



INFO-GEOTHERMAL

Podpiranje učinkovite kaskadne uporabe geotermalne energije z dostopom do uradnih in javnih informacij /

Supporting efficient cascade use of geothermal energy by unlocking official and public information

**Delovni sklop T3 Priprava smernic za razvoj projekta
Aktivnost AT. 3.1 Smernice in ciljno usmerjeno usposabljanje strokovnjakov**

Dosežek: D.T 3.1.2 Smernice za zmanjšanje geološkega in tehnološkega tveganja reinjekcijskih vrtin v razpokanih in medzrnskih vodonosnikih

**Work Package T3 Preparing guidelines on project development
Activity AT 3.1 Guidelines and targeted trainings of experts**

Deliverable: D.T 3.1.2 Guidelines for project technical design and determination of parameters of geothermal wells and doublets

**april 2024
Verzija 1.0**

Projekt INFO-GEOTHERMAL sofinancirajo Islandija, Lihtenštajn in Norveška s sredstvi Finančnega mehanizma EGP v višini 1.073.529,41 €. Namen projekta je podpiranje učinkovite kaskadne uporabe geotermalne energije z dostopom do uradnih in javnih informacij.



Vodilni partner / Lead partner: GeoZS

Avtorji / Authors: dr. Nina Rman¹, mag. Andrej Lapanje¹, Matej Prkič²

Pri pripravi gradiva so sodelovali / Materials were prepared with the help of:

¹ Geološki zavod Slovenije / Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana, Slovenia (GeoZS)

² GeoGreen d.o.o., Ledavska ulica 26, 9000 Murska Sobota, Slovenia

Ta dokument je nastal s finančno podporo Finančnega mehanizma EGP. Za vsebino tega dokumenta so odgovorni izključno avtorji, navedi zgoraj, in zanj v nobenem primeru ne velja, da odraža stališča Nosilca programa Blaženje podnebnih sprememb in prilagajanje nanje.



Kazalo

1	Uvod.....	1
2	Definicija reinjekcije	1
3	Tehnična merila za ustrezno izvedbo reinjekcijskih vrtin	3
3.1	<i>Izgradnja nove reinjekcijske vrtine</i>	3
3.1.1	Lociranje in globina vrtine	3
3.1.2	Vrtanje in cevitev vrtine	4
3.1.2.1	Razpoklinski geotermalni vodonosniki.....	6
3.1.2.2	Medzrnski geotermalni vodonosniki.....	7
3.2	<i>Preureditev obstoječe vrtine v reinjekcijsko vrtino</i>	8
3.3	<i>Čiščenje oziroma aktivacija vrtine</i>	9
3.4	<i>Pregled tehničnega stanja vrtine</i>	9
3.5	<i>Hidrogeološka testiranja</i>	9
3.5.1	Izhodiščni črpalni preizkus.....	10
3.5.2	Izhodiščni vtiskovalni preizkusi.....	10
3.5.3	Interferenčni preizkusi.....	10
3.5.4	Dolgotrajnejši preizkusi	11
3.5.5	Sledilni preizkusi	11
3.6	<i>Geotermične meritve.....</i>	12
3.7	<i>Simulacija delovanja dubleta skozi celotno življenjsko dobo</i>	12
3.8	<i>Kemijska in izotopska sestava podzemne vode.....</i>	12
3.9	<i>Monitoring reinjekcijskih vrtin.....</i>	13
3.10	<i>Zagotavljanje čiste vode za vtiskovanje</i>	14
3.11	<i>Vzdrževalni posegi tekom obratovanja</i>	14
3.12	<i>Ravnanje v primeru dotoka hladnejše vode v proizvodno vrtino</i>	15
4	Priznavanje reinjekcijskih vrtin v drugih državah	15
4.1	<i>Vodna direktiva</i>	15
4.2	<i>Slovenija</i>	15
4.2.1	Zakon o vodah	15
4.2.2	Zakon o rudarstvu.....	16
4.2.3	Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo	16
4.2.4	Obstoječe reinjekcijske vrtine v Sloveniji	16
4.3	<i>Avstrija</i>	18
4.4	<i>Bosna in Hercegovina, Hrvaška, Romunija in Srbija.....</i>	18
4.5	<i>Češka</i>	18
4.6	<i>Islandija</i>	18
4.7	<i>Italija</i>	19



4.8	Kanada	20
4.9	Madžarska	20
4.10	Nemčija	21
4.11	Nizozemska	21
4.12	Poljska	22
4.13	Slovaška	22
4.14	Švica	22
4.15	Združene države Amerike	23
5	Predlog meril za priznavanje reinjekcijske vrtine v Sloveniji	23
5.1	Pobuda za priznavanje reinjekcijske vrtine	23
5.2	Merila za priznavanje reinjekcijske vrtine	24
5.2.1	Namen izvajanja reinjekcije	24
5.2.2	Varnost vrtine in delovanja sistema	24
5.2.3	Tehnična izvedba vrtine	25
5.2.4	Hidravlične lastnosti objekta	25
5.2.5	Možnost iztoka reinjecirane vode na površje	25
5.2.6	Vzdrževanje kvalitete vode v vodonosniku	25
5.2.7	Način delovanja dubleta	26
5.2.8	Največja trenutna količina vtiskanja	26
5.2.9	Letna količina vtiskanja	26
5.2.10	Kriteriji za uspešnost reinjekcije	26
6	Viri	28

