
V primeru površinskega odlagališča odpadke zapakirajo v jeklene sode, ki jih položijo v modularne armiranobetonske vsebnike. Prostor med sodi je potrebno zapolniti, bodisi z injekcijsko maso ali malto. Armiranobetonski vsebnik predstavlja majhno samostojno odlagalno enoto in mora izpolnjevati vse zahteve mednarodne agencije za atomsko varnost (IAEA). Sodi z odpadki se lahko vlagajo v vsebnike na lokaciji odlagališča NSRAO, lahko pa poteka na lokaciji skladiščenja in se po zapolnitvi pripeljejo na odlagališče. Napolnjene vsebnike nato položijo v armiranobetonske odlagalne enote, ki imajo tudi funkcijo nosilne konstrukcije. V kolikor se transport in vlaganje opravljata z vozili, so odlagalne enote narejene tako, da je omočen dostop iz strani (kot skozi vrata - Centre de l'Aube). Če pa se za transport in polnjenje uporabljajo mostna dvigala, odlagalne enote izgledajo kot škatle brez pokrova (El Cabril). Ko je odlagalna enota napolnjena z vsebniki, se prostori med njimi zapolnijo s cementnim polnilom ali malto. Odlagalna enota se zapre z armiranobetonskim pokrovom, na katerega se kasneje izvede še

pokrov sestavljen iz neprepustnih (glina, bitumen, asfalt) in prepustnih (prod, drobljenec) plasti. Izvedba večih inženirskih pregrad (AB vsebniki, AB odlagalne enote) v kombinaciji s cementnimi polnili in ustreznim zemelskim pokrovom onemogočajo infiltracijo vode do odpadkov, vdor ljudi, živali in rastlinja v odlagališče ter zmanjšajo stopnjo izpostavljenosti žarkom gama na površini.

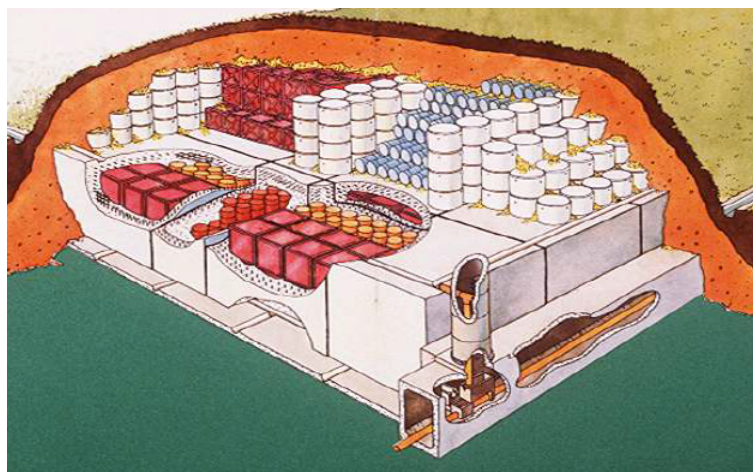
Armiranobetonske odlagalne enote predstavljajo osnovno mehansko odpornost in stabilnost odlagališča. Določeno mehansko trdnost in stabilnost nudijo tudi armiranobetonski vsebniki, ter omogočajo izvedbo armiranobetonskega pokrova, kjer nudijo podporo. Zemeljski pokrov je izveden v ustrezni debelini in varuje beton pred poškodbami zaradi vremenskih vplivov.

V času polnjenja odlagalnih enot moramo preprečiti kontakt med padavinsko vodo in odpadki. Da bi to preprečili se nad odlagalno enoto v fazi polnjenja postavi posebna premična jeklena konstrukcija s streho. Konstrukcija hkrati služi za postavitve mostnega dvigala, s katerim premikamo in odlagamo odpadke. Ko enoto zapolnimo z armiranobetonskimi vsebniki, se votli prostori med njimi zapolnijo z dovolj redkim cementnim polnilom, da zapolni vse prazne prostore, in onemogoča premikanje vsebnikov. Po zapolnitvi se odlagalno enoto zapre z armiranobetonsko ploščo, katere površina se obdelava z zaščitnimi premazi ali obda s folijo, da se poveča neprepustnost za vodo. To predstavlja začasno zaščito, preden se na ploščo ne namesti zemeljski prekriv, sestavljen iz neprepustnih in prepustnih slojev.

Pri površinskem tipu odlagališča je prav tako pomembno ločeno zbiranje in odvodnjavanje vod iz odlagališča in hribinskih vod. Že med obratovanjem odlagališča je potrebno vse vode odvesti do zadrževalnih bazenov in jih analizirati. Pri površinskem tipu odlagališča je pod in ob odlagališču zgrajen sistem odtočnih kanalov, ki se nahajajo v nazdornih tunelih. Vsaka odlagalna enota je povezana v ta sistem, ki ga imenujemo infiltracijski kontrolni sistem. Manjši zbirni bazeni so postavljeni tako, da omogočajo analizo infiltrirane vode za vsako odlagalno celico posebej, kar omogoča ustrezno ukrepanje v kolikor so volumni vode preveliki ali je kontaminacija previsoka. Sistem odtočnih kanalov se konča pri zbirnem bazenu. Zbirni bazen je dimenzioniran tako, da omogoča zbiranje infiltrirane vode za potrebno časovno obdobje, kar je v primeru El Cabril 1 leto. Prav tako se zbirajo površinske vode, ki bi se lahko infiltrirale s površine v odlagališče. Drenažni sistem se običajno nahaja v prepustnih slojih zemeljskega prekrova, ki se nahaja nad odlagalno enoto. (Turk in drugi, 2009)



Slika 5: Shematski prikaz odlagališča El Cabril
(IAEA, 2016)



Slika 6: Sistem odvodnjavanja v površinskem odlagališču Centre de la Manche
(Andra, 2016)

2.2.4 Podatki o radioaktivnih odpadkih v Sloveniji

Slovenija zaradi jedrske elektrarne Krško spada med jedrske države. Ker ima majhen jedrski program v primerjavi z drugimi jedrskimi državami, nastane pri nas sorazmerno majhna količina radioaktivnih odpadkov. Visokoradiativni odpadki kot izrabljeno jedrsko gorivo nastanejo zaradi obratovanja Nuklearne elektrarne Krško (NEK) in v raziskovalnem reaktorju TRIGA. Zaradi delovanja NEK nastane tudi največ nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, ki prostorninsko predstavljajo več kot 95 % vseh nastalih odpadkov v Sloveniji. Ostalih 5 % nastane v zdravstvu, industriji, ter raziskovalnem delu. Med radioaktivne odpadke spadajo tudi zaprti viri radioaktivnega sevanja, ki spadajo v posebno skupino.

2.2.4.1 Radoaktivni odpadki in izrabljeno jedrsko gorivo v NEK

Med obratovanjem NEK nastajajo radioaktivni odpadki v vseh agregatnih stanjih. Nizko in srednje radioaktivni odpadki so predelani v sistemu za predelavo radioaktivnih odpadkov. Naloga sistema za predelavo je, da se odpadki zberejo, predelajo, shranijo in zapakirajo v tako obliko, ki je primerna za skladiščenje, hkrati pa onemogoča kontaminacijo okolja.

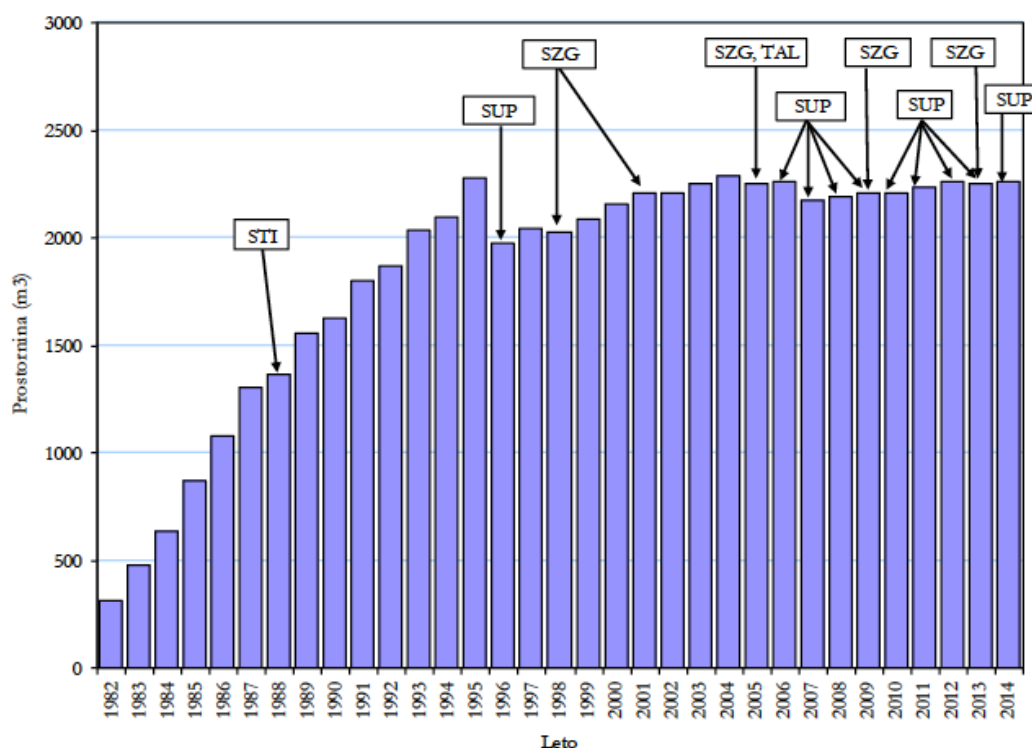
V letu 2014 so v skladišče NEK odložili 177 sodov trdnih nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, skupne aktivnosti gama $5,72 \cdot 10^9$ Bq, ter aktivnosti alfa $6,24 \cdot 10^6$ Bq. Vrste odpadkov, število paketov, aktivnosti in prostornino lahko vidimo v tabeli. Skupni prirastek odloženih odpadkov leta 2014 je 38,286 m³.

Paket je enoten izraz, s katerim poimenujemo odpadke, shranjene v različnih embalažah (208 l sodi, 320 l sodi). (URSJV, 2015)

Preglednica 1: NSRAO, uskladiščeni leta 2014 v NEK
(URSJV, 2015)

Vrste odpadkov	Oznaka	Število paketov	Aktivnost gama [Bq]	Aktivnost alfa [Bq]	Prostornina [m ³]
stisljivi odpadki	CW	109	$1,48 \cdot 10^9$	$3,97 \cdot 10^6$	22,672
koncentrat izparilnika	DC	18	Vloženi v cevaste vsebnike TTC (tube type container)		
ostali odpadki (vloženi v TTC-je)	O	48	Vloženi v cevaste vsebnike TTC		
ostali odpadki	O	2	$1,51 \cdot 10^7$	$6,26 \cdot 10^4$	0,416
Skupaj standardnih sodov		177	$1,50 \cdot 10^9$	$4,03 \cdot 10^6$	23,088
vsebniki TTC, v katere so vloženi standardni sodi z IDDS produkti	TI	6	$3,59 \cdot 10^9$	$4,13 \cdot 10^5$	5,214
vsebniki TTC, v katere so vloženi standardni sodi z ostalimi odpadki	ST	7	$6,31 \cdot 10^8$	$1,79 \cdot 10^6$	9,984
Skupni nastali prirastek aktivnosti in prostornine			$5,72 \cdot 10^9$	$6,24 \cdot 10^6$	38,286

Z različnimi metodami so skupni volumen nizko in srednje radioaktivnih odpadkov zmanjšali. Uporabljene so bile naslednje metode za redukcijo volumna: stiskanje, superkompaktiranje, sušenje, sežiganje in taljenje. Na zadnji dan leta 2014 je bilo uskladiščenih 2258 m³ radioaktivnih odpadkov, kar predstavlja skupno količino odpadkov od začetka obratovanja NEK do konca leta 2014. Aktivnost sevalcev gama uskladiščenih odpadkov je znašala $1,85 \cdot 10^{13}$ Bq, sevalcev alfa pa $2,58 \cdot 10^{10}$ Bq. (URSVJ, 2015)



Slika 7: Količina RAO v skladišču NEK

(URSVJ, 2015)

SUP - superkompaktiranje pategov v letih 1995/1996 in od 2006 do 2014

SZG - Odvoz pripravljenih odpadkov na sežig na Švedsko v letih 1998, 2001, 2005, 2009, 2013

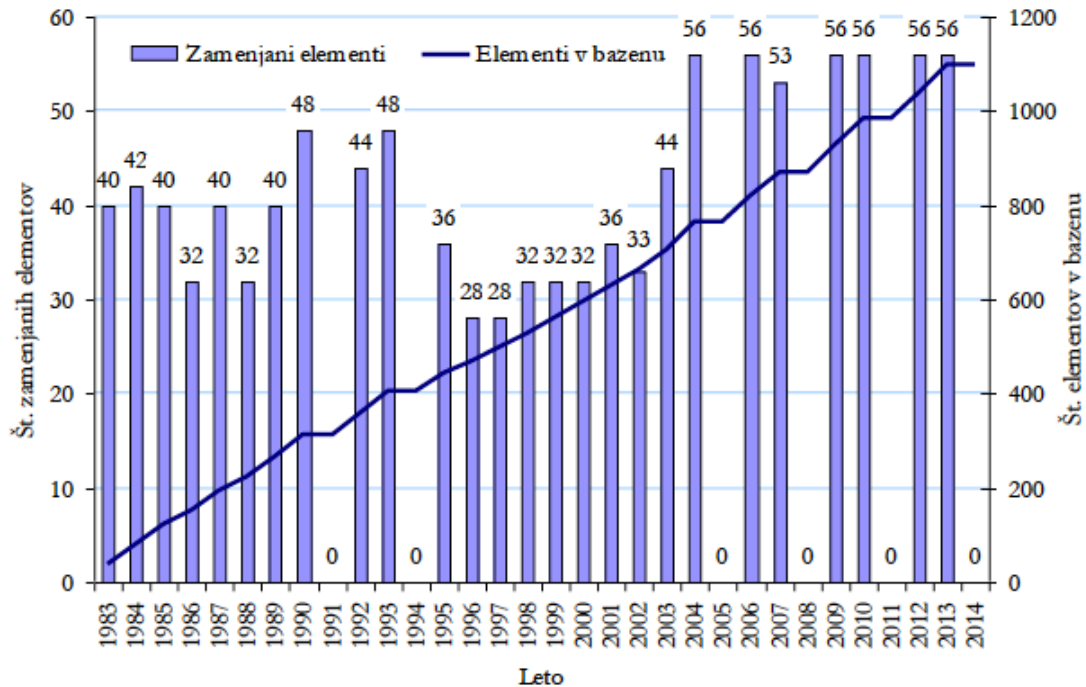
TAL - Taljenje pripravljenih odpadkov leta 2005

STI - Prva kampanja stiskanja radioaktivnih odpadkov leta 1988/1989

Izrabljeno gorivo se hrani v bazenu za izrabljeno gorivo, kjer je na razpolago 1694 odlagalnih celic. Konec leta 2014 je bilo v bazenu zapoljenih 1098 celic z gorivnimi elementi. Ker v NEK deluje 18 mesečni gorivni cikel, v letu 2014 ni potekala zamenjava gorivnih elementov.

Preglednica 2: Število izrabljenih gorivnih elementov v zadnjih 10 letih
(URSJV, 2015)

Leto	V bazenu	Iz sredice
2005	763	0
2006	819	6
2007	872	53
2008	872	0
2009	929	56 (+1)
2010	985	56
2011	985	0
2012	1041	56
2013	1098	56 (+1)
2014	1098	0



Slika 8: Zamenjava izrabljenih gorivnih elementov in število elementov v bazenu NEK
(URSJV, 2015)

2.2.4.2 Radoaktivni odpadki na inštitutu Jožef Stefan

Na inštitutu Jožef Stefan je leta 2014 nastalo okoli 200 litrov radioaktivnih odpadkov. Radioaktivni odpadki nastajajo pri delu v vročih celicah, pri delu v nadzorovanem območju Odseka za znanost o okolju, ter delovanju reaktorja.

Sedem sodov kovinskih predmetov in lesa se nahaja tudi na območju Reaktorskega centra v Podgorici pri Ljubljani. Odpadki so onesnaženi z naravnimi radionuklidi, ki so nastali ob dekontaminaciji in razgradnji objektov za predelavo uranove rude.

Za odpadke na inštitutu Jožef Stefan je odgovorna služba za varstvo pred ionizirajočim sevanjem IJS, ki odpadke preda Agenciji za radioaktivne odpadke (ARAO), ki jih odda v skladišče v Centralnem skladišču radioaktivnih odpadkov v Brinju (CSRAO). (URSJV, 2015)

2.2.4.3 Radioaktivni odpadki v zdravstvu

V zdravstvu se največ uporabi radioaktivnega joda (I^{131}). Največji uporabnik le tega je Ljubljanski Onkološki inštitut. V ta namen imajo zgrajene posebne zadrževalnike, kjer se tekočim odpadnim vodam zmanjšuje specifična aktivnost. Pooblaščenec izvedenec varstva pred sevanji mora pred izpraznitvijo zadrževalnikov opraviti meritve specifične aktivnosti, šele nato se lahko odpadne vode odvedejo.

Glede radioaktivnih odpadkov je ustrezno poskrbljeno tudi v novih prostorih Onkološkega inštituta, kjer vire radioaktivnega sevanja po koncu uporabe vrnejo proizvajalcu ali pa jih odložijo v CSRAO. Imajo tudi poseben prostor, namenjen kratkoživim virom sevanja, kjer se odpadki hranijo, dokler ne izpolnjujejo meje za opustitev nadzora. Kasneje se ti odpadki odlagajo kot navadni odpadki. Drugače je v Kliničnem centru Ljubljana, kjer na kliniki za nuklearno medicino nimajo zadrževalnikov odpadnih voda. Predvideno je, da se bo ustrezen sistem zadrževalnikov uredil ob gradnji novih prostorov, ko bodo obnavljali Klinični center. Ostale Slovenske bolnišnice opravljajo le ambulantno zdravljenje, kjer pacient po prejetju terapije zapusti bolnišnico in ne potrebujejo zadrževalnikov. (URSJV, 2015)

2.2.4.4 Centralno skladišče radioaktivnih odpadkov (CSRAO)

Za radioaktivne odpadke malih povzročiteljev je zadolžena agencija za radiativne odpadke ARAO. Odgovorna je za prevzem, prevažanje, obdelavo, pripravo pred skladiščenjem/odlaganjem ter skladiščenje/odlaganje. Agencija je zadolžena tudi za upravljanje s centralnim skladiščem radioaktivnih odpadkov v Brinju. Za obdelavo odpadkov uporablja prostore raziskovalnega reaktorja Triga Mark II z vročo celico, katerega upravljaletc je inštitut Jožef Stefan.

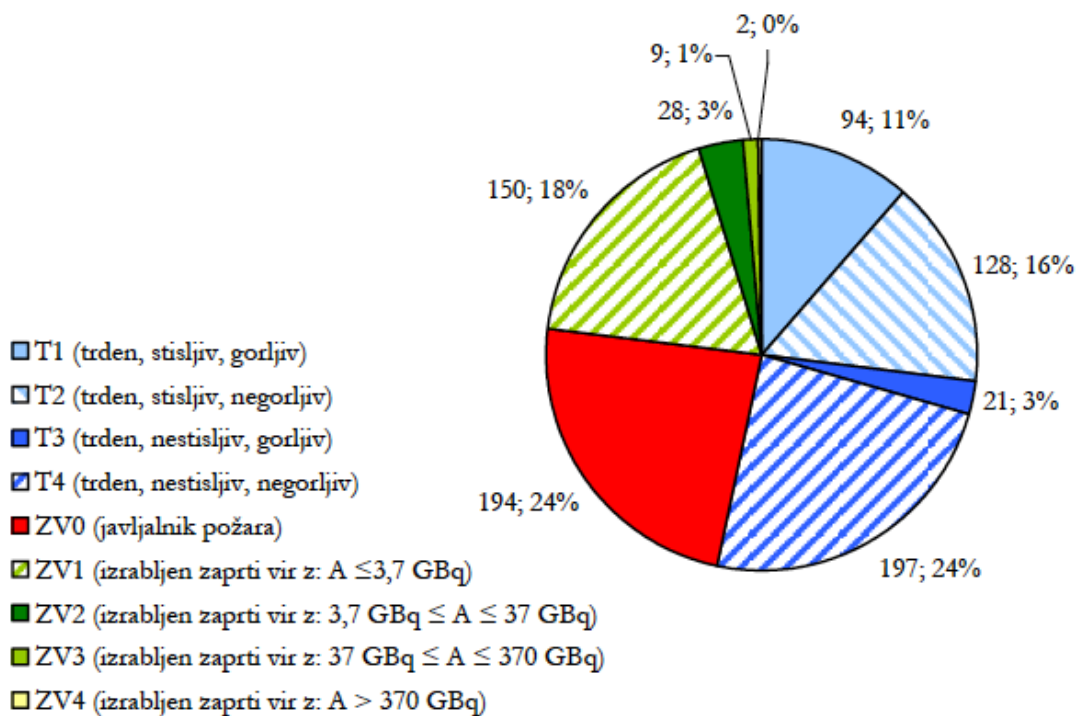
Leta 2014 je bilo v centralno skladišče radioaktivnih odpadkov sprejetih 116 paketov radioaktivnih odpadkov malih povzročiteljev. Skupna prostornina odpadkov je $2,3 \text{ m}^3$, tehtala pa je 906 kilogramov. Skupna aktivnost prevzetih odpadkov je znašala 7,6 GBq. Ionizacijski javljalniki požara predstavljajo

80 % prevzetih odpadkov, vendar se njihova prostornina znatno zmanjša z obdelavo v Objektu Vroča Celica in tako zagotavlja zadosten prostor novim paketom z radioaktivnimi odpadki.

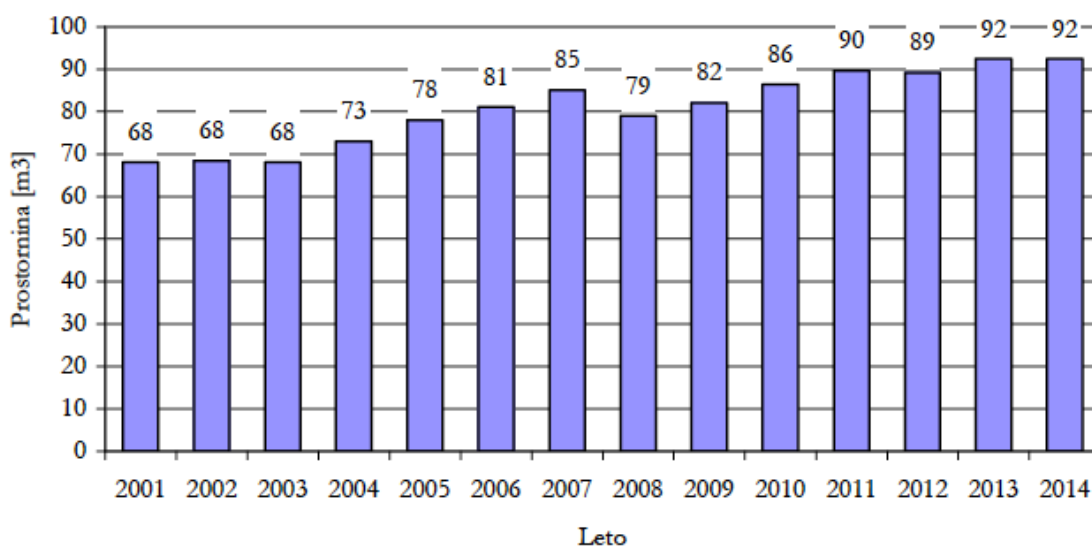
Skupna prostornina radioaktivnih odpadkov konec leta 2014 je bila 92,3 m³. Paketi so tehtali 51 ton in imeli skupno aktivnost 3 TBq. (URSJV, 2015)

Preglednica 3: Vrste odpadkov in število paketov v CSRAO konec leta 2014
(URSJV, 2015)

Vrsta radioaktivnih odpadkov	Št. Paketov
L (tekoči odpadek)	0
M (mešani odpadek)	0
T1 (trden, stisljiv, gorljiv)	94
T2 (trden, stisljiv, negorljiv)	128
T3 (trden, nestisljiv, gorljiv)	21
T4 (trden, nestisljiv, negorljiv)	197
ZVO (javljalec požara)	194
ZV1 (izrabljen zaprti vir z: $A \leq 3,7$ GBq)	150
ZV2 (izrabljen zaprti vir z: $3,7$ GBq $\leq A \leq 37$ GBq)	28
ZV3 (izrabljen zaprti vir z: 37 GBq $\leq A \leq 370$ GBq)	9
ZV4 (izrabljen zaprti vir z: $A > 370$ GBq)	2
Skupaj	823
Skupna aktivnost paketov	3 TBq
Skupna prostornina paketov	92,3 m³
Skupna masa paketov	50,9 t



Slika 9: Število paketov in deleži posameznih vrst radioaktivnih odpadkov, skladiščenih v CSRAO konec leta 2014
 (URSJV, 2015)



Slika 10: Prostornina skladiščenih radioaktivnih odpadkov v CSRAO ob koncu posameznega leta
 (URSJV, 2015)

3 TRANSPORT RADIONUKLIDOV SKOZI POROZNO SNOV

S porozno snovjo se srečujemo na številnih področjih. Pojem pogosto zasledimo v hidrologiji, geologiji, zelo velikega pomena pa je tudi pri odlaganju radioaktivnih odpadkov v geološke formacije. Migracije radionuklidov v geoloških formacijah so odvisne predvsem od prenosnih pojavov, ki se pojavljajo v poroznem materialu. Od tega je odvisno, kako hitro in s kolikšno intenzivnostjo bo onesnažena biosfera v primeru uhajanja radionuklidov iz odlagališča.

Naravne porozne materiale si predstavljamo kot strukture sestavljene iz poroznih matrik, med njimi pa so mreže razpok. S kapljevino zapolnjeno porozno matriko navadno zaradi lažjega računanja obravnavamo, kot da imamo opravka z nestisljivo kapljevino in togo/homogeno porozno snov, čeprav je v naravi takšna snov anizotropna in heterogena. V kolikor kapljevina popolnoma zapolnjuje porozno snov, imamo opravka z nasičenimi matrikami, če jo delno, govorimo o nenasičenih matrikah. Matrika in kapljevina sta v medsebojni povezavi na osnovi Darcyjevega zakona.

Za modeliranje migracije kontaminantov moramo upoštevati lastnosti poroznih struktur. Poznavanje značilnosti kamnin vpliva na izbiro fizikalnega modela. Kateri model bomo izbrali, je namreč odvisno od številnih dejavnikov. Na izbiro modela vpliva razpoložljivost podatkov glede parametrov in konstant, merilo modela, ipd. Na splošno fizikalni modeli temeljijo na naslednjih enačbah: enačba ohranitve mase, enačba ohranitve energije, enačbe ohranitve sestavin ter enačbe ohranitve gibalne količine. Najpogostejša sta kontinuumski in dvojni porozni model. (Vrankar, 2004)

3.1 POROZNA SNOV

»Porozna snov je material, ki je sestavljen iz trdnega dela in por in jih je potrebno dobro opisati, ker jih je težko geometrično definirati«. (Vrankar, 2004) Pore so prazni mehurčki, ki so navadno po mediju razporejeni skoraj enakomerno. Med seboj so lahko povezane ali nepovezane. Če je povezan vsaj del por, to omogoča tok kapljevine. Ko so pore zapolnjene samo z eno kapljevino, govorimo v enostavnih primerih, v dvofaznem toku, si prazne prostore delita kapljevina in plin, v večfaznem toku pa so pore zapolnjene z mešanico plinov in mešanico kapljevin. Skozi zapleteno mrežo povezanih por voda ne teče enakomerno. Hidravlične karakteristike poroznih snovi so v glavnem določene z naslednjimi parametri: prepustnostjo, gostoto in velikostjo ter orientacijo razpok. (Vrankar, 2004)

3.1.1 Osnovne lastnosti porozne snovi

»Porozno snov definirajo parametri, ki kažejo lastnosti trdnega dela, kapljevine (npr. vode) ali porozne snovi kot celote. Osnovne lastnosti so granulometrijska sestava zemljin, poroznost, specifična površina, količnik zavitosti, prepustnost, gostota, viskoznost in stisljivost«. (Vrankar, 2004).

Granulometrijska sestava ali zrnavost: pomeni sestav po procentualnem deležu posameznih intervalov velikosti zrn. Za delitev zrn po velikosti veljajo naslednje naravne meje:

- 2 mm je meja med gramozom in peskom;
- 0,075 do 0,05 mm je velikost, katere zrna lahko ločimo s prostim očesom. Vrednost predstavlja tudi mejo med peskom in meljem;
- 0,006 do 0,002 mm je meja med meljem in glino.

Poroznost: Poroznost ω je makroskopska lastnost poroznih matrik. Definicija pravi, da je to razmerje med prostornino por in skupno prostornino porozne snovi.

$$\omega = \frac{V_P}{V} = 1 - V_S, \quad (6)$$

kjer je V_P volumen por, V_S volumen trdne snovi, V skupni volumen poroznega materiala. V literaturi se pojavlja tudi pojem efektivne poroznosti, ki je definirana kot razmerje med volumnom povezanih por in skupnim volumnom porozne snovi.

Specifična površina: je razmerje med skupno površino por in skupnim volumnom porozne snovi.

Količnik zavitosti: definicija pravi, da je količnik zavitosti razmerje med dejansko dolžino poti delca kapljevine in dolžino daljice, ki povezuje točko začetka poti in točko konca poti delca. Odvisen je od poroznosti, in sicer, manjša kot je poroznost, večji je količnik zavitosti.

Prepustnost: prepustost k je parameter, ki določa precejanje kapljevine skozi zasičene porozne snovi. Prepustnost ni odvisna od kapljevine ampak le od geometrije porozne matrike. Za nekatere materiale sta poroznost in prepustnost prikazani v preglednici 4.

Preglednica 4: Poroznost in prepustnost za nekatere materiale

(Vrankar, 2004)

Material	Poroznost ω [%]	Prepustnost [m ²]
Apnenec	0,04 - 0,10	$2,0 \cdot 10^{-15}$ - $1,48 \cdot 10^{-14}$
Pesek	0,37 - 0,50	$2,0 \cdot 10^{-11}$ - $1,8 \cdot 10^{-10}$
Peščenjak	0,08 - 0,38	$5,0 \cdot 10^{-16}$ - $3,0 \cdot 10^{-12}$
Zemljina	0,43 - 0,54	$2,9 \cdot 10^{-13}$ - $1,4 \cdot 10^{-11}$
Opeka	0,12-0,34	$4,8 \cdot 10^{-15}$ - $2,2 \cdot 10^{-13}$

Paziti moramo, da prepustnosti k ne zamenjamo s hidravlično prevodnostjo K [m/s]. Hidravlično prevodnost imenujemo tudi Darcyjeva prepustost in določa transportno sposobnost porozne snovi. Odvisna je od lastnosti vode in lastnosti poroznega materiala. Definirana je kot:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}, \quad (7)$$

kjer je μ dinamična viskoznost vode, ρ gostota vode, g težnostni pospešek.

Gostota vode: gostota vode ρ je definirana kot masa vode na enoto volumna. Spreminja se v odvisnosti od temperature in tlaka in sicer, se zmanjšuje s temperaturo in zvišuje s tlakom.

$$\rho = \rho(p, T) \quad (8)$$

Viskoznost vode: viskoznost vode ali notranje trenje se dogaja pri toku vode z nehomogeno porazdelitvijo hitrosti, kot sila odpora spremembi oblike delca vode. Obravnavamo tok vode med dvema ploščama, ki sta vzporedni in imata površino A in sta med seboj oddaljeni za razdaljo h . Spodnja plošča je stacionarna, zgornja pa premična. Strižno napetost opisuje Newtonov zakon viskoznosti:

$$\tau_{x,y} = -\frac{\mu \partial v_x}{\partial y}, \quad (9)$$

kjer je v_x hitrost v smeri toka x . Poleg dinamične viskoznosti μ pogosto zasledimo tudi kinematično viskoznost γ , ki je definirana kot razmerje med dinamično viskoznostjo in gostoto.