Kazalo slik

Slika 1: Oblika hidravličnega in temperaturnega vplivnega oblaka v smeri toka podzemne vode (t.i. flow direction; povzeto iz Szanyi in sod. 2015)	4
Slika 2: Orientacija filtrov za reinjekcijske (levo) in proizvodne (desno) vrtine je drugačna	6
Slika 3: Skica tehnične zasnove vrtine v razpoklinskih vodonosnikih	7
Slika 4: Skica tehnične zasnove vrtine v medzrnskih vodonosnikih z obveznim filtrskim zasipom	8
Slika 5: Primer odziva opazovalne (neaktivne) vrtine na črpanje izbrane vrtine (Szanyi in sod. 2015).	11

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Pregled obstoječih reinjekcijskih vrtin v Sloveniji, testiranih do leta 2024	17
Preglednica 2: Pregled kriterijev za oceno ustreznosti reinjekcijske vrtine	27

1 Uvod

V Sloveniji je že bilo zgrajenih nekaj geotermalnih vrtin za namen reinjekcije, vendar trenutno deluje le ena globoka vrtina, v geotermalnem dubletu v Lendavi. Delujočega demonstracijskega projekta reinjekcijskega sistema, ki bi z javnim dostopom do podatkov o obratovanju in ekonomiki dokazoval sposobnosti geotermalnih vodonosnikov v Sloveniji še ni. Zato je za ponazoritev izvedljivosti ključno, da se postopki izvajanja in dokazovanja sposobnosti vtiskanja takšnih vrtin in sistemov vodijo sistematično in pregledno. S tem se olajša pristop k izvedbi raziskav in testiranj v bodoče ter hkrati poveča možnosti za izdelavo uspešnih reinjekcijskih vrtin in posredno zmanjša vrednost investicij ter tveganj za vse sledilce tega razvoja.

Vsebinska je pomembna za več sektorjev. Sektor za obnovljive vire in učinkovito rabo energije, ki ga pokriva Direktorat za Energijo Ministrstva za okolje, podnebje in energijo (MOPE), bo lahko spodbudil razvoj novih dubletov za povečanje rabe geotermalne energije in izpolnjevanje zavez iz Nacionalnega energetskega in podnebnege načrta (NEPN). Direktorat za vode (Ministrstvo za naravne vire in prostor (MNVP)) pa bo lahko realiziral ukrepe za izboljšanje stanja podzemnih voda, da se bo zmanjšala praksa nepotrebnega neposrednega odvzema termalne vode za pridobivanje toplote. Vodna direktiva *a priori* ne zahteva reinjekcije, vendar zahteva, da se ohrani dobro količinsko in kakovostno stanje vodonosnikov, pri čemer vsaka država sama določi s kakšnimi ukrepi lahko to zagotovi. Direktiva o varstvu podzemnih voda pred onesnaževanjem omogoča reinjekcijo v isti vodonosnik, dodatno umetno napajanje pa je dovoljeno le s posebnimi raziskavami in dovoljenji.

V okviru programa ukrepov upravljanja voda (MOP, 2016) v NUV II je bil zaradi nepovratnega odvzema termalne vode in medsebojnih vplivov posameznih odzemov, ki lahko tudi poslabšujejo hidrogeološke razmere, kar se opazi kot zniževanje gladine podzemne vode, vpeljan temeljni ukrep »b« R6b2 – Vpeljava spodbud za geotermalne pare vrtin in drugi ukrepi za ustavljanje negativnih trendov v termalnih vodonosnikih. Za obstoječe rabe vode na najbolj izpostavljenih vodonosnikih, Murski termalni vodi v SV Sloveniji in v Krško–Brežiški termalni vodi na JV Slovenije, so predvidene spodbude v primeru vračanja vode z reinjekcijo.

Obveznost reinjeciranja je predvidena tudi za nove vodne pravice in povečanje obsega rabe obstoječih vodnih pravic. Takšne spodbude so od leta 2020 predvidene tudi v 47. členu Zakona o interventnih ukrepih za omilitev in odpravo posledic epidemije covid-19 (Uradni list RS, št. 80/20) kot ukrepi s področja izkoriščanja geotermalne energije v rastlinjaki. V Podnebnem skladu za leta 2023-2026 je MKGP predvidel ukrep za izgradnjo zaprtega reinjekcijskega sistema vrtin. Reinjekcija kot pomembna zadeva upravljanja je prepoznana tudi v zadnjem Načrtu upravljanja z vodami za obdobje od 2022 do 2027.

Pregled izkušenj z reinjekcijo po svetu je bil izdelan že v letu 2015 (Rman in sod., 2015). V 2019 je GeoZS pripravil smernice za ravnanje z objekti za rabo mineralne, termalne in termomineralne vode po prenehanju rabe (Lapanje in sod., 2019), v letu 2021 pa smernice za reinjekcijo (Rman in Lapanje, 2021), ki jih v tem dokumentu posodabljam. Osredotočamo se na bistvene poudarke, ki so pomembni za uspešno izdelavo in testiranje reinjekcijskih vrtin v Sloveniji. Smernice vsebujejo pregled ureditve priznavanja reinjekcijskih vrtin v sosednjih oziroma z nami primerljivih državah, tehnična merila za ustrezno izvedbo reinjekcijskih vrtin v tipičnih razpoklinskih in medzrnskih geotermalnih vodonosnikih v Sloveniji, vrste hidrogeoloških testiranj, ki so potrebna za dokazovanje ustreznosti reinjekcijske vrtine, ter merila/rezultate teh testiranj, na podlagi katerih bo moč razvrstiti vrtine med ustrezne ali neustrezne. Prepoznana ustreznost bo osnova za MNVP, da bo lahko kasneje začel postopek spremembe koncesijske uredbe v kolikor ne bo sistem že od začetka opredeljen kot geotermični energetski vir.