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

Stisljivost vode: Stisljivost vode β je definirana kot sprememba volumna ob spremembi tlaka:

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p}; T = konst, \quad (11)$$

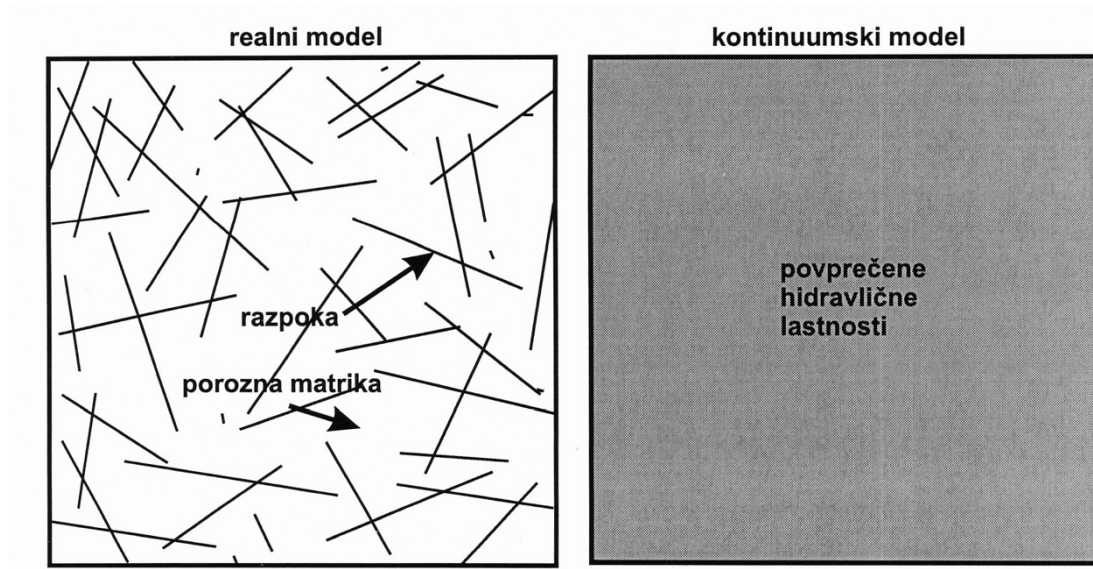
kjer je V volumen vode, p tlak vode. Negativni predznak pomeni, da se volumen manjša, ko se tlak povečuje.

3.1.2 Fizikalni modeli

V naravnem okolju so si kamninski sistemi med seboj običajno zelo raznoliki. To pomeni, da imajo materiali na različnih mestih zelo različne lastnosti v smislu poroznosti in prepustnosti. Kapljevine se nahajajo na mestih, kjer je prepustnost nizka, oziroma prihaja do pretakanja, kjer so razpoke med seboj povezane. Advekcija in disperzija sta glavna procesa, ki se dogajata v razpokah, drugje pa poteka proces difuzije, ki v teh primerih predstavlja retardacijski proces. Zaradi raznolikostih v naravnih materialih se običajno uporabljajo fizikalni modeli, med katerimi sta najbolj pogosta kontinuumski in dvojni porozni model.

3.1.2.1 Kontinuumski model

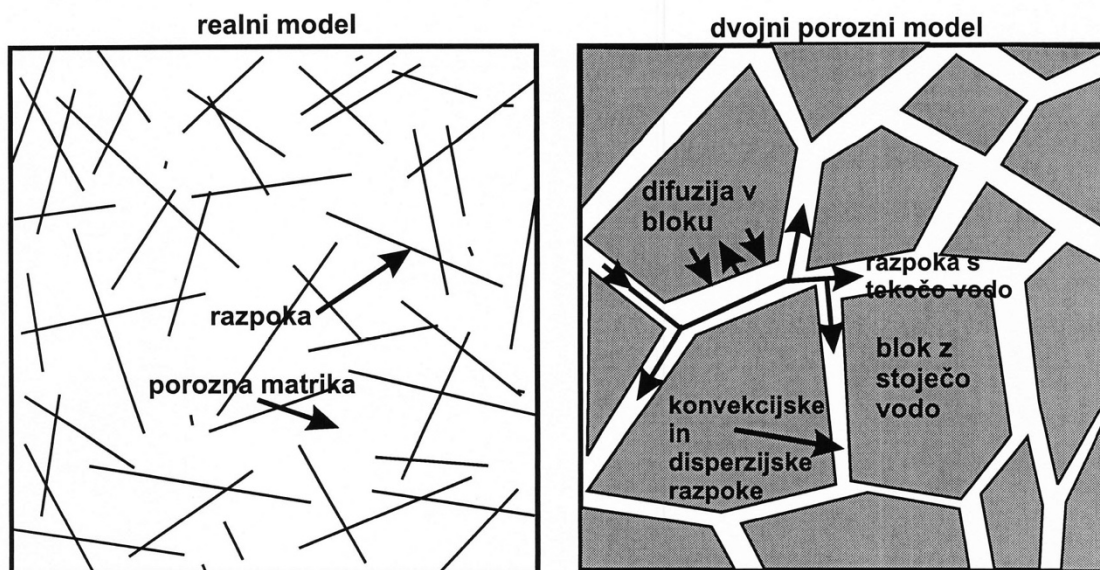
Pri kontinuumskem modelu moramo predpostaviti, da je dimenzija problema dovolj velika, da lahko definiramo povprečne vrednosti za tlak, hitrost in koncentracijo snovi. Geološke formacije v tem modelu obravnavamo kot kontinuum, kjer imamo povprečne hidravlične lastnosti. Predpostaviti moramo tudi, da je modelirano območje homogeno in izotropno. Tudi ostale fizikalne procese, med katere spadajo tok kapljevin, prenos mase, prenos toplote in prenos sestavin, moramo obravnati na enak način. Kontinuumski model se največkrat uporablja za modeliranje podtalnice, saj v tem primeru natančnosti dobljenih rezultatov običajno zadošča. Ker je hidravlična prevodnost odvisna od lastnosti kapljevine in poroznega materiala, se realne vrednosti zelo spreminjajo. Povprečenje teh vrednosti v modelu nam lahko da negotove rezultate, zato so bili razviti tudi drugi modeli. Med njimi je tudi dvojni porozni model. (Šarler in drugi, 1999)



Slika 11: Kontinuumski model
(Šarler in drugi, 1999)

3.1.2.2 Dvojni porozni model

Značilnost dvojnega poroznega modela je, da so geološke formacije (realni model) sestavljene iz dveh kontinuumov: iz kontinuuma razpok s tekočo vodo in kontinuuma poroznih matrik s stoječo vodo. V tem konceptu modela se ocenjuje, da je prepustnost v matriki manjša, v razpokah pa večja. Kontinuum poroznih matrik lahko deluje kot vir, če vodo oddaja, ali ponor, v primeru, ko vodo sprejema. Mehanizmi za transport sestavin, ki so prisotni v dvojnem poroznem modelu so: konvekcija in hidrodinamična disperzija v razpokah, ter difuzija v porozni matriki in na mejah med matriki in razpoko. Primer dvojnega poroznega modela je prikazan na sliki 12. (Šarler in drugi, 1999)

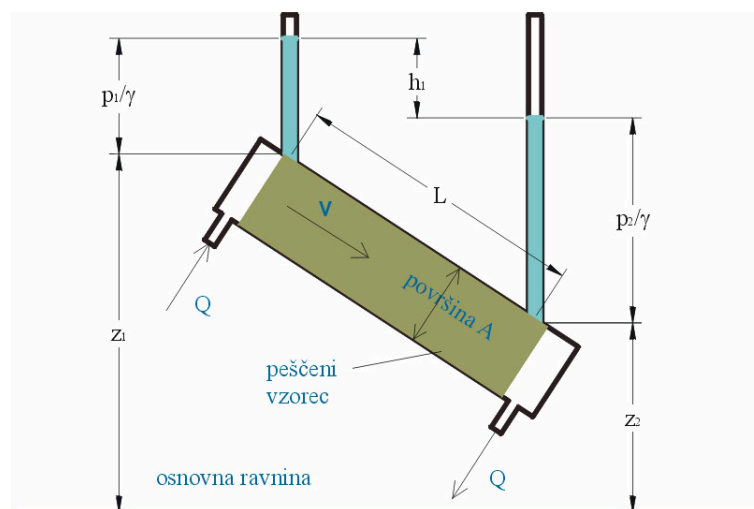


Slika 12: Dvojni porozni model
(Šarler in drugi, 1999)

3.2 GIBANJE PODZEMNE VODE

3.2.1 Darcyjev zakon

Darcyjev zakon predstavlja osnovo za gibanje podzemne vode. V devetnajstem stoletju je Henry Darcy preiskoval tok vode skozi porozno snov. Na podlagi poskusov je odkril, da je hitrost vode skozi porozno snov sorazmerna z izgubo tlačne višine in obratno sorazmerna z dolžino poti toka. Ali povedano drugače, je hitrost vode skozi porozno snov sorazmerna s hidravličnim gradientom. (Viršek, 2003)



Slika 13: Izguba tlačne višine v peščnem vzorcu
(Viršek, 2003)

Če uporabimo Bernoullijevo enačbo, lahko zapišemo vsoto vseh energij v sistemu:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_1, \quad (12)$$

kjer je p tlak, γ specifična teža vode, v hitrost, z višina in h_1 izguba tlačne višine.

Zaradi majhnih hitrosti v porozni snovi, lahko člen s hitrostjo zanemarimo. Če iz enačbe izrazimo izgubo tlačne višine dobimo:

$$h_1 = \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) \quad (13)$$

Iz zgornje enačbe lahko sklepamo, da izguba tlačne višine ni odvisna od naklona stolpca hribine. Henry Darcy je z uporabo hidravlične prevodnosti K postavil zvezo med hitrostjo, izgubo tlačne višine in dolžino vzorca. Darcyjev zakon lahko zapišemo kot:

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial L}, \quad (14)$$

kjer je v Darcyjeva hitrost, K hidravlična prevodnost, $\frac{\partial h}{\partial L}$ pa je hidravlični gradient. Hidravlični gradient predstavlja razliko tlačne višine h med dvema točkama na medsebojni oddaljenosti L . Predznak $[-]$ v zgornji enačbi pomeni, da je smer toka kapljevine v smeri od večjega k manjšemu tlaku. Ker je v realnosti tok kapljevine omejen samo na pore, Darcyjeva hitrost iz zgornje enačbe pa povprečna hitrost kapljevine skozi celoten presek vzorca, moramo Darcyjevo hitrost deliti z efektivno poroznostjo, da dobimo hitrost pronicanja skozi pore. Hitrost kapljevine skozi pore predstavlja hkrati tudi adveksijsko hitrost topljenca skozi porozno snov. (Viršek, 2003)

$$v_p = \frac{v}{n_e}, \quad (15)$$

kjer sta v_p hitrost kapljevine skozi pore in n_e efektivna poroznost.

Darcyjev zakon velja za laminarni tok v porozni snovi. S poskusi je bilo ugotovljeno, da Darcyjev zakon velja samo za majhna Reynoldsova števila ($Re = vd/\gamma$, kjer je d karakteristična dimenzija zrn in γ je kinematična viskoznost), do števila 10, kar zadošča za uporabo v skoraj vseh sistemih podzemnih voda.

Načinov, kako pridobimo podatke za hidravlično prepustnost, je več. Lahko jih pridobimo s testi v laboratoriju, na terenu s terenskimi preizkavami ali pa jih pridobimo iz referenc. (Kumperščak, 2008)

3.2.2 Hidravlična prevodnost

Na hidravlično prevodnost K vplivajo različne fizikalne lastnosti poroznega medija. Hidravlična prevodnost nam pove, koliko tekočine je medij sposoben prenašati. Za peske velja, da je vrednost K višja kot za gline. V spodnji tabeli so prikazane vrednosti hidravlične prevodnosti za nekatere materiale.

Preglednica 5: Hidravlična prevodnost K za različne materiale

(Viršek, 2003)

Material	Hidravlična prevodnost [cm/s]
Prod	$3 \cdot 10^{-2} - 3$
Grobozrnat pesek	$9 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-1}$
Srednjezrnat pesek	$9 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-2}$
Drobnozrnat pesek	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$
Mulj, aluvialni nanosi	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-3}$
Zmes ilovice in peska	$1 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-4}$
Glina	$1 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-7}$
Nepreperela morska glina	$8 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-7}$
Kraški apnenec	$1 \cdot 10^{-4} - 2$
Apnenec in dolomit	$1 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-4}$
Peščenjak	$3 \cdot 10^{-8} - 6 \cdot 10^{-4}$
Skrilavec	$1 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-7}$
Prepusten bazalt	$4 \cdot 10^{-5} - 2$
Poškodovane vulkanske in metamorfne kamnine	$8 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-2}$
Bazalt	$2 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-5}$
Nepoškodovane vulkanske in metamorfne kamnine	$3 \cdot 10^{-12} - 2 \cdot 10^{-8}$
Preperel granit	$5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4}$

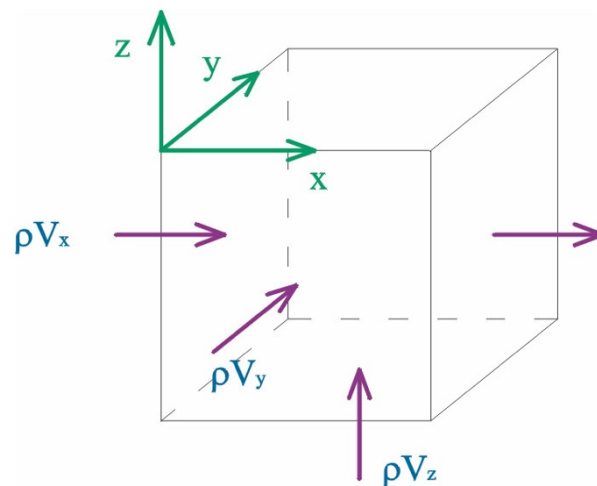
Ker se lahko hidravlična prevodnost zelo spreminja skozi zemljino, se v povezavi z Darcyjevim zakonom podobno spreminjajo tudi pretočne hitrosti.

3.2.3 Glavne enačbe toka

Parcialne diferencialne enačbe (PDE) toka skozi porozno snov dobimo tako, da združimo kontinuitetno enačbo in Darcyjev zakon. Zaradi kompleksnosti PDE, marsikatero enačbo ne znamo rešiti analitično. V takih primerih si pomagamo z računalniškimi programi, ki služijo kot orodja za numerično reševanje PDE.

3.2.3.1 Nespremenljiv nasičen tok

Za primer imamo elementarni kontrolni volumen.



Slika 14: Elementarni kontrolni volumen

(Viršek, 2003)

Za zakon o ohranitvi mase velja, da je razlika vstopajoče in izstopajoče mase enaka spremembi v skladiščenju. V kolikor so pogoji nespremenljivi, dobimo kontinuitetno enačbo:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0 \quad (16)$$

Če predpostavimo, da tekočina ni stisljiva, potem je $\rho(x, y, z)$ konstanta in lahko z deljenjem ta člen izločimo iz enačbe. Prav tako lahko člene V_x, V_y, V_z , zamenjamo z Darcyjevim zakonom in tako dobimo enačbo oblike:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

Dobljeno enačbo imenujemo Laplaceova enačba. Laplaceova enačba velja za eno izmed boljše rešljivih parcialnih diferencialnih enačb. (Viršek, 2003)

3.2.4 Transportni mehanizmi

Med glavne transportne procese v podzemni vodi spadajo advekcija, difuzija, disperzija, sorpcija, in biodegradacija. Pri advekciji se kontaminant giblje skupaj s tokom podzemne kapljevine. Hitrost transporta kontaminanta je enaka hitrosti pronicanja kapljevine skozi porozno snov. Difuzija je molekularni transport, ko se kontaminant giblje s prostora z višjo koncentracijo proti prostoru z nižjo koncentracijo. Disperzija se pojavi zaradi različnih hitrosti v porozni snovi, ki povzročijo procese mešanja. S sorpcijo skupaj poimenujemo procesa absorpcije in adsorpcije. Zaradi procesa sorpcije, se kontaminant giblje počasneje od podzemne vode, ter povzroča zakasnitve pri premikanju onesnaževal. V proces biodegradacije spadajo spremembe organskih snovi zaradi prisotnosti mikroorganizmov. (Viršek, 2003)

3.2.4.1 Advekcija

V procesu advekcije, se kontaminant giblje skupaj s podzemno vodo. Hitrost advekcije je enaka hitrosti pronicanja vode v poroznem materialu in je definirana z enačbo:

$$v_x = \frac{K}{n} \cdot \frac{dh}{dL} \quad (18)$$

V glavni enačbi toka raztopine uporabljamo hitrost pronicanja, ki je enaka povprečni linearni hitrosti onesnaževala. To hitrost dobimo tako, da Darcyjevo hitrost delimo z efektivno poroznostjo.