2 Definicija reinjekcije

Reinjekcija je zahteven in kompleksen postopek rabe geotermalne energije, ko v vodonosniku nadomeščamo odvzeto količino termalne vode, v primeru da služi le kot prenosnik toplote na površje. Reinjekcija je ključna strategija za trajnostno in okolju prijazno rabo geotermalne energije. Ker je več kot 80% geotermalne toplote shranjene v kamnini (in ne v sami vodi), je lahko tudi ključen faktor pri zagotavljanju dolgoročne in ekonomsko vzdržne oskrbe s tem virom Zemljine energije. To je še posebej pomembno, ko se isti vodonosnik uporablja z več vrtinami, na več lokacijah ali celo v več državah z različnimi načini upravljanja.

V kolikor nepovratno pridobivamo termalno vodo, govorimo o rabi vode, če pa je cilj rabe pridobivanje geotermalne energije, je smiselno preiti na zaprt sistem rabe in rabo geotermalnih dubletov. To pomeni, da toplotno izrabljeno termalno vodo ponikamo / vtiskamo / reinjeciramo nazaj v hidravlično isti vodonosnik in s tem spreminjamo le toplotno stanje sistema, ne pa njegove vodne bilance. Takšna voda, kateri se odvzame le toplota, za razliko od



direktne rabe termalne vode v bazenih ostane neonesnažena, kemijska sestava pa se ji lahko delno spremeni zaradi nižjih tlakov in temperatur v sistemu rabe na površju in s tem povezanih fizikalno-kemijskih procesov.

Nameni reinjekcije so lahko različni in v praksi se običajno izvaja zaradi kombinacije različnih vzrokov:

- Zakonodaja predpisuje, da se odvzem geotermalne toplote lahko vrši le v zaprtih sistemih (v Sloveniji je to geotermični energetski vir po Zakonu o rudarstvu).
- Preprečuje kemično in toplotno onesnaženje okolja, do katerega bi prišlo s spuščanjem odpadne termalne vode v, običajno, površinske vodotoke.
- Omogoča bogatenje geotermalnih vodonosnikov in ohranjanje dobre lokalne in regionalne vodne bilance. S tem vzdržuje tlak v vodonosniku in preprečuje zniževanje gladine podzemne vode.
- Podaljša in izboljša energetski odvzem toplote s povratkom tekočine v proizvodno vrtino, s čimer se izboljša tudi ekonomski učinek projektov.
- Omogoča obnovitev ali vzdrževanje ranljivih sistemov z naravnimi pojavi, kot so npr. termalni izviri.
- Omogoča sočasno in daljšo rabo več uporabnikom v primeru poseganja v isti vodonosnik.
- Preprečuje povečanje emisij toplogrednih plinov, do katerega bi prišlo ob prehodu na druge energente.
- Zmanjšuje tveganja za posedanje tal zaradi izčrpanja podzemne vode (v Sloveniji še ni ugotovljenih primerov).
- Podaljša življenjsko dobo obratovalnega sistema za rabo geotermalne energije, v kolikor je ustrezno načrtovana in opazovana.

Njene običajno prepoznane slabosti so lahko:

- Draži investicijo zaradi izgradnje vsaj dveh geotermalnih vrtin namesto le proizvodne vrtine ter »parazitske« porabe elektrike v sistemu cevovodov in filtracije vode.
- Večja geološka tveganja za uspeh reinjekcijske vrtine kot v primeru rabe le proizvodnih vrtin.
- Možnost kemičnega in toplotnega preboja v vodonosniku ter s tem ohlajanje proizvodne vrtine.
- Zahtevno načrtovanje projekta za uspešno več-desetletno delovanje sistema.

Pri načrtovanju takšnih sistemov rabe je običajna življenjska doba vsaj 25-30 let. Zaprt sistem rabe običajno sestavljajo (poimenujemo le ključne dele):

- Proizvodna vrtina, ki posega v vodonosne plasti in omogoča pridobivanje podzemne vode bodisi arteško bodisi s črpalko.
- Izoliran cevovod do mesta rabe, po potrebi s tehnologijo za obdelavo vode (npr. razplinjanje...) in zalogovniki za skladiščenje vode/toplote.
- Toplotna postaja in izmenjevalci ali črpalke za odvzem toplote in rabo geotermalne energije.
- Neizoliran ali izoliran cevovod za odvodnjo odpadne termalne vode.
- Zalogovniki za umirjanje (usedanje suspendiranih snovi) in skladiščenje odpadne termalne vode, da je vtok v reinjekcijsko vrtino čim bolj stalen in enakomeren.
- Sistem za pripravo vode pred vtiskovanjem (večstopenjsko filtriranje in čiščenje vode).
- Reinjekcijska ali ponikalna ali vtiskovalna vrtina, skozi katero se toplotno izrabljena termalna voda po uporabi vrne v vodonosnik. V kolikor voda teče gravitacijsko, to običajno imenujemo ponikanje, v kolikor jo je potrebno v sloj potiskati s črpalkami, temu rečemo vtiskovanje. V smernicah večinoma uporabljamo izraz vtiskovanje ali reinjekcija.

Par proizvodno-reinjekcijske vrtine imenujemo tudi geotermalni dublet. Vrtini se običajno razlikujeta po tehničnih zasnovi in tehnologiji filtrov, zasnova celotnega sistema pa je pogojena s hidrogeološkimi lastnostmi vodonosnika, količino in temperaturo uporabljene termalne vode ter njeno sestavo in vsebnostjo plinov. Zato načrtovanje takšnega sistema nikoli ni rutinski postopek. Z več informacijami kot razpolagajo projektanti, bolje bo sistem dimenzioniran in prilagojen lokalnim posebnostim.