Da dobimo enodimenzionalni masni tok (F_x), ki je povzročen zaradi procesa advekcije, moramo pomnožiti hitrost in koncentracijo raztopine.

$$F_x = v_x n C, \quad (19)$$

kjer je F_x masni tok, v_x povprečna linearna hitrost in nC masa raztopljenih snovi na enoto volumna porozne snovi (koncentracija).

V določenih primerih, nam da model, v katerem uporabimo samo proces advekcije, dovolj dobre rezultate transporta kontaminantov. Čeprav zanemarimo proces disperzije, pri rezultatih ni bistveno napačnih vrednosti. (Viršek, 2003)

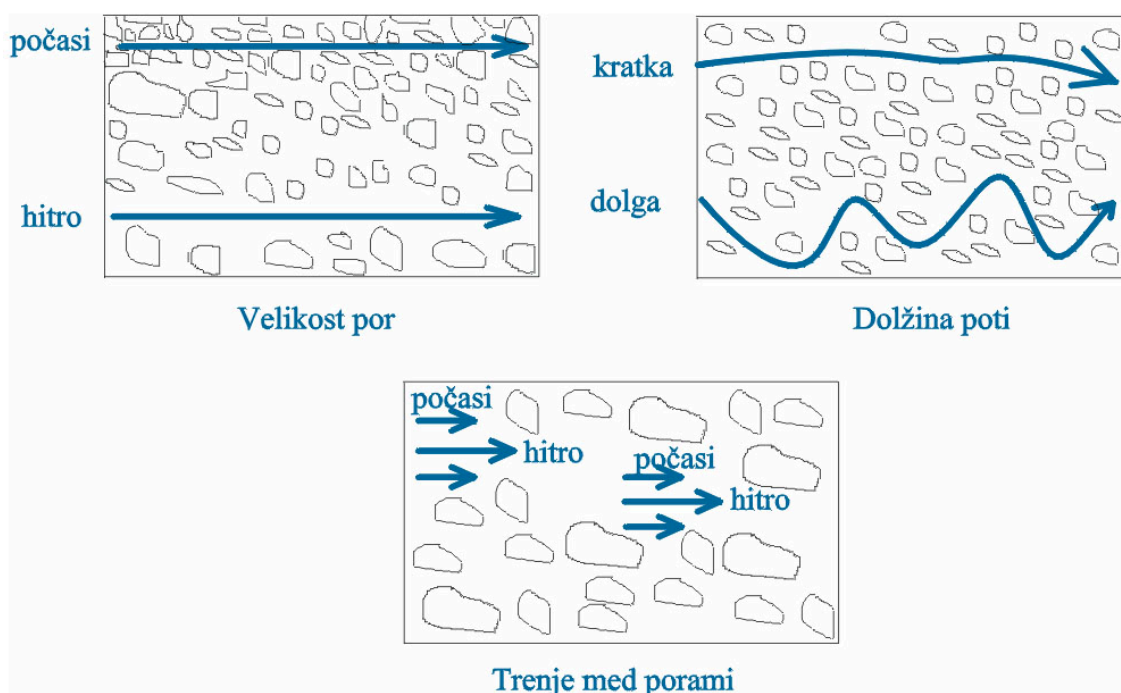
3.2.4.2 Difuzija in disperzija

Različne koncentracije v porozni snovi povzročajo premikanje onesnaževal s procesom difuzije. Razpršenost škodljivih snovi povzroči spremembe v koncentracije, ki povzročijo, da se raztopina v vodi giblje s področja z višjo koncentracijo v smeri k nižji. Proces difuzije je lahko prisoten tudi v primeru, ko kapljevina miruje, torej hitrost ni prosotna. Enodimenzionalni masni transport v porozni snovi, ki je povzročen zaradi procesa difuzije je opisan s prvim Fickovim zakonom difuzije in je oblike:

$$F_x = -D_d \frac{dC}{dx}, \quad (20)$$

kjer je F_x masni tok, D_d difuzijski koeficient in $\frac{dC}{dx}$ gradient koncentracije.

Proces disperzije nastane zaradi heterogene sestave medija, kar povzroča različne hitrosti toka, prav tako pa so različne poti, po katerih tok poteka. Za to so lahko kriva trenja v pornem kanalu, različne hitrosti med kanali ali različne dolžine poti. S testi v laboratorju so na vzorcih prišli do ugotovitve, da je disperzija funkcija povprečne linearne hitrosti in faktorja α , ki ga imenujemo disperzivnost. V spodnji sliki so prikazani faktorji, ki vplivajo na vzdolžno disperzijo D_x kontaminanta v porozni snovi. V literaturi večkrat zasledimo tudi izraz longitudinalna disperzija. (Viršek, 2003)



Slika 15: Faktorji, ki vplivajo na longitudinalno disperzijo

(Viršek, 2003)

Masni transport zaradi disperzije lahko poteka tudi v smeri pravokotno na smer toka, ki jo imenujemo transvezalna smer, proces pa transvezalna disperzija D_y . Transvezalno disperzijo povzroča razhajanje poti v porozni snovi. Če imamo oblak onesnaževala v dveh dimenzijah, je običajno transvezalna disperzija D_y mnogo manjša od longitudinalne D_x in je oblak razpotegnjen v smeri toka. (Viršek, 2003)

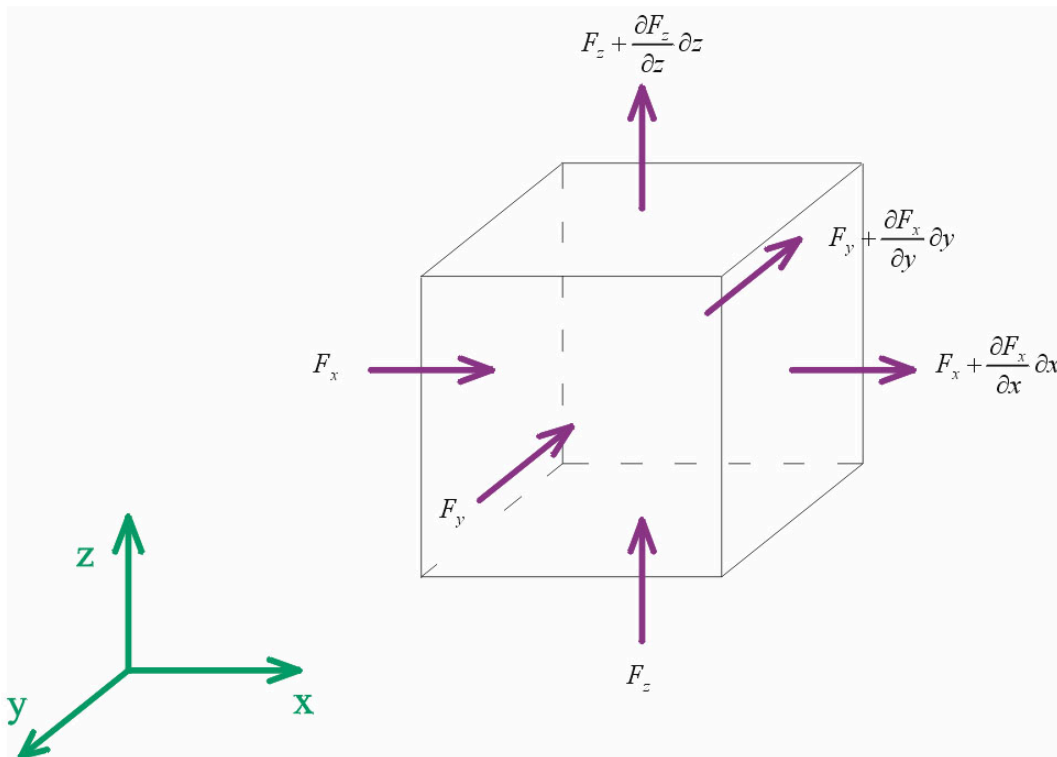
3.2.5 Enačbe transporta snovi

Da dobimo enačbe transporta v porozni snovi, moramo izhajati iz zakona o ohranitvi mase. Izpeljave teh enačb segajo v drugo polovico 20. stoletja, ko sta se jih lotila Ogata (1970) in Bear (1972). Ko izpeljujemo enačbe transporta snovi, moramo privzeti določene lastnosti: da imamo homogono porozno snov, ki je izotropna, medij je nasičen, imamo nespremenljiv tok in veljaven Darcyjev zakon. Tok lahko določimo s hitrostjo precejanja. To hitrost imenujemo tudi povprečna linearna hitrost, s katero se prenaša kontaminant s procesom advekcije. Če upoštevamo advekcijo kot edini mehanizem transporta, lahko dobimo konzervativne rezultate, saj so v naravi prisotni še ostali procesi.

Za zapis zakona o ohranitvi mase moramo pregledati tok v in iz reprezentativnega elementarnega volumna v v porozni snovi (slika 16). Specifični odtok v ima komponente v_x , v_y , v_z in povprečna linearna hitrost $\bar{v} = v/n$, ima komponente \bar{v}_x , \bar{v}_y , \bar{v}_z . Advekcija ima povprečno hitrost \bar{v} . Masa snovi na enoto volumna raztopine je definirana kot koncentracija snovi C , zato je masa raztopljenega snovi na enoto

volumna poroznega materiala nC . Za homogen medij je značilno, da je efektivna poroznost n konstantna in velja:

$$\frac{\partial(nC)}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial x} \quad (21)$$



Slika 16: Ohranitev mase v elementarni kocki
(Viršek, 2003)

Maso raztopine F , ki se premika v smeri x lahko opišemo z spodnjima enačbama.

Za transport z advekcijo velja:

$$F_A = \bar{v}_x n C d A. \quad (22)$$

Za transport z disperzijo velja:

$$F_D = n D_x \frac{\partial C}{\partial x} d A, \quad (23)$$

kjer je D_x koeficient hidrodinamične disperzije v smeri x in dA površina prereza elementarne kocke.

Koeficient hidrodinamične disperzije je v relaciji z disperzivnostjo α_x in difuzijskim koeficientom D_d . To zvezo lahko zapišemo z enačbo:

$$D_x = \alpha_x \bar{v}_x + D_d \quad (24)$$

S F_x označimo celotno maso raztopljene snovi na enoto prereza. Če transport raztopine poteka v smeri x , lahko zapišemo enačbo toka v smeri x :

$$F_x = \bar{v}_x nC - nD_x \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (25)$$

kjer prvi člen predstavlja transport z advekcijo, drugi člen pa transport z disperzijo. Pred delom, ki predstavlja disperzijo, je negativni predznak, saj transport poteka v smeri s področja z večjo k manjši koncentraciji. Na enak način lahko zapišemo še enačbi toka v smeri y in smeri z .

$$F_y = \bar{v}_y nC - nD_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (26)$$

$$F_z = \bar{v}_z nC - nD_z \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (27)$$

Skupna količina raztopine, ki vstopa v elementarni volumen je:

$$F_x \cdot dz \cdot dy + F_y \cdot dx \cdot dz + F_z \cdot dx \cdot dy \quad (28)$$

Skupna količina iztopajoče raztopine je:

$$\left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx\right) \cdot dz \cdot dy + \left(F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy\right) \cdot dx \cdot dz + \left(F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz\right) \cdot dx \cdot dy \quad (29)$$

Razlika med vstopajočo in iztopajočo količino raztopljene snovi je:

$$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}\right) dx \cdot dy \cdot dz \quad (30)$$

Ker razlika med vstopajočo in iztopajočo količino ostane v elementu, lahko to količino mase zapišemo kot:

$$-n \frac{\partial C}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz \quad (31)$$

Če zgornja izraza združimo dobimo:

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = -n \frac{\partial C}{\partial t} \quad (32)$$

Ko v zgornjo enačbo vstavimo izraze za enačbo toka F_x , F_y in F_z , ter jo delimo z n , dobimo novo enačbo:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right) \\ & - \left(\frac{\partial}{\partial x} \cdot (\bar{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot (\bar{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\bar{v}_z C) \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (33)$$

Če imamo homogeno snov, kjer velja, da so hitrosti stalne in nespremenljive se tudi koeficienti D_x , D_y in D_z ne spreminjajo v prostoru. Potem lahko zgornjo enačbo zapišemo kot:

$$\left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \left(\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y} + \bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (34)$$

3.2.6 Sorpcija in ostale kemijske reakcije

Ko onesnaževalo razpada v podtalnici, je lahko prisotnih več procesov. Med najpogostejše spadajo: sorpcija, izhlapevanje, kemična precipitacija, biodegradacija, nebiotske kemične reakcije, oksidacija, redukcija in razpad radioaktivnih elementov.

»Sorpcija povzroča, da se giblje onesnaževalo počasneje kakor podzemna voda in s tem povzroča t.i. zakasnitev«. (Viršek, 2003). Za razliko od ostalih procesov, ki vplivajo le na razpad, sorpcija vpliva tudi na migracijo snovi.

3.2.6.1 Faktorji, ki vplivajo na sorpcijo

Na sorpcijo vplivajo številni faktorji, ki jih razdelimo v tri skupine. V prvo skupino spadajo značilnosti onesnaževala, med katerimi sta najpomembnejši topnost v vodi in polarnost molekule. Sledijo značilnosti zemljine, kjer so pomembni mineralogija, prepustnost/poroznost, teksture, homogenost, vsebnost organskega ogljika, električni naboj površine in specifična površina. V zadnjo skupino spada

značilnost prenaševalca, ki je v večini primerov podzemna voda. Pomembni faktorji v tej skupini so pH fluida, vsebnost soli in prisotnost neraztopljenega organskega ogljika. (Viršek, 2003)

3.2.6.2 Sorpcijske izoterme

Da dobimo sorpcijske izoterme, moramo ločiti del kontaminanta, ki je raztopljen v vodi in del ki je vezan na trdne delce. Dobljene deleže vrišemo v graf in sicer v kartezični koordinatni sistem, kjer na ordinatno os vnesemo maso kontaminanta glede na težo trdne snovi (S), na abscisno os pa koncentracijo kontaminanta, ki je raztopljen v vodi. To odvisnost na grafu imenujemo sorpcijska izoterma. Poznamo tri vrste sorpcijskih izoterm. linearno, Freundlichovo in Langmuirjevo, za katere veljajo naslednje enačbe:

$$S = K_d C^N \quad (35)$$

Linearna sorpcijska izoterma

$$S = K_d C^{\frac{1}{N}} \quad (36)$$

Freundlichova sorpcijska izoterma

$$S = \frac{\alpha\beta C}{1 + \alpha C} \quad (37)$$

Langmuirjeva sorpcijska izoterma

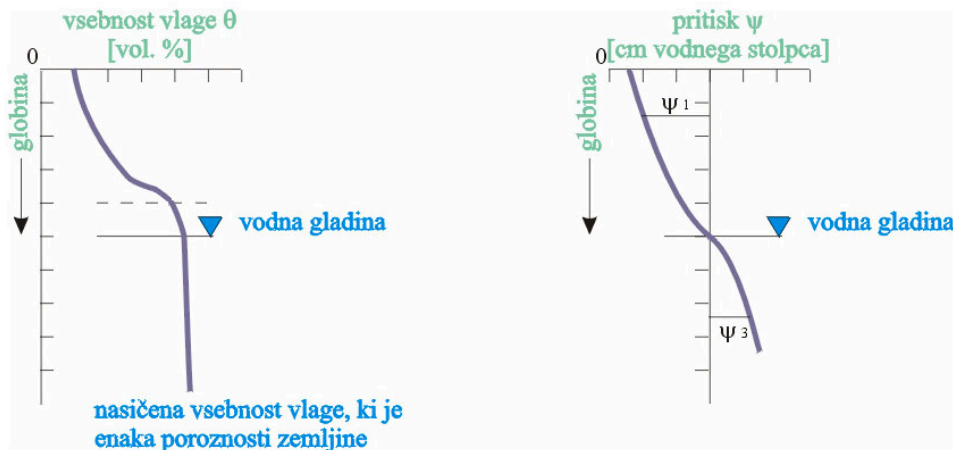
K_d je koeficient porazdelitve. Pri linearni sorpcijski izotermi je K_d naklon izoterme. (Viršek, 2003)

3.2.7 Tok in transport v nezasičeni coni

Če imamo nezasičeno zemljino, so tok in transportni mehanizmi veliko kompleksnejši kot v nasičenem mediju. V nezasičeni zemljini so namreč pore deloma zapolnjene s tekočino in deloma z zrakom. Zato je v tem primeru skupna ali totalna napetost določena z vsoto vsebnosti vlage in zraka

$$n = \theta_w + \theta_a, \quad (38)$$

kjer je θ_w vsebnost vlage in θ_a vsebnost zraka. Vsebnost vlage θ_w dobimo, če prostornino vsebovane vode delimo s skupno prostornino vzorca. Nezasičena (nesaturirana) cona je tisti del zemljine, kjer je vsebnost vode manjša kot je poroznost. V tistem delu zemljine je tlak vode negativen. V sliki je prikazana sprememba vsebnosti vlage in sprememba tlaka vode v odvisnosti od globine. (Viršek, 2003)

Slika 17: Odnos θ in ψ v nesaturirani zemljini

(Viršek, 2003)

Nad vodno gladino se lahko pojavi kapilarni rob. Na tem območju so pore nasičene, tlak pa malo pod zračnim tlakom. Ta cona je pri peščenih materialih zelo majhna, lahko pa meri tudi več metrov pri glinenih materialih. Toeretično je tlak ψ negativen povsod nad gladino vode, v nivoju vodne gladine je enak 0, v nasičeni coni pa so tlaki ψ pozitivni. Negativni tlak imenujemo tudi kapilarni podtlak.