Načrtovanje delovanja reinjekcijske vrtine je bolj zahtevno kot za proizvodne vrtine. Zahteva bolj kvalitetno izvedbo vrtine, težje je testirati polno kapaciteto vrtine, saj je potrebno najprej zgraditi cevovod med vrtinami, hkrati pa je bolj podvržena spremembam med samim delovanjem sistema. V kolikor je optimalna količina vtiskanja ene vrtine nižja od potreb, se razlika količin lahko uravnava z uporabo zalogovnikov ali več reinjekcijskimi vrtinami (običajno potrebni predvsem v primeru medzrnske poroznosti vodonosnika).

Medtem ko so v primeru razpoklinskih vodonosnikov pogostejše težave v vodonosniku (prehiter vtok hladne vtiskane vode v proizvodne vrtine), so v primeru medzrnskih vodonosnikov težave običajno vezane na bližnjo okolico vrtine (zamašitev por in nabrekanje delcev), ki povzroči znižanje vtiskovalnih sposobnosti.

3 Tehnična merila za ustrezno izvedbo reinjekcijskih vrtin

3.1 Izgradnja nove reinjekcijske vrtine

3.1.1 Lociranje in globina vrtine

Ustrezno lociranje vrtin je pomembno za zagotovitev dolgotrajnega obratovanja proizvodno-reinjekcijskega para vrtin. Nujno je dobro poznavanje vrste in geometrije vodonosnika v smislu razprostranjenosti, heterogenosti in naklona vodonosnih plasti ali razpok, zato si za določanje ustrezne lokacije lahko pomagamo s:

- seizmičnimi meritvami,
- karotažnimi meritvami,
- petrofizikalnimi in drugimi geološkimi podatki iz okoliških vrtin,
- strukturnimi značilnostmi površja,
- poznavanjem smeri toka podzemnih voda,
- radijem vpliva proizvodnih vrtin.

Po veljavni zakonodaji (Zakon o vodah) je potrebno vračati vodo v isti vodonosnik, iz katerega se pridobiva. Zato je potrebno, da sta vrtini hidravlično povezani.

Cilj optimalno locirane reinjekcijske vrtine je zagotoviti:

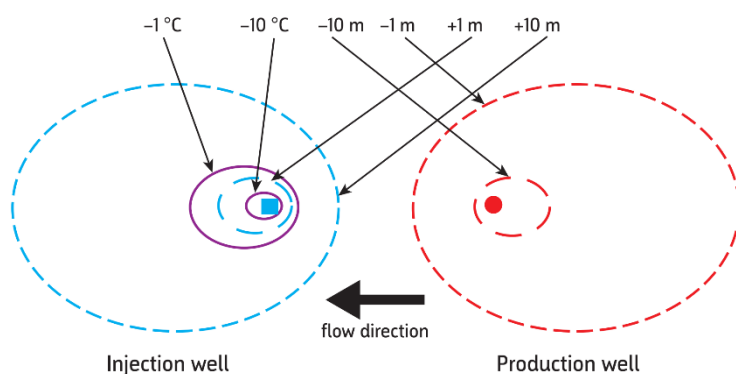
- okoljsko sprejemljivo rešitev za toplotno izrabljeno termalno vodo,
- največjo možno podporo tlaku v proizvodni vrtini,
- najmanjše tveganje za toplotni preboj v proizvodni vrtini,
- največjo možno količino ponikanja / vtiskanja ob najmanjši možni porabi energije za delovanje sistema,
- najkrajšo (najcenejšo) površinsko povezavo med vrtinama.

Lokacija reinjekcijske vrtine je najpogostejše dolvodno od proizvodnih vrtin glede na smer toka podzemne vode. S tem se zniža tveganje za prehiter dotok hladne vode nazaj v proizvodno vrtino, vendar je največkrat zaželeno, da so hidravlično povezane, saj le tako zagotavlja ustrezno podporo tlaka.

Vrtino se lahko locira na strukturno višjem mestu, da se hladna voda pri tonjenju proti proizvodni vrtini dovolj časa ogreva in tako manj verjetno povzroči podhlajevanje sistema in proizvodne vrtine.

Smiselno je upoštevati tudi relief, da je cevovod čim bolj gravitacijski in voda za tok do reinjekcijske vrtine ne potrebuje dodatnih črpalk. Običajno se ne vtiskuje v prelomne cone, saj bi to lahko povzročilo mikrosezmične dogodke.

Preprostega pravila, kakšna naj bo oddaljenost med proizvodnimi in reinjekcijskimi vrtinami oziroma njihovimi odprtimi / filtrskimi conami ni. Razdalja med vrtinama je odvisna od namena reinjekcije, temperature in količine vtiskane vode, razporeditve vseh in v bodoče načrtovanih geotermalnih vrtin v prostoru ter hidrogeoloških lastnosti vodonosnika. Smiselno jo je določiti z analitičnimi izračuni in matematičnimi simulacijami toka podzemne vode in prenosa snovi ter toplote (2D ali 3D).



Slika 1: Oblika hidravličnega in temperaturnega vplivnega oblaka v smeri toka podzemne vode (t.i. flow direction; povzeto iz Szanyi in sod. 2015).

Filtrske cone med vrtnami so običajno oddaljene nekaj sto metrov, npr. v medzrnskih peščenih vodonosnikih v Panonskem bazenu od najmanj 300 do 700 m, največ do približno 2 km. V primeru globokih (kraško-)razpoklinskih vodonosnikov npr. v Molasnem bazenu v Nemčiji, je običajno najmanjša razdalja med filtri vsaj 1 km.

V primeru vertikalnih vrtn so tako oddaljena tudi ustja vrtn. Sodobna konfiguracija geotermalnega dubleta pa je zaradi varčevanja s prostorom na površju pogosto drugačna. Proizvodna in reinjekcijska vrtna sta izvrtani z iste lokacije, razdalja med ustji je vsaj 5-10 m, nato pa sta izvrtani usmerjeno, vsaka v svojo smer, da se doseže največja želena razdalja odprtih con v vodonosniku med njima.

Glede na izkušnje v svetu je priporočeno, da so razdalje med dubleti sosednjih uporabnikov vsaj 2 km.

Filtrska oziroma odprta cona, ki omogoča dotok in vtiskanje vode, naj bolj čim daljša, po možnosti več sto metrov. To se lahko doseže tudi z odklonjenimi vrtnami.

3.1.2 Vrtanje in cevitev vrtnice

Pri vrtanju vrtnice je pomembno ohranjanje intaktnosti vodonosnika, da se zagotovi vzpostavitev maksimalne vtiskovalne sposobnosti vrtnice.

Zelo je pomembna izbira ustreznega delovnega medija – izplake. Izplaka služi stabilizaciji kanala vrtnice tekom vrtanja in varnosti pred nekontroliranim iztokom fluidov iz/v vodonosnik ter ohranja intaktnost vodonosnika s formiranjem tankega zaščitnega sloja med odprtim kanalom vrtnice in vodonosnikom. V delu vrtnice, ki bo cevljena z tehnično zaščitno cevjo, se lahko vrta z izplako na betonitni osnovi. V delu vrtnice, ki bo prevrtala vodonosnik, pa naj se uporabljajo predvsem polimerne in kalcijeve izplake z dodatkom sadre, katerih lastnosti se ne spreminjajo z visoko temperaturo. V primeru razpoklinskih vodonosnikov, v katerih ne prihaja do rušenja kanala vrtnice, je možno vrtanje brez izplake, pri medzrnskih vodonosnikih pa to ni mogoče zaradi možnosti zarušitve in izgube vrtnice ter opreme.

Tehnologija vrtanja je odvisna od kamnine: za razpokane karbonatne kamnine je boljše metoda indirektnega vrtanja, za slabo sprijete peske in peščenjake pa direktno vrtanje.

Sestava orodja za vrtanje in optimalna hitrost vrtanja omogočata, da ne pride do prevelikega odklona vrtnice od želene smeri vrtanja, kar je potrebno nadzorovati s spremljanjem odklona vrtnice tekom celotnega vrtanja vsakih 15 – 25 m, v primeru odklonjene vrtnice pa na vsako dodatno izvrtano vrtalno cevjo (vsakih 6 m).

Tip vrtalnega dleta je odvisen od trdote, abrazivnosti formacije in tehnologije vrtanja. Z namenom najbolj optimalnega drobljenja vrtnice kamnine je zelo pomemben hidravlični učinek površinske tlačne izplačne črpalke, ki preko ustrezno izbranih šob na dletu prispeva k napredku vrtanja in čiščenju vrtnice s pomočjo cirkulacije pri direktnem vrtanju. Za doseganje navedenega je poleg črpalke in dleta pomembno ostalo orodje v vrtni (stabilizatorji, težko drogove, vrtalno drogove) ustreznega premera za doseganje primernih hitrosti pretoka ob dletu in orodju za iznos navrtanega materiala.



Pri cevitvi je pomembna izbira ustreznega premera cevitve glede na vrtani premer vrtine. Premer vrtanja mora omogočati ceitev, cementacijo in izdelavo zasipa, zato mora biti premer vrtanja vsaj 102 mm (4") večji od premera cevitve.

Upoštevati je potrebno, da se pri reinjekcijski vrtini dovaja dodatni tlak na ustju vrtine, s čimer se zagotavlja vtiskanje vode, zato mora biti sama vrtina in vsa oprema ustja prilagojena na takšne pogoje večjih tlakov. Ustje mora imeti dovolj mest za namestitve vse potrebne opazovalne (monitoring) opreme, s katero se spremlja učinkovitost reinjekcije.

Vse bolj se uveljavlja pristop, da se proizvodne in reinjekcijske vrtine različno dimenzionirajo - črpalna je za eno stopnjo manjša od reinjekcijske. Na primer, če je črpalna vrtina cevljena s premerom 177,8 mm (7"), je reinjekcijska z vsaj 244,5 mm (9 5/8"), oziroma če je črpalna vrtina cevljena z 244,5 mm (9 5/8"), je reinjekcijska z vsaj 345 mm (13 3/8"). Navedeno velja za vertikalne vrtine, v primeru usmerjenih vrtin je dimenzioniranje treba prilagoditi zmožnostim izvedbe vrtin, za kar se navadno izberejo manjši premeri zaradi izvedbenih omejitev. Včasih to pomeni potrebo po več reinjekcijskih vrtinah.