V nezasičeni zemljini sta vsebnost vlage θ in hidravlična prevodnost K funkciji kapilarnega podtlaka ψ . Z laboratorijskimi preiskavami je bilo tudi ugotovljeno, da se odnos vsebnosti vlage in kopilarnega podtlaka spreminja za vsak tip zemljine. Pri normalnem tlaku je snov zasičena, ko je vsebnost vlage θ_w enaka θ_s . Ko se kapilarni tlak manjša, začne voda odtekati iz zemljine. S tem se manjša tudi vsebnost vlage v zemljini dokler ne dosežemo točke, kjer je minimalna vlažnost zemljine θ_r . Četudi še naprej zmanjšujemo kapilarni tlak, to ne vpliva na vsebnost vlage v zemljini.

Povezavo vsebnosti vode v zemljini in kapilarnega tlaka opisuje kar nekaj empiričnih enačb. Brooks in Corey (1964) sta zapisala neslednjo zvezo:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{-\lambda}, \quad (39)$$

kjer je θ volumska vsebnost vlage, θ_s volumska vsebnost vode ob nasičenju, θ_r minimalna vsebnost vode, ki se ne zmanjša, ψ kapilarni podtlak, ψ_b kritični kapilarni tlak (kjer je $\theta = \theta_s$, na krivulji $\theta - \psi$) in λ eksperimentalno izpeljan parameter.

Brooks in Corey (1964) sta izpeljala tudi zvezo za efektivno saturacijo, ki jo zapišemo tako:

$$S_e = \frac{S_w - \theta_r}{1 - \theta_r}, \quad (40)$$

kjer je S_w koeficient saturacije in ga dobimo s količnikom θ/θ_s

Zvezo med kapilarnim tlakom in volumsko vsebnostjo vode pa je leta 1980 izpeljal van Genuchten:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}, \quad (41)$$

kjer so α , n in m konstante.

Zgornje enačbe v splošnem dobro veljajo za srednje in grobo zrnate zemljine. Za gline in melje pa so običajno manj natančne. Te enačbe navadno uporabljamo v računalniških programih, kjer modeliramo tok v nesaturirani coni in z njimi opišemo lastnosti zemljine. (Viršek, 2003)

3.2.7.1 Nezasičena hidravlična prevodnost

Z raziskavami je bilo ugotovljeno, da Darcyjev zakon velja tudi za nezasičen tok. Izjema je hidravlična prevodnost, ki je v tem primeru funkcija vsebnosti vlage, Darcyjev zakon pa zapišemo z nezasičeno hidravlično prevodnostjo:

$$v = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (42)$$

kjer je v Darcyjeva hitrost, z globina, h potencial oz. tlak, ki je enak $z + \psi$, ψ podtlak, $K(\theta)$ nenasičena hidravlična prevodnost, θ volumska vsebnost vlage.

Nenasičeno hidravlično prevodnost $K(\theta)$ lahko dobimo na različne načine. Lahko jo določimo s preiskavami, lahko pa uporabimo ocene glede na parametre zemljine. Za to uporabimo enačbe ki so jih izpeljali Brooks in Corey (1964) in van Genuchten (1980) katerih rezultati se le malo razlikujejo od izmerjenih.

3.2.7.2 Enačba nezasičenega toka

Nivo podzemne vode je meja med zasičenim in nezasičenim profilom zemljine. To mejo lahko definiramo kot ploskev, kjer sta tekočinski in atmosferski tlak enaka ($P = 0$). Iz tega lahko zapišemo skupni hidravlični tlak $h = z + \psi$; kjer je kapilarni tlak $\psi = P/\rho g$.

Enačbo nezasičenega toka je pričel razvijati Richards (1931). Enačba temelji na Darcyjevem zakonu, ki ga vstavimo v kontinuitetno enačbo nezasičenega toka in dobimo:

Darcyjev zakon:

$$v = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z}. \quad (43)$$

Kontinuitetna enačba nezasičenega toka:

$$-\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial t} \rho \theta. \quad (44)$$

Če združimo zgornji enačbi, dobimo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(K(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}, \quad (45)$$

kjer je θ volumska vsebnost vlage, z globina, ψ kapilarni tlak in $K(\theta)$ nazasičena hidravlična prevodnost.

Dobljeno nelinearno parcialno diferencialno enačbo imenujemo Richardsova enačba. V enačbi so nekatere poenostavitve: zanemarjena je prisotnost zraka, voda je nestisljiva in zemljina nedeformabilna. Ker je enačba težko rešljiva so bile razvite številne analitične in numerične metode reševanja. Ker analitični približki zahtevajo precejšnje poenostavitve, so primernejše numerične metode (metoda končnih diferenc in metoda končnih elementov), ki omogočajo natančnejše opise robnih pogojev in lastnosti materialov. (Viršek, 2003)

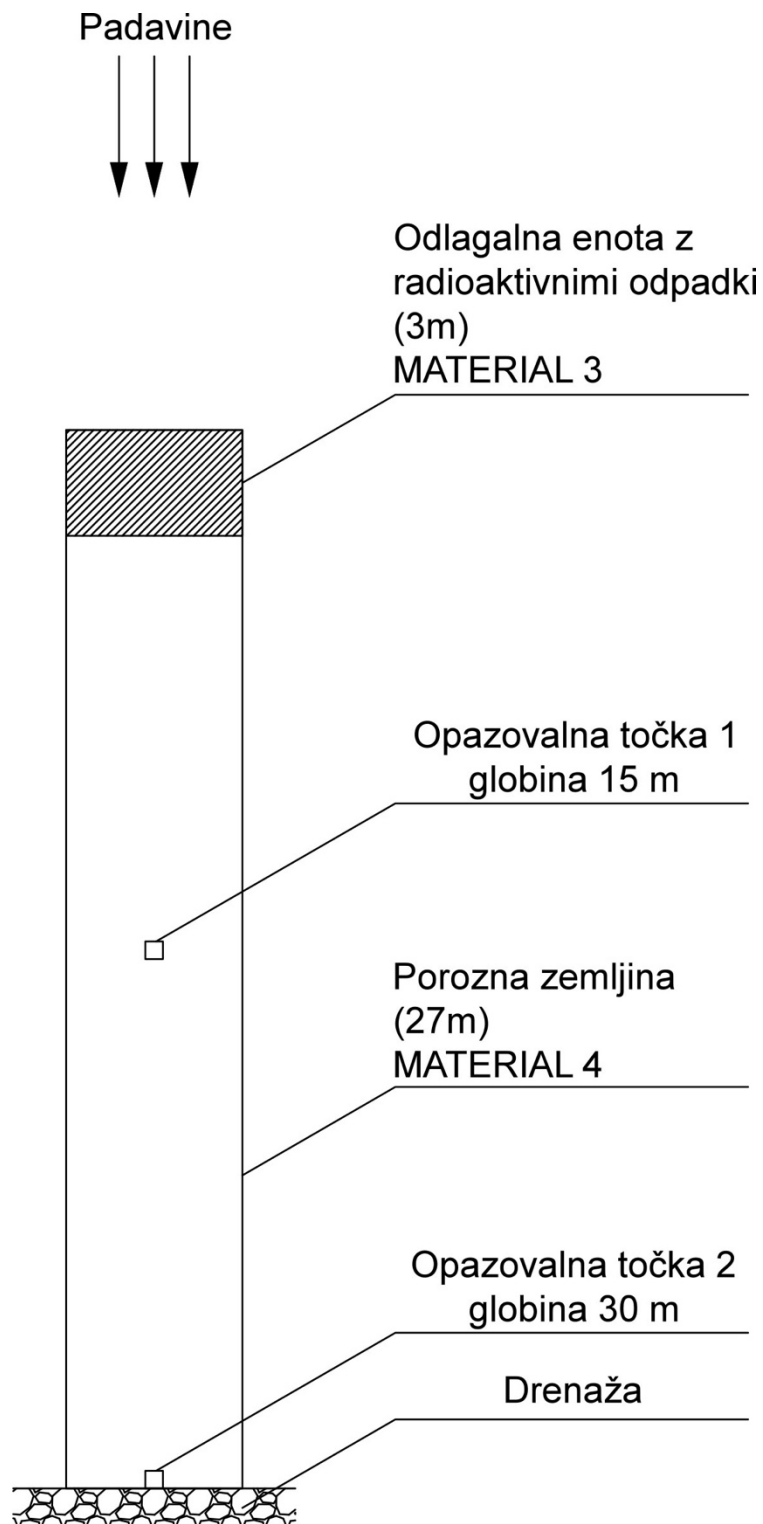
4 MODEL ODLAGALIŠČA NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

V tem poglavju bomo naredili dva modela površiskega tipa odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO). Prvi model predstavlja odlagališče globine 30 m, kjer so pri površju v materialu 3 odloženi radioaktivni odpadki (slika 18). Pri drugem modelu (slika 19), bomo temu odlagališču dodali prekrrov, ki ga sestavljata plast materiala 1 in plast materiala 2. Nad odlagališčem smo predpostavili konstantne padavine 0,27 mm/dan, kar na leto znese okoli 1000 mm. Opazovali bomo, kako prekrrov vpliva na pretok vode skozi odlagališče in s tem povzročene migracije radionuklidov v navpični smeri. Rezultate bomo opazovali v dveh opazovalnih točkah na globini 15 in 30 m.

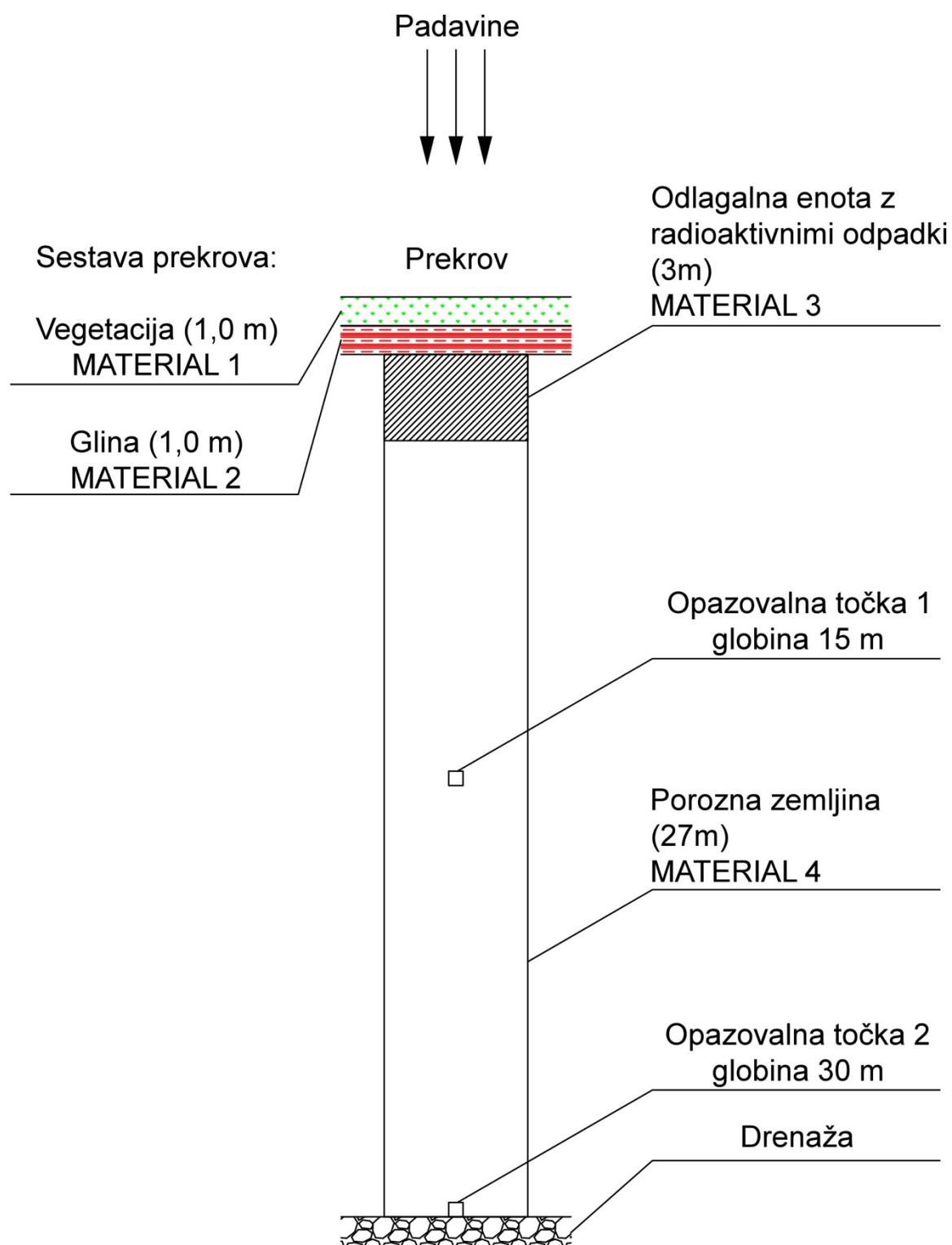
Potrebno je poudariti, da se naš model zelo razlikuje od realne situacije. V realni situaciji so odpadki odloženi v betonski blok, ki je dodatno zaščiten s hidroizolacijo. Ker je hidroizolacija teoretično vodoneprepustna, bi to v našem primeru pomenilo, da je faktor nasičene hidravlične prevodnosti K_s enak 0. To bi pomenilo, da skozi odlagališče ne bi bilo nič pretoka. V realnosti, pa se kljub hidroizolaciji čez čas pojavijo mikro razpoke, bodisi zaradi napak pri izgradnji, bodisi zaradi neobstoynosti materialov, ki omogočajo vodi, da se prebije do odpadkov. Zaradi tega smo sloj hidroizolacije pri modeliranju izpustili.

Prav tako ima pri prekrovu zelo pomembno vlogo dreniranje. V realni situaciji je prekrrov sestavljen iz več prepustnih (pesek, prod, gramoz) in neprepustnih slojev (glina, ilovica) zemljine. Med temi sloji so drenaže, ki vodo drenirajo stran od odlagališča v vodoravni smeri in preprečujejo, nadaljevanje poti v navpični smeri in s tem stik z odpadki. V našem primeru drenaže nismo upoštevali, saj imamo eno-dimenzionalni program, kjer pretoki potekajo samo v eni smeri. Četudi bi umestili drenažni sloj med plastjo vegetacije in gline, bi voda še vedno pronicala samo v navpični smeri in naloga drenaže ne bi bila izpolnjena.

Za modeliranje smo uporabili računalniški paket HYDRUS-1D. Obstajata tudi različici programa HYDRUS 2D/3D, ki omogočata natančnejše modeliranje v dveh ali treh dimenzijah.



Slika 18: Model odlagališča NSRAO brez prekrova



Slika 19: Model odlagališča NSRAO s prekrivom

4.1 Programski paket HYDRUS-1D

Programski paket HYDRUS-1D je na metodi končnih elementov zasnovan računalniški program za simulacijo eno- dimenzionalnega gibanja vode, toplote in raztopin v različno nasičenem mediju.

HYDRUS-1D za nasičen in nenasičen pretok vode numerično rešuje Richardsovo enačbo. Za prenos toplote in raztopin pa uporablja Fickovo adveksijsko disperzijsko enačbo. Program se lahko uporablja za analizo gibanja podzemne vode in raztopin v nenasičeni, delno ali polno nasičeni porozni snovi.