Pred vgradnjo filtrskega zasipa v medzrnskem vodonosniku se lahko za namene boljše lažje vgradnje filtrskega zasipa in lažje aktivacije izvede zamenjava polimernih izplake z zasičeno slanico NaCl s hkratnim vtiskovanjem filtrskega zasipa. Ta zaradi svoje gostote (1,2 kg/l) zagotavlja stabilnost kanala vrtine, hkrati pa preprečuje lepljenje zrn vgrajenega peščenega zasipa. Tudi odlaganje peščenega zasipa je lažje, ker ta v izplaki lebdi, medtem ko se pri navedenem načinu vgradnje usede v medprostor ob zmanjšanju ali prekinitvi cirkulacije.

Zaradi varčevanja s prostorom na površju in znižanja stroškov za cevovode (ter pridobivanja soglasij), se vse bolj uveljavljajo odklonjene (usmerjene) vrtine. Pri tem se največji odklon vrtine od vertikale giblje nekje med 45° in 50°, ponekod pa testirajo tudi subhorizontalne vrtine. Razdalja med ustji odklonjenih vrtin naj bo vsaj 5-10 m.

Pri vrtini v karbonatnih kamninah morda filtri niso potrebni in je lahko celo odprta (t.i. open hole), medtem ko je pri poseganju v slabše sprijete sedimente nujna uporaba filtrov in filtrskega zasipa. Pri reinjekcijski vertikalni vrtini se lahko uporabljajo filtri iz materiala 304/316/904 L, ki se ga NE sme kombinirati z jeklom, da ne pride do galvanskega spoja, ki povzroči poškodbe na ceveh. Zato se lahko uporabi nemagnetne vmesne prehode, ki preprečujejo nastanek galvanskega spoja. Spojnice za spajanje filtrov iz materiala 304L/316L/904L pa morajo biti iz takega materiala, da je cevi mogoče spajati.

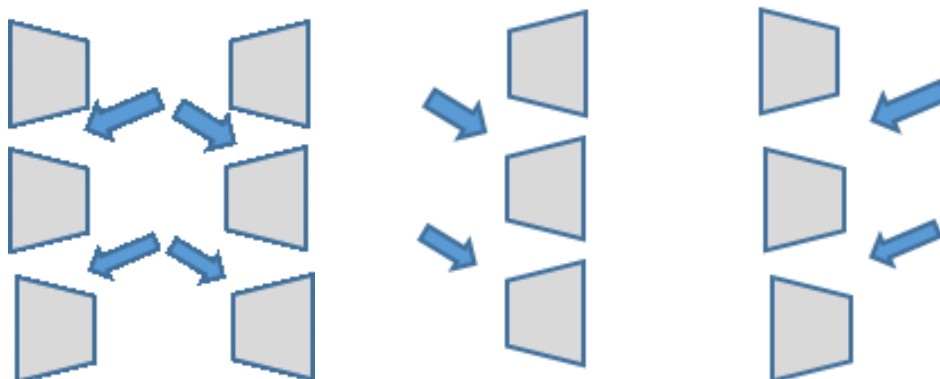
V medzrnskih vodonosnikih je nujna uporaba filtrskih cevi z ustrezno velikostjo in usmerjenostjo odprtih filtra, da ne prihaja do iznašanja melja in turbulenc v coni vtoka vode v formacijo. Hkrati je nujna izvedba zasipa filtrov z ustrezno granulacijo kremenčevega peska. V primeru dobrega poznavanja lastnosti ciljnih vodonosnikov z vidika granulometrije je mogoče izbrati tudi tovarniško izdelane filtrne cevi z zasipom. Tovrstna izvedba filtrnih cevi se imenuje D Pak filtri, ki pa ima poleg prednosti:

- Kvalitetno vgrajen zasip na mestu kjer se rabi,
- Visoka stopnja filtracije in natančnosti porazdelitve zrn, ki preprečujejo migracijo materiala iz črpanih vodonosnikov,

tudi naslednje omejitve:

- Enosmerni tok mogoč, povratno pranje filtrov problematično,
- V primeru da je granulometrija vodonosnika drugačna od načrtovane je delovanje filtra neustrezno,
- V primeru čiščenja le to ni vedno uspešno in lahko pride do zamašitve filtrov.

Primer D Pak filtrov je predstavljen na naslednji spletni strani: <https://johnsonscreens.com/wp-content/uploads/2022/09/Muni-Pak-9-13-22.pdf>.



Slika 2: Orientacija filtrov za reinjekcijske (levo) in proizvodne (desno) vrtine je drugačna

Lastnosti zajetih kamnin in potrebne lastnosti filtrov se najbolj zanesljivo določi z analizo jeder iz te ali bližnje vrtine na kemično in mineralno sestavo, velikost in razporeditev zrn, analizo poroznosti in prepustnosti jedra idr.

Pri reinjekcijskih vrtinah je zelo pomembna ustrezna dolžina in kvaliteta cementacije, saj ta preprečuje nekontroliran povratni tok vtiskane vode v medprostoru proti površini.

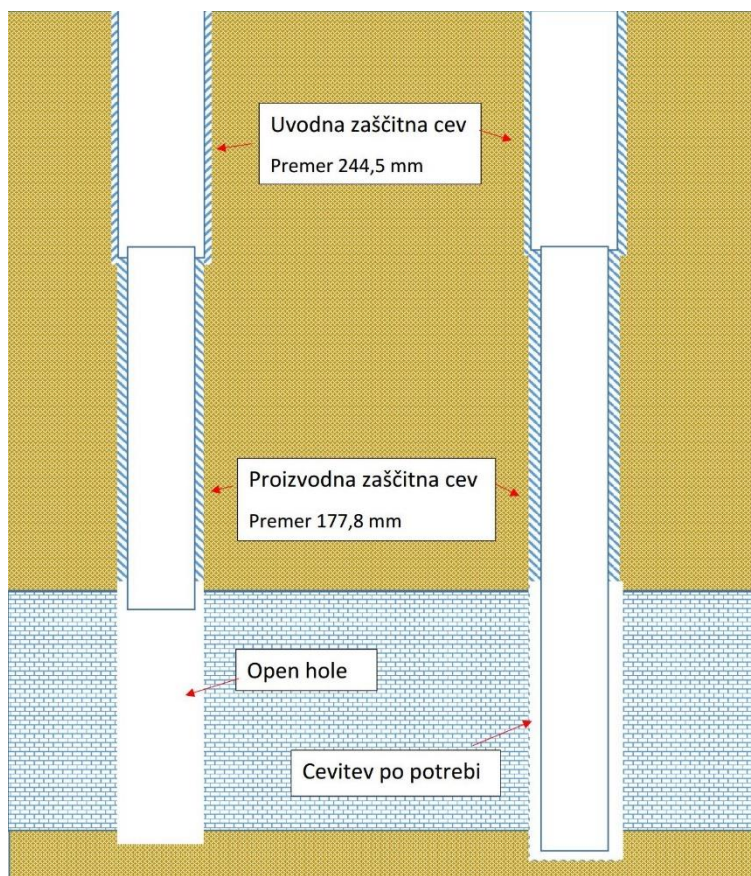
Pri izvedbi in testiranju vrtin s termalno vodo je potrebno upoštevati vse varnostne protokole, še posebej tiste, ki omogočajo zaščito pred možnostjo pojava (in izbruhov) vroče vode ter plinov (CO₂, CH₄).

3.1.2.1 Razpokliniski geotermalni vodonosniki

Razpokliniski geotermalni vodonosniki v Sloveniji prevladujejo v karbonatnih kamninah. Pojavljajo se v zahodni in osrednji Sloveniji ter predvsem v Krško-Brežiškem bazenu, pri čemer je globina črpanja zelo raznolika, od nekaj 100 m do približno 2 km. Črpališča termalne vode so pogosto nastala v bližini lokacij z naravnimi pojavi – termalnimi izviri.

Razpokane, karbonatne kamnine so običajno dovolj trdne in cementirane, razpoke pa dovolj velike, da v njih ne prihaja do premeščanja drobnih delcev, ki bi povzročili znižanje prepustnosti v neposredni okolici vrtine. Velikokrat takšne vrtine niso cevljene, imajo »open hole«, zato tudi nimajo filterskega zasipa.

Ponikati/vtiskati želeno količino vode običajno ni težava, občasno pa se vseeno zgodi, da je reinjekcijska vrtina slabše prepustna in zato ni mogoče vtiskati vse želene količine vode. V razpokliniskih vodonosnikih so pogostejše težave v velikem merilu, ki se kažejo kot preveč povezane razpoke med obema vrtinama, kar povzroči prehitel vtok hladne vtiskane vode nazaj v proizvodno vrtino.



Slika 3: Skica tehnične zasnove vrtine v razpoklinskih vodonosnikih

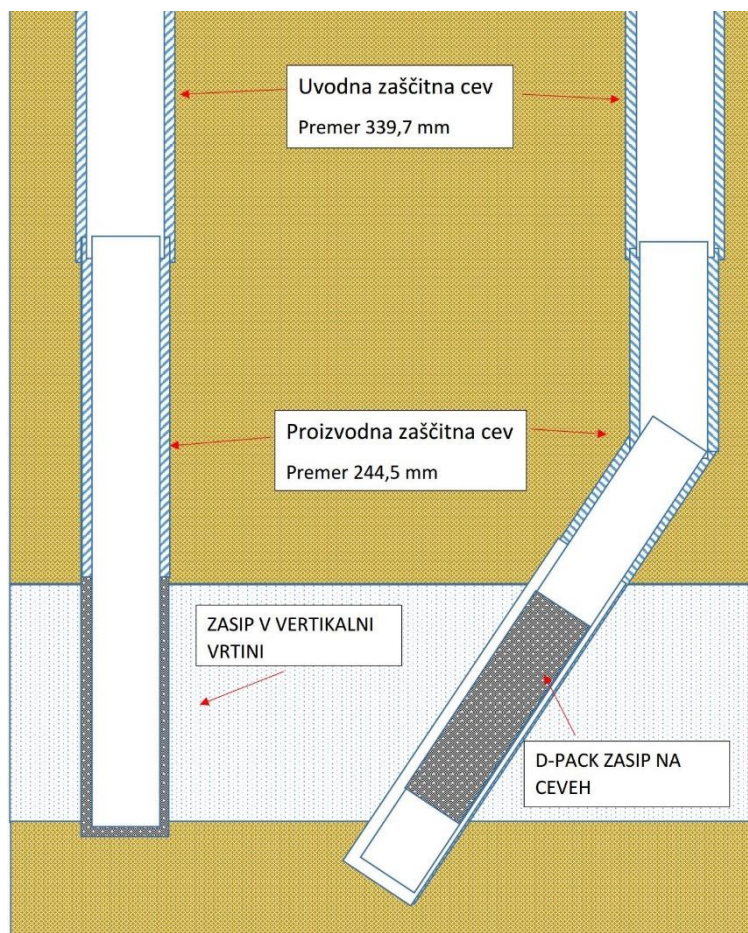
3.1.2.2 Medzrnski geotermalni vodonosniki

Medzrnski geotermalni vodonosniki so značilni za območje Panonskega bazena, torej SV Slovenijo, kjer se termalna voda pridobiva v globinah med približno 600 in 1500 m. Termalnih izvirov tukaj ni.