Hidravlične lastnosti v nenasičenem mediju so v programu opisane s pomočjo van Genuchtenovih (1980), Brooks in Coreyevih (1964), ter modificiranih van Genuchtenovih analitičnih funkcij. Te funkcije dajo različne zveze med hidravličnimi lastnostmi, ki so potrebne za izračun nenasičenega toka.

Glavni enačbi pretoka in transporta se v programu rešujeta z uporabo Galerkinove sheme linearnih končnih elementov. (PC Progress, 2016)

4.1.1 Matematično modeliranje pretoka vode v programskem paketu

Obravnavali bomo enodimenzijski enakomerni pretok vode skozi delno satutiran porozen medij. Matematično gledano, omenjeno količino opisuje nekoliko modificirana Richardsova enačba:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right) - S. \quad (46)$$

V njej želimo določiti funkcijo tlačne višine $h(x, t)$ v odvisnosti od časa t in pozicije delca x . V splošnem modelu nastopata tudi kot smeri pretoka glede na vertikalno os α in koeficient ponora S , ki ju bomo nastavili na $\alpha = S = 0$ in obravnavali enačbo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right) = \frac{\partial K}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) + K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (47)$$

Da bo to res parcialna enačba ene funkcije potrebujemo tudi odvisnost parametrov θ in K od funkcije h . Vsebnost vlage θ opišemo z van Genuchtenovim modelom:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m}, \quad (48)$$

kjer je θ_r vsebnost ostanka vlagnosti, θ_s vsebnost zasičene vlažnosti, α inverzna vrednost vhoda zraka v zemljino, n indeks porazdelitve por in $m = 1 - (1/n)$ za $n > 1$. Enačba velja, v kolikor je zadoščen pogoj $h < 0$, v primeru $h \geq 0$ pa je $\theta(h) = \theta_s$. Drugo funkcijo opišemo z Mualemovim modelom statistično pridobljenih podatkov velikosti por zemlje:

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (49)$$

in

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}. \quad (50)$$

Tu je K_s zasičena hidravlična prevodnost, S_e efektivna vsebnost vode. Za l lahko vzamemo kar 0,5 kot ocenjeno vrednost za večino tipov zemljin. V nadaljevanju bomo na kratko predstavili še dve osnovni metodi za numerično reševanje te enačbe. (Šimunek in drugi, 2013)

4.1.2 Metoda končnih diferenc

Denimo, da opazujemo enačbo (46) za $x \in [0, L]$ in $t \geq 0$, ter da imamo podan začetni in dva robna pogoja

$$h(0, x) = h_0(x), h(t, 0) = f(t), h(t, L) = g(t).$$

Takrat se lahko lotimo reševanja z diskretizacijo. To pomeni, da območje $[0, L] \times [0, T]$ za iskani čas $T > 0$ razdelimo v mrežo točk

$$t_i = i \cdot \Delta t, i = 1, 2, \dots, M,$$

$$x_j = j \cdot \Delta x, j = 1, 2, \dots, N,$$

kjer sta $\Delta t = T/M$ in $\Delta x = L/N$. Nadalje označimo z $h_{i,j} = h(t_i, x_j)$, $K_{i,j} = K(h_{i,j})$ in $\theta_{i,j} = \theta(h_{i,j})$.

Odvode aproksimiramo z diferencami

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t}(h_{i,j}) &\cong \frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}}{\Delta t}, \\ \frac{\partial K}{\partial x}(h_{i,j}) &\cong \frac{K_{i,j+1} - K_{i,j-1}}{2\Delta x}, \\ \frac{\partial h}{\partial x}(t_i, x_j) &\cong \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta x}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}(t_i, x_j) \cong \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j} + h_{i,j-1}}{\Delta x^2},$$

Tako dobimo diskretno obliko enačbe:

$$\frac{\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}}{\Delta t} = \frac{K_{i,j+1} - K_{i,j-1}}{2\Delta t} \left(\frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta t} + 1 \right) + K_{i,j} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j} + h_{i,j-1}}{\Delta x^2}$$

Zaradi robnih oziroma začetnega pogoja poznamo vrednosti $h_{0,j} = h_0(x_j)$, $h_{0,j} = f(t_i)$ in $h_{i,N} = g(t_i)$, ter poslednično $\theta_{i,j}$ in $K_{i,j}$ za $i = 0$ ali $j = 0$. Poslednično lahko iz zgornje zveze določimo vrednosti za $\theta_{1,j}$. V kolikor znamo iz enačbe (48) določiti vrednosti $h_{1,j}$ lahko nadaljujemo na nivo $i = 2$ (in nadalje do $i = T$), sicer pa moramo uporabiti bolj zapleten interaktiven pristop. (Šimunek in drugi, 2013)

4.1.3 Metoda končnih elementov

Drugi pristop k reševanju enačbe (46) je preko metode končnih elementov. Znova bomo enačbo reševali za $x \in [0, L]$ in $t \geq 0$ ob znanih pogojih

$$h(0, x) = h_0(x), h(t, 0) = f(t), h(t, L) = g(t).$$

Ideja metode je, da skušamo rešitev h aproksimirati kot vsoto

$$h(t, x) = \sum_{i=1}^N \phi_i(x) h_i(t), \quad (51)$$

kjer je ϕ_i nabor baznih funkcij. Te za $\Delta x = L/N$ in $x_j = j \cdot \Delta x$ zadoščajo

$$\phi_i(x_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases},$$

ter so na intervalu $[x_{i-1}, x_i]$ odsekoma linearne, izven njega pa ničelne. Če torej določimo vrednost koeficientov $h_i(t)$ dobimo aproksimacijo rešitve z odsekoma linearno funkcijo, ki se z večanjem števila N izboljšuje.

Pri metodi končnih elementov uporabimo Galerkinov pogoj, ki predvideva, da je diferencialni operator povezan z enačbo (46) pravokoten na vse bazne funkcije:

$$\int_0^L \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right] \right) \phi_i(x) dx = 0.$$

Če integriramo po delih dobimo

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} \phi_i(x) + K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \phi_i'(x) dx - \left[\phi_i(x) K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right]_0^L = 0$$

Vrednost izven integrala označimo za b_i . Nadalje, vstavimo nastavek (51) in dobimo:

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} \phi_i(x) dx + \sum_{j=1}^N h_j(t) \int_0^L K \phi_i'(x) \phi_j'(x) dx = b_i - \sum_{j=1}^N \int_0^L K \phi_i'(x) dx$$

Uporabimo še ključno predpostavko o utežnosti časovnih odvodov za ϕ

$$\phi_i = \frac{\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} \phi_i(x) dx}{\int_0^L \phi_i(x) dx}$$

Tako dobimo matrični sistem za vektorja $\vec{\phi} = (\phi_1, \dots, \phi_N)$ in $\vec{h} = (h_1, \dots, h_N)$:

$$F \frac{d\vec{\phi}}{dt} + A\vec{h} = \vec{c},$$

kjer je F diagonalna matrike z elementi

$$F_{i,i} = \int_0^L \phi_i(x) dx.$$

Komponente matrike A so enake

$$A_{i,j} = \int_0^L K \phi_i'(x) \phi_j'(x) dx,$$

komponente vektorja \vec{c} pa

$$c_i = b_i - \sum_{j=1}^N \int_0^L K \phi_i'(x) dx.$$

Kot pri prejšnji metodi lahko z uporabo diference za θ pridemo do rešitev na naslednjem časovnem nivoju, vendar pa je treba tudi tu upoštevati, da koeficienti matrike A in vektorja c vsebujejo funkcijo K , ki je odvisna od h . Torej gre za nelinearen sistem enačb, ki ga je potrebno rešiti s katero izmed iterativnih metod.

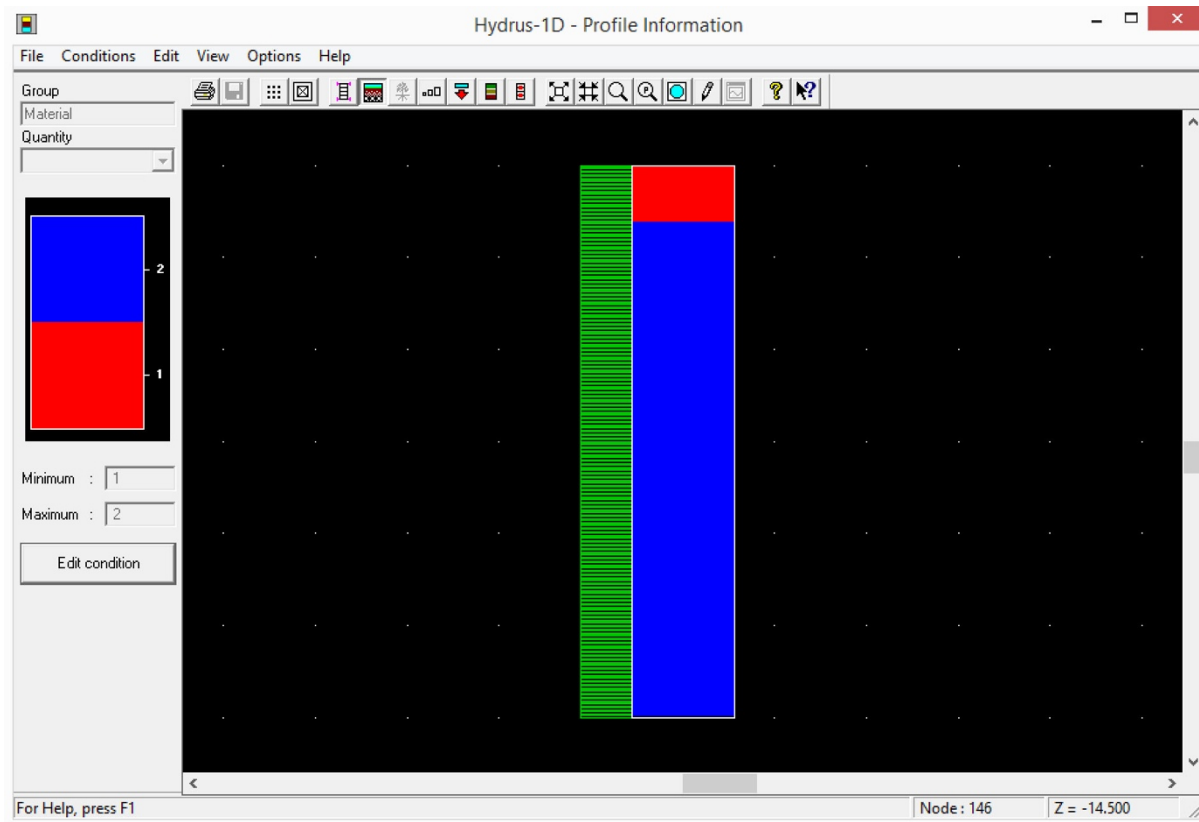
4.2 Model transporta

Model transporta radionuklidov smo v našem primeru naredili v dveh korakih. V prvem delu smo naredili model dveh odlagališč, enega brez prekrova in enega s prekrivom, katerima smo dodali konstantne padavine, ter opazovali pretok vode. Za ta modela smo uporabili čas trajanja 3000 dni, ter količino padavin 0,0027 m/dan. V drugem delu pa smo modeloma dodali še specifične aktivnosti radionuklidov in ostale potrebne parametre. Uporabili smo dva radionuklida, cezij (^{137}C) in jod (^{129}I). Čeprav je inventar realnega odlagališča radioaktivnih odpadkov bistveno večji, smo izbrali le dva, saj bi obravnava vseh predstavljala prevelik obseg v naši nalogi. V drugem delu smo čas opazovanja povečali na 30000 dni.

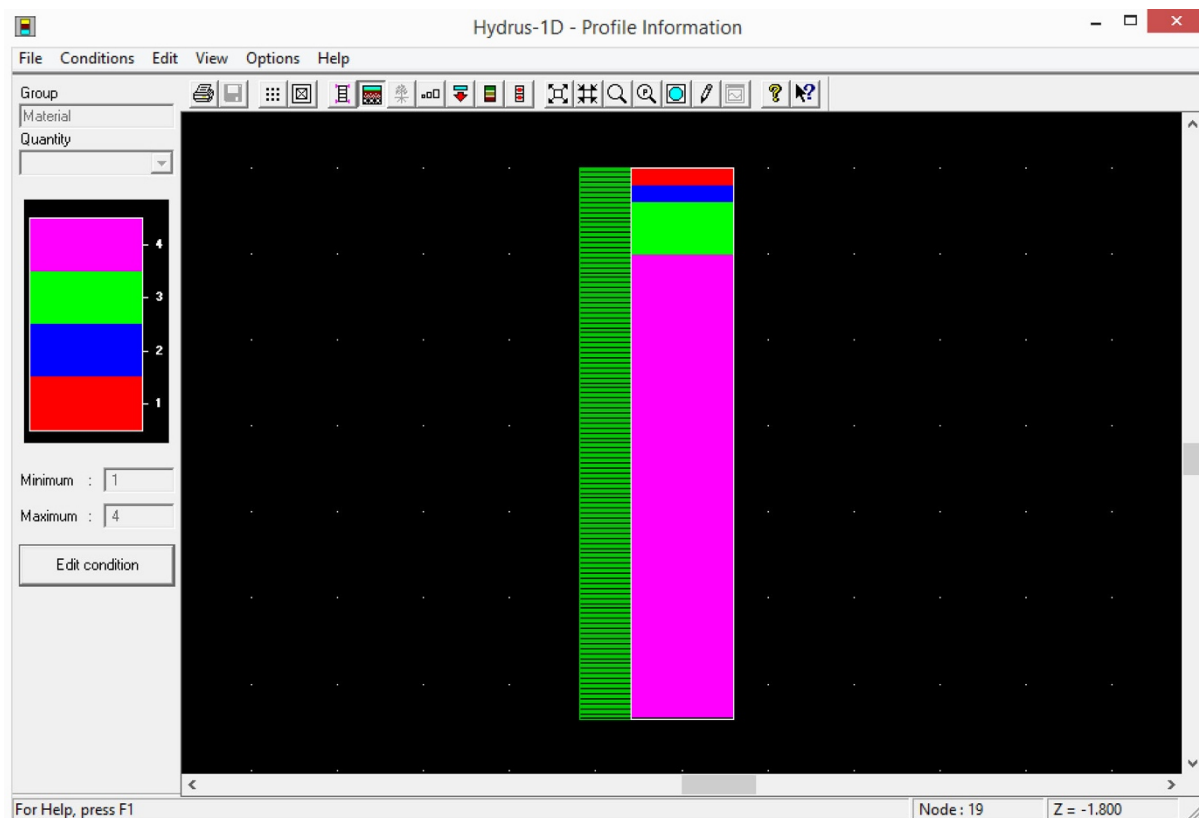
Model smo v našem primeru zelo poenostavili. Lastnosti materialov, ki smo jih poimenovali materiali 1-4 smo prilagodili našemu primeru in se od dejanskih materialov nekoliko razlikujejo. V fazi izdelovanja diplomske naloge so bili izdelani tudi modeli z realnimi podatki, vendar so bile razlike v hidravlični prevodnosti materialov med seboj prevelike in je težave predstavljala diskretizacija prostora. V takih primerih numerični postopek ni konvergirala. Opaziti je bilo tudi, da kompleksnejši modeli za konvergenco porabijo ogromno časa, več dni ali celo ves teden. Zato smo se odločili da obsežnost modela zmanjšamo do takšne mere, da bodo izračuni izvedeni v za nas sprejemljivih časih. Takšna zmanjševanja pripeljejo do poenostavitev, ki ne dajo realnih rezultatov.

4.2.1 Geometrija modela

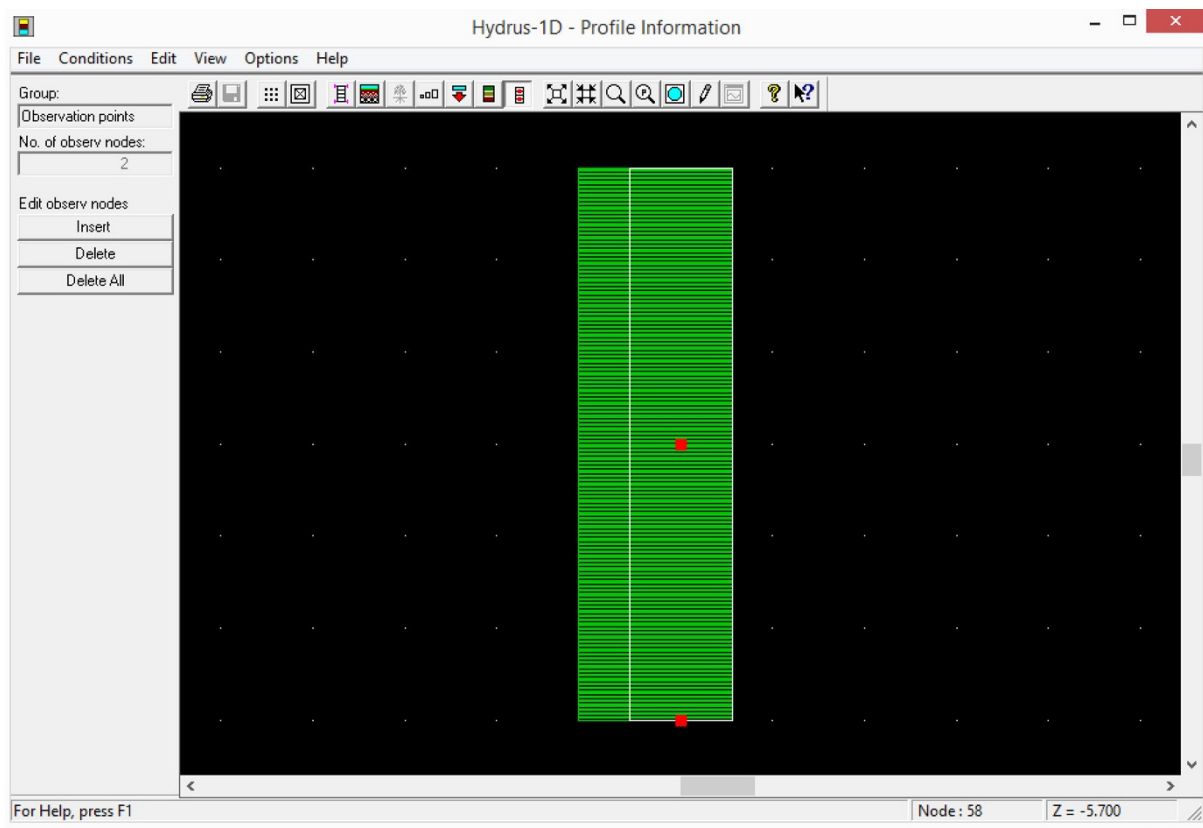
Izdelan model predstavlja pokončni prerez površinskega odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. Globina območja v modelu brez prekrova je 30 m. Zgoraj je 3 m pas zemljine iz materiala 3, v katerem so vloženi radioaktivni odpadki, v nadaljevanju pa 27 m pas matične kamnine, sestavljene iz materiala 4. Opazovalni točki sta na globini 15 in 30 m. Model s prekrivom je sestavljen enako, le da je na vrhu prekriv, ki ga sestavljata sloj vegetacije, katere lastnosti opisuje material 1, ter manj prepusten sloj iz materiala 2. Skupna globina odlagališča s prekrivom je 32 m, opazovalne točke pa so zaradi 2 m prekrova na globini 17 in 32 m. Model odlagališča brez prekrova je sestavljen iz 301 vozlišč, model s prekrivom pa iz 321 vozlišč.



Slika 20: Geometrija modela odlagališča NSRAO brez prekrova



Slika 21: Geometrija modela odlagališča NSRAO s prekrovom



Slika 22: Opazovalne točke na modelu odlagališča

4.2.2 Lastnosti uporabljenih materialov

Materiali so zaradi težav s konvergiranjem modela nekoliko drugačni od realnih. Uporabljeni materiali so zbrani v preglednici 6.

Preglednica 6: Hidravlične lastnosti uporabljenih materialov v modelu

Material	Q_r [-]	Q_s [-]	α [1/m]	n [-]	K_s [m/dan]	L [-]
Material 1	0,078	0,43	3,6	1,56	0,25	0,5
Material 2	0,068	0,38	0,8	1,09	0,05	0,5
Material 3	0,065	0,41	7,5	1,89	1	0,5
Material 4	0,057	0,41	12,4	2,28	3,5	0,5

4.2.3 Robni pogoji

V modelu so bili uporabljeni naslednji robni pogoji:

Robni pogoj zgoraj: konstanten pretok (Constant Flux) 12 mm/dan,

Robni pogoj spoda: prosto odtekanje (Free Drainage).

Za spodnji robni pogoj smo drenažo izbrali zato, da smo ustvarili pretok skozi vzorec. Če voda na dnu modela ne bi odtekala, bi tok vode potekal, dokler se model ne bi popolnoma napolnil oziroma bi dobili nasičen vzorec. Poleg konstantnega pretoka program omogoča tudi vnos realnih meteoroloških podatkov o padavinah, kateri poleg količine padavin vključujejo še površinski odtok in evaporacijo.

4.2.4 Migracije radionuklidov

Migracije radionuklidov v odlagališču so odvisne od transportnih mehanizmov. Poleg advekcije na prenos specifične aktivnosti radionuklidov vpliva tudi disperzija in difuzija. Podatki o uporabljenih radionuklidih in materialih so zbrani v preglednicah 7 in 8.

Preglednica 7: Parametri materialov glede na izbran radionuklid in parametri radionuklida

Radionuklid	Longitudinalna disperzivnost	Molekularna difuzija	Koefficient porazdelitve K_d [m ³ /kg]			
	[m]		Mat 1	Mat 2	Mat 3	Mat 4
Cezij (¹³⁷ Cs)	1	1,77E-04	0,003	0,19	0,003	0,003
Jod (¹²⁹ I)	1	4,14E-07	0,01	0,0643	0,01	0,01
		Prostorninska gostota [kg/m ³]	1600	2200	1600	1500

Preglednica 8: Lastnosti uporabljenih radionuklidov

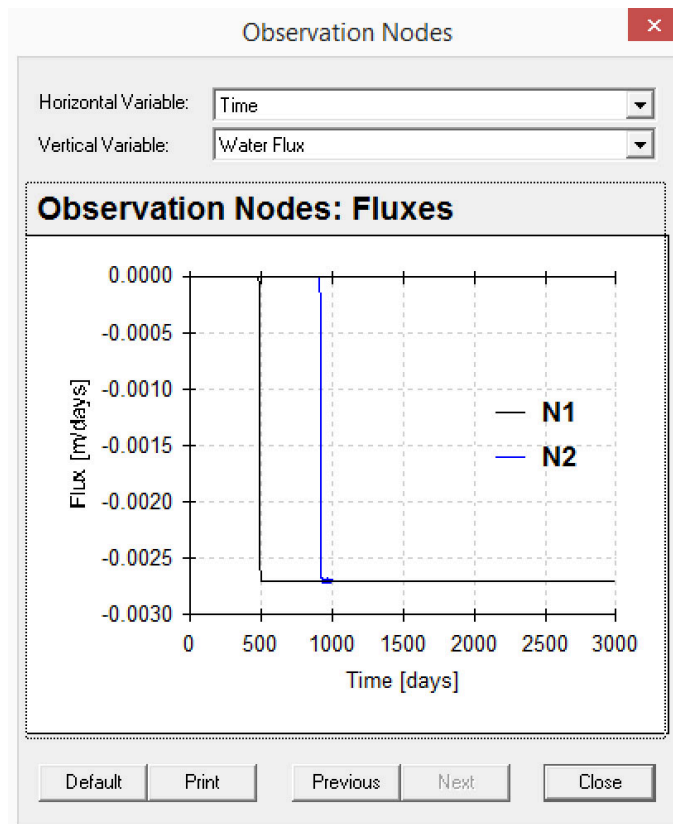
Radionuklid R	Razpolovni čas $t_{1/2}$	Razpolovna konstanta	Specifična aktivnost v vodni fazi C_v
	[leto]	[1/dan]	[Bq/m ³]
Cezij (¹³⁷ Cs)	30	5,84E-05	2,22E+11
Jod (¹²⁹ I)	1,57E+07	1,21E-10	3,53E+05

Za izračun prenosa topljenca smo v programu HYDRUS-1D uporabili naslednje nastavitve: Crank-Nicholsonovo časovno utežno shemo in prostorsko utežno shemo Galerkinovih končnih elementov.

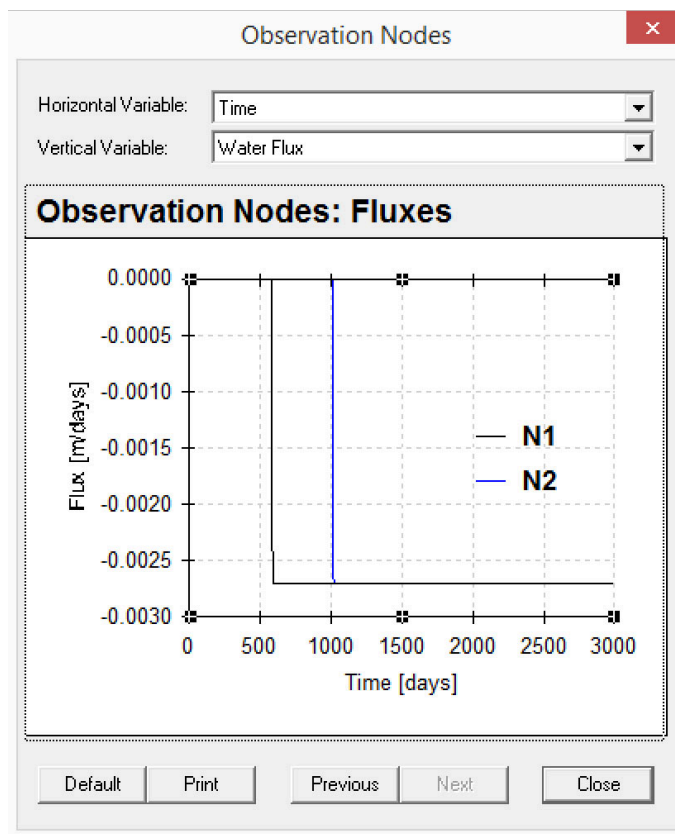
4.3 Rezultati

4.3.1 Pretok vode skozi model odlagališča

Ker imamo zelo poenostavljen model in visoke hidravlične prevodnosti materialov, se stacionarno stanje pojavi razmeroma hitro. Zaradi konstantnih padavin na vrhu in prostega iztoka na dnu, je povprečna hitrost pretoka skozi model kar enaka hitrosti padavin, 0,0027 m/dan. Rezultati pretoka v odvisnosti od časa so prikazani na sliki 23 za model odlagališča brez prekrova in sliki 24 za model odlagališča s prekvomom. Pretok je spremljan v opazovalni točki N1 na globini 15 m in N2 na globini 30 m.



Slika 23: Pretok vode skozi model odlagališča brez prekrova v opazovalnih točkah



Slika 24: Pretok vode skozi model odlagališča s prekrovom v opazovalnih točkah

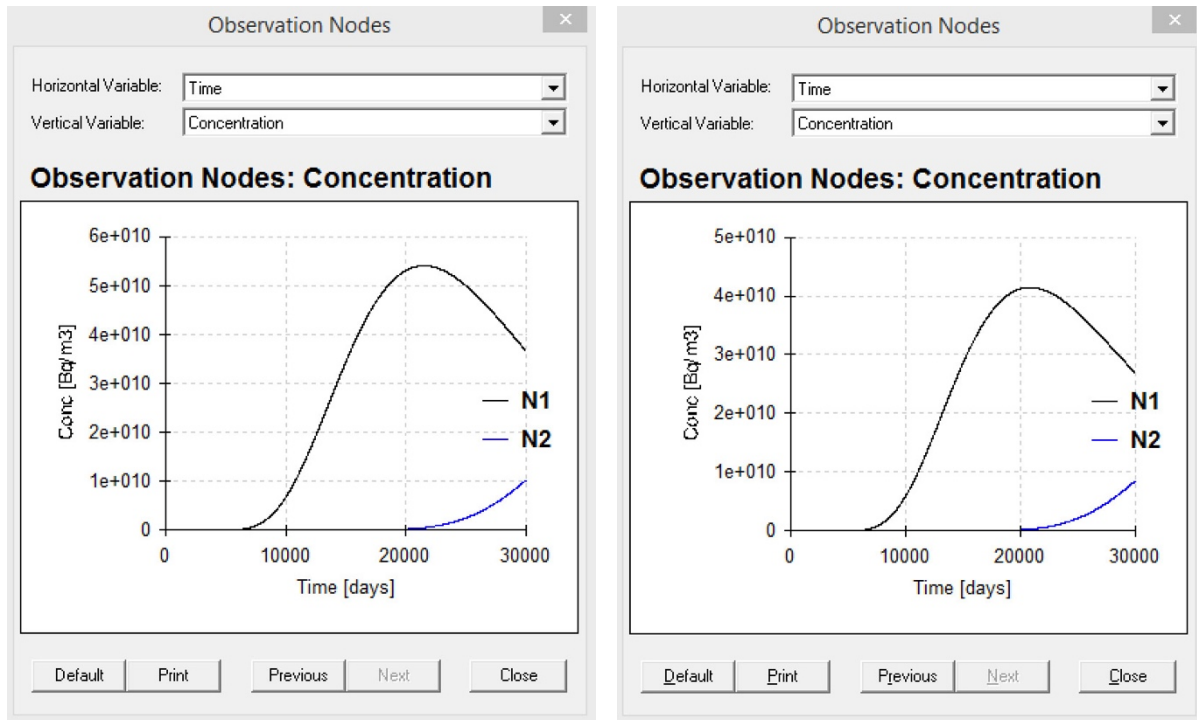
Na sliki 23 lahko vidimo, da se prvi zaznani pretok v točki N1 pojavi po 475 dneh, konstanten pretok 0,0027 pa se doseže 498. dan. V točki N2 se pretok pojavi po 904 dneh, ter konstanten pretok 26 dni kasneje.

Na sliki 24 je prikazan pretok vode skozi model odlagališča s prekrovom. Iz podatkov grafa lahko razberemo, da se sprememba pretoka v točki N1 pojavi 571. dan, ravnotežno stanje pa se vzpostavi 610. dan. V točki N2 pretok pojavi po 1002 dneh. Konstanten pretok pa od 1025 dneva naprej.

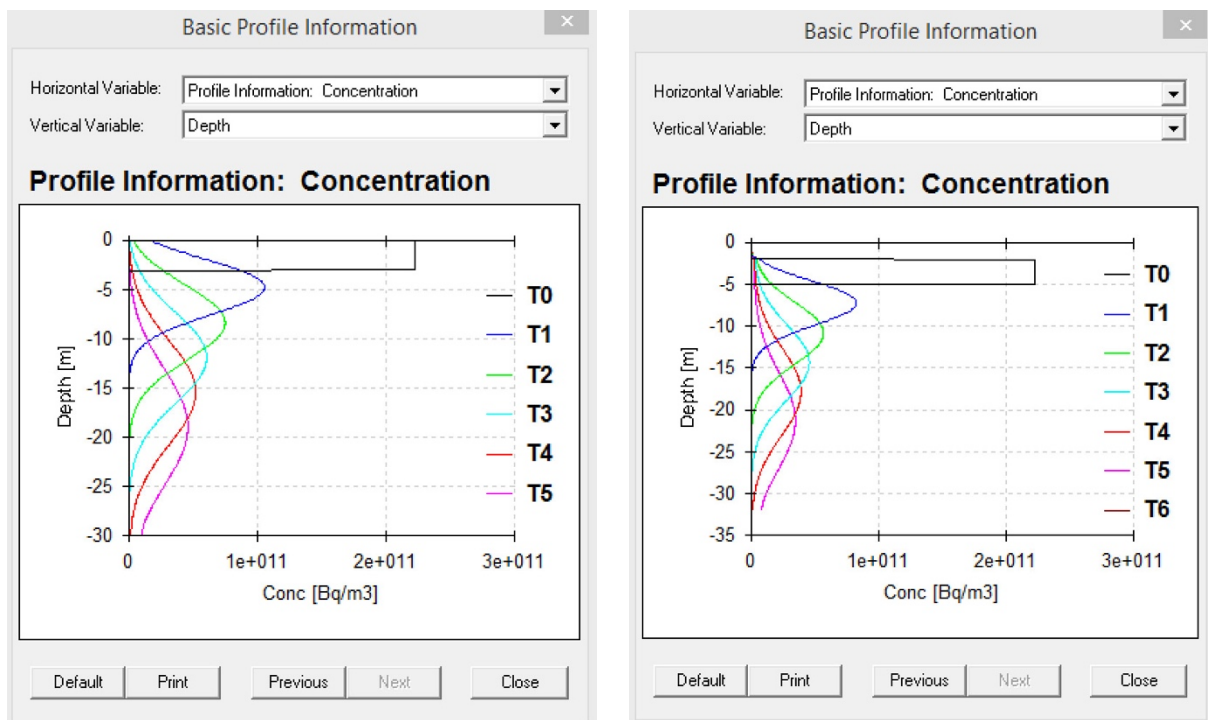
Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da prekriv pozitivno vpliva odlagališče, saj so se pretoki v odlagališču s prekrovom pojavili okoli 100 dni kasneje kot v odlagališču brez prekrova. Če bi v modelu pri sestavi prekrova uporabili manj prepusten material, recimo glino s hidravlično prevodnostjo 10^{-5} - 10^{-6} m/dan, bi bili rezultati še bolj izraziti. K zmanjšanju pretoka bi veliko pripomogel tudi drenažni sloj, saj bi omogočal horizontalno odvajanje vode in bi se količina vode, ki bi nadaljevala pot skozi odlagališče, bistveno zmanjšala.