Peski so pogosto nesprijeti ali zelo slabo sprijeti in vsebujejo velik delež zrn z zelo majhno zrnavostjo frakcije velikosti melja, zato lahko ob prevelikih hitrostih podzemne vode pride do premeščanja zrn, ki v neposredni bližini vrtine povzročijo zamašitev por in znižanje njene kapacitete za vtiskanje. Nabrekanje zrn glin je bilo ugotovljeno na Madžarskem, pri nas pa so o potencialu za nabrekanje glin poročali v meljskih in peščenih sedimentih iz jeder odvzetih v vrtini Mt-9/23 v Moravskih Toplicah. Problem nabrekanja se pojavi, če v vodonosnik vtiskamo vodo z drugačno kemijsko sestavo od izvirne, še posebej, če gre za manj mineralizirano vodo.

Za vračanje načeloma iščemo sloje z efektivno poroznostjo nad 20%, prepustnostjo nad 500 mD in čim večjo debelino (nad 10/20 m) posameznega paketa (Seibt, Peter, 2008). Iščemo peske in peščenjake, kjer je nad 60% velikih por premera nad 5 μm , pore so dobro sortirane, delež melja in gline je pod 12%, delež cementa pa največ 10%. Ti minimalni kriteriji naj bi omogočali vračanje vsaj 15 l/s.

Zaradi velike stratifikacije in v primeru nehomogenosti takšnih vodonosnikov pogosto velja, da za eno proizvodno vrtino rabimo 2 reinjekcijski vrtini. Seveda sploh v primeru, da v sistemu rabe ni primernih zalogovnikov, ki kompenzirajo presežne količine v času konične potrebe po toploti. Ker je vtiskovalna sposobnost odvisna od lokalnih hidrogeoloških pogojev in tehničnih lastnosti obeh tipov vrtin, se polne kapacitete reinjekcijske vrtine ne da povsem zanesljivo napovedati vnaprej in jo lahko dokažemo le z daljšim testiranjem in rabo.



Slika 4: Skica tehnične zasnove vrtnice v medzrnskih vodonosnikih z obveznim filtrskim zasipom

3.2 Preureditev obstoječe vrtnice v reinjekcijsko vrtnico

Ker obstajajo številne opuščene vrtnice, se vedno pojavlja vprašanje, ali jih je možno preurediti v reinjekcijske. Takšne so na primer opuščene naftne in plinske vrtnice v Panonskem bazenu, ali pa raziskovalne vrtnice v karbonatnih vodonosnikih po Sloveniji, ki večinoma niso bile uporabljene zaradi prenizkih temperatur vode, majhne izdatnosti ali pomanjkanja porabnikov. Na to dilemo ni enoznačnega odgovora, pomenljivo pa je dejstvo, da mora biti reinjekcijska vrtnica običajno izvedena bolj kvalitetno kot proizvodna, če želimo vtiskati celotno količino pridobljene vode skozi en objekt.

V Sloveniji smo že testirali opuščene vrtnice, ki niso bile izdelane z namenom reinjekcije, v obeh tipih vodonosnikov. V razpokanih karbonatnih kamninah je vtiskana voda našla svojo pot na površje v nekaj urah, pri čemer so bili najverjetnejši razlogi za neuspeh: široka naravno razpokana cona, ki je ni mogoče zatesniti, slaba cementacija uvodnih zaščitnih cevi, poroznost cementnega kamna, naravno izvirsko območje z visokimi slojnimi tlaki itd. Zato vrtnica ni bila primerna za namen vzdrževanja tlaka v vodonosniku ter preprečevanja iztoka odpadne vode v površinski vodotok.

V SV Sloveniji opuščene naftne in plinske vrtnice niso opremljene s slotiranimi filtrskimi cevmi, niti nimajo filtrskega zasipa. Vrtnice so bile v sloju Murske formacije naluknjane z eksplozivom po spirali in zato je kontaktna površina s potencialnim vodonosnim slojem relativno majhna. Zato so po eni strani načeloma manj izdatne, kot bi bile ob uporabi primernih filtrov in zasipa, hkrati pa je vanje mogoče vtiskati le manjšo količino vode in to z dodatno energijo vtiskovalnih črpalk, kar poveča tveganje za premeščanja zrn v vodonosniku. Kratkotrajno vtiskovanje v tovrstne vrtnice je v preteklosti že bilo izvedeno vendar zaradi porasta tlaka in zmanjšanja kapacitete vtiskovanja uporabniki niso vztrajali pri tovrstnem sistemu (glej tudi Preglednica 1).

Glavno merilo pri odločitvi za spremenjen namen rabe vrtine je vsekakor njeno tehnično stanje, ki ne sme predstavljati tveganja za okolje in varnost ljudi. Tveganje za okolje se lahko odraža kot tveganje za povezavo več vodonosnikov znotraj ali ob vrtini, za nekontrolirano iztekanje (arteške) vode ali plina iz ali ob vrtini in za nezaščitenost ustje, kar je tvegano tudi za varnost ljudi, in možnost onesnaženja vodonosnika in podobno.

3.3 Čiščenje oziroma aktivacija vrtine

Po vrtanju ali daljšem nedelovanju vrtine se ne glede na njen tip (proizvodna, reinjekcijska) in tip vodonosnika (medzrnski, razpoklinski) izvede aktiviranje zasipa in čiščenje vrtine, ki ne sme poškodovati vodonosnika.

Po vgradnji opreme za delovanje se v vrtini najprej izvede čiščenje kanala vrtine v času 2 – 3 dni.

Sledi