4.3.2 Migracije radionuklidov skozi odlagališče

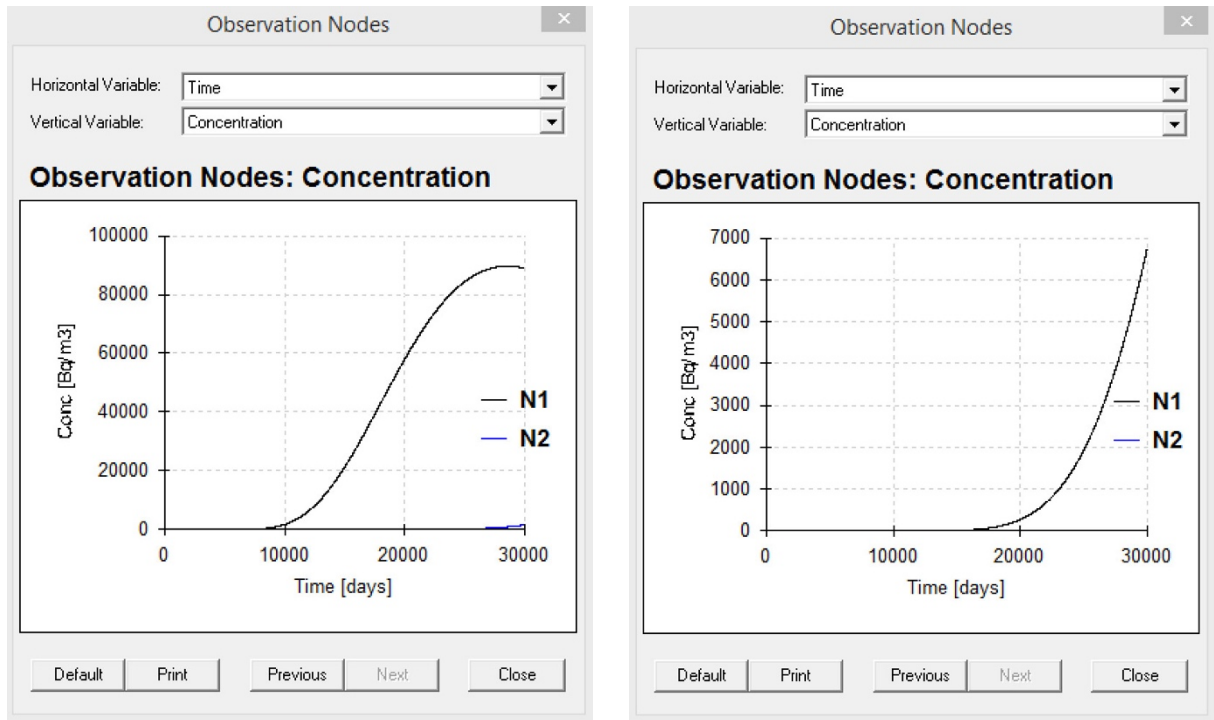
Za modeliranje prenosa radionuklidov skozi odlagališče smo uporabili radionuklida cezij ^{137}Cs in jod ^{129}I . V nadaljevanju so predstavljeni dobljeni rezultati, kjer so na slikah od 25 do 28 prikazane specifične aktivnosti uporabljenih radionuklidov.



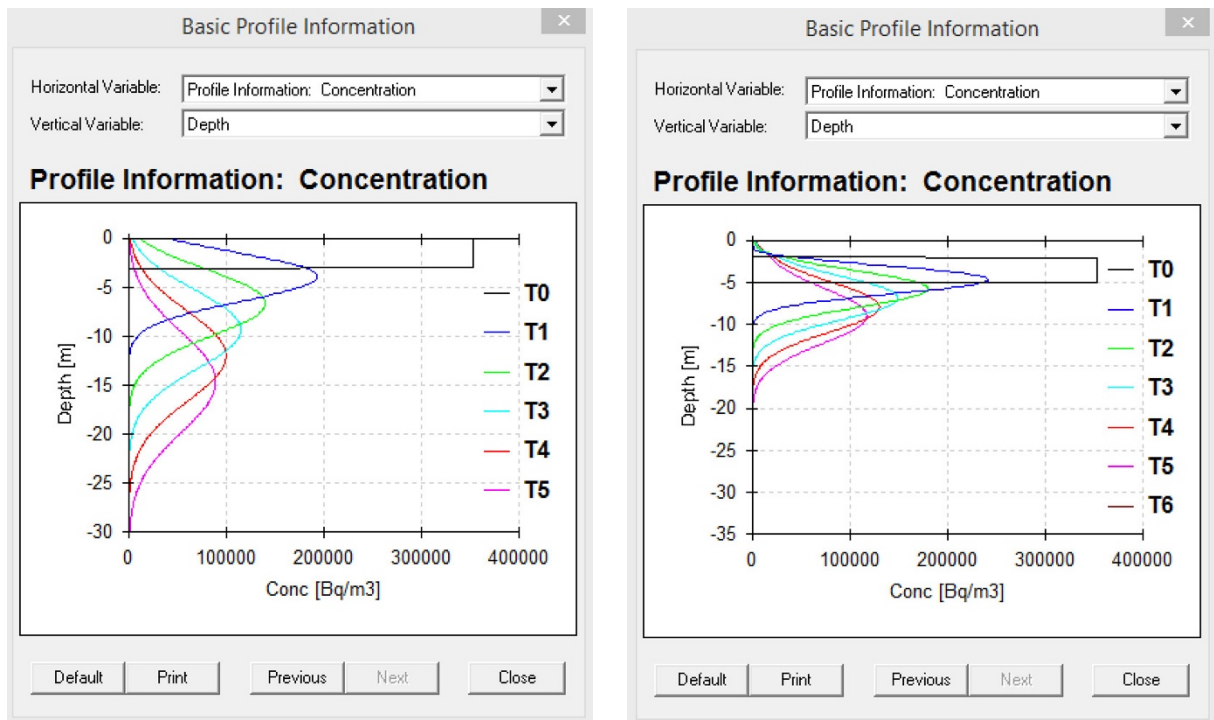
Slika 25: Specifične aktivnosti ^{137}Cs v opazovalnih točkah modela odlagališča brez prekrova in s prekvomom



Slika 26: Migracije radionuklidov ^{137}Cs skozi profil modela odlagališča brez prekrova in s prekvomom



Slika 27: Specifične aktivnosti ^{129}I v opazovalnih točkah modela odlagališča brez prekrova in s prekrovom



Slika 28: Migracije radionuklidov ^{129}I skozi profil modela odlagališča brez prekrova in s prekrovom

Na sliki 25 so prikazane specifične aktivnosti radionuklida cezij ^{137}Cs v opazovalnih točkah na globini 15 in 30 m. Na levi sliki je model odlagališča NSRAO brez prekrova, kjer je v točki N1 najvišja vrednost dosežena po 21360 dneh, $5,401\text{e}+010$ Bq/m³. V točki N2 je najvišja vrednost $1,026\text{e}+010$ Bq/m³

dosežena 30000. dan, ki predstavlja tudi končni dan simulacije in se še vzpenja. Prva zaznana vrednost v točki N1 se pojavi po 1269 dneh, v točki N2 pa po 5316 dneh. Na sliki desno je prikazan model odlagališča NSRAO s prekrovom. Najvišja vrednost v točki N1 se pojavi po 20691 dneh in sicer $4,144e+010 \text{ Bq/m}^3$, v točki N2 je po 30000 dneh vrednost $8,52e+09 \text{ Bq/m}^3$ in narašča. Prva zaznana vrednost v točki N1 se pojavi 1369 dan, v točki N2 pa 5408 dan. Na sliki 26 so prikazane specifične aktivnosti radionuklida ^{137}Cs skozi profil odlagališča. Na levi je model odlagališča brez prekrova, na desni pa model odlagališča s prekrovom. Iz grafov lahko razberemo, da so pri modelu odlagališča s prekrovom specifične aktivnosti radionuklida ^{137}Cs nekoliko nižje kot pri modelu brez prekrova.

Slika 27 prikazuje specifične aktivnosti jodovega radionuklida ^{129}I v opazovalnih točkah. V modelu brez prekrova je v točki N1 prva aktivnost zaznana po 2289 dneh, najvišja specifična aktivnost 89649 Bq/m^3 je dosežena po 28422 dneh. V opazovalni točki je prva vrednost zaznana po 9046 dneh, najvišja vrednost pa po 30000 dneh, 1570 Bq/m^3 . Na sliki desno, ki prikazuje model odlagališča s prekrovom, je v točki N1 najvišja vrednost 6753 Bq/m^3 dosežena po 30000 dneh, v točki N2 je zadnji dan simulacije zabeležena aktivnost $1,184e-05 \text{ Bq/m}^3$, ki je na grafu niti ne opazimo. V točki N1 je prva vrednost zaznana po 5278 dneh, v točki N2 pa 22191. dan. Tudi iz grafov na sliki 28 lahko razberemo, da pri modelu odlagališča s prekrovom transport radionuklida ^{129}I poteka počasneje kot pri modelu odlagališča brez prekrova.

Prehajanje radionuklidov je časovno odvisno od zakasnitve. Zakasnitev definiramo s porazdelitvenim koeficientom K_d , ki je obratno sorazmeren s specifično aktivnostjo radionuklida v vodni fazi. Torej, čim večji je faktor K_d , tem več radionuklida je vezanega na okoliški material. S tem pride do zaostajanja radionuklidov in se bodo za pregrado pojavili kasneje. Pri našem modelu imamo v delu, kjer so odpadki, odloženi material, ki ima relativno nizek porazdelitveni faktor, zato pride do hitrejšega širjenja radionuklidov. Za boljše rezultate bi morali izbrati material z višjim faktorjem K_d (npr. beton, betonit). Razpolovna doba je odvisna le od časa. Glavna naloga odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov bi bila, da bi se radionuklid v odlagališču zadržal za čas 7 razpolovnih dob. V tem času bi radionuklid skoraj popolnoma razpadel, število ostalih jeder bi bilo manjše od 1 %. Tak radionuklid za okolico ne bi predstavljal večjega tveganja. Ker pa so razpolovne dobe nekaterih radionuklidov izredno velike (npr. U-238, razpolovna doba $4,47 \cdot 10^9$ let), je načrtovanje in izdelava takega odlagališča težko izvedljiva, saj je projektirana življenska doba tovrstnih odlagališč na splošno od 300 do 500 let. Zato se v takšnih primerih predvideva odlaganje radioaktivnih odpadkov v podzemnih vrstah odlagališč.

5 ZAKLJUČEK

Predpostavko o vplivu prekrova na transport radionuklidov iz odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov smo na podlagi matematičnih modelov potrdili. S pomočjo programskega paketa HYDRUS-1D smo izdelali dva modela odlagališča radioaktivnih odpadkov.

Prvi model predstavlja odlagališče brez prekrova, kjer so radioaktivni odpadki odloženi tik pod površjem. V drugem modelu pa smo nad odpadke postavili prekriv, ki varuje odpadke pred zunanjimi vplivi in vdorom vode. Model transporta smo naredili v dveh korakih. V prvem delu smo nad odlagališči dodali konstantne padavine, ter opazovali samo pretok vode. V drugem delu smo modeloma dodali še specifične aktivnosti radionuklida cezij (^{137}Cs) ter jod (^{129}I). Rezultate smo opazovali v dveh opazovalnih točkah.

Iz dobljenih rezultatov lahko potrdimo, da je prekriv koristen za odlagališče radioaktivnih odpadkov, saj se je v obeh primerih izkazalo, da so se pretoki pojavili kasneje, specifične aktivnosti radionuklidov pa so bile v modelu odlagališča s prekrivom nižje.

Ker smo naš model zelo poenostavili in idealizirali, ne daje realnih rezultatov. Za resnejšo uporabo dobljenih rezultatov bi morali model dodelati, ter približati realni situaciji, vendar bi bilo to preobsežno za našo nalogo. Prav tako bi morali izvesti simulacije za celoten inventar odlagališča.

Modeliranje transporta radionuklidov je izredno pomembno pri varnostni analizi umestitve odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov v prostor, saj lahko na takšen način predpostavimo, kakšen vpliv bo imelo odlagališče na okolje in ljudi.

VIRI

Vrankar, L. 2004. Modeliranje migracije radionuklidov skozi porozne snovi z brez mrežno metodo. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovno-tehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo (samozaložba L. Vrankar): 68 f.

Rožman, R. 2009. Temeljna znanja iz jedrske tehnike, Neviodvnm Krško: 144 str.

Rožman, R. 2010. Reaktorska sredica, Neviodvnm Krško: 150 str.

Kumperščak, E. 2008. Primerjava vplivov odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov na podzemno vodo glede na izbiro materiala polnila z uporabo numeričnega modela. Diplomsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanost o okolju (samozaložba E. Kumperščak): 48 f.

Ogrizek Woermann, R. 2012. Problematika in pregled naravno prisotnih radionuklidov ter njihova pojavnost v komunalnih dejavnostih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Smer vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba R. Ogrizek Woermann): 93 f.

Resolucija o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom za obdobje 2006-2015. Uradni list RS št. 15/2006.

Resolucija o nacionalnem programu ravnanja z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim jedrskim gorivom za obdobje 2016–2025 (ReNPROG). Uradni list RS št. 31/2016.

Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti. Uradni list RS št. 102/04 – uradno prečiščeno besedilo, 70/08 – ZVO-1B, 60/11 in 74/05.

Pravilnik o ravnanju z radioaktivnimi odpadki in izrabljenim gorivom (JV7). Uradni list RS št. 49/2006.

Agencija ARAO. 2005. Strokovne podlage nacionalnega programa ravnanja z RAO in IJG, T-1135/05, revizija 2, Ljubljana: 83 str.

Šarler B., Perko J., Vrankar L. 1999. Računalniško modeliranje za oceno prenosa radionuklidov v naravnih in tehnoloških sistemih: Faza 1, Revizija 0, Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za dinamiko fluidov in termodinamiko: 31 str.

Turk G., Bokan Bosiljkov V., Runovc F. 2009. Analiza obstojnosti in puščanja umetnih pregrad ter identifikacija ključnih parametrov migracije radionuklidov v poroznih snoveh in njihov vpliv na varnost odlagališč radioaktivnih odpadkov. Pogodba 2513-07-397033. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: Naravoslovno-tehniška fakulteta: 155 str.

URSJV. 2015. Razširjeno poročilo o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti v Republiki Sloveniji leta 2014, DP-184/2015, Ljubljana: 378 str.

Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015. Low and intermediate level waste in SFR, ISSN 1402-3091, SKB R-15-15: 269 str.

Posiva. 2016. www.posiva.fi (Pridobljeno 11.04.2016.)

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2016. www.iaea.org (Pridobljeno 14.04.2016.)

Andra. 2016. www.andra.fr (Pridobljeno 14.04.2016.)

Viršek, S. 2003. Simulacija prenosa atrazina med zemeljskim površjem in nasičeno cono vodonosnika: Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehnična fakulteta (samozaložba S. Viršek): 144 f.

PC Progress. 2016. www.pc-progress.com (Pridobljeno 06.06.2016.)

Šimunek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M. Th. 2013. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA: pp. 342.

Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. 2002. PA/PS calculations on influence of SLOVENIAN LILW repository on environment (final report), Geological Survey of Slovenia, Polytechnics, Nova Gorica: 133 str.

Koželj, M., Erman, R., Istenič, R., Černilogar Radeč, M., 2006. Delo z viri sevanj, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost, Ljubljana: 96 str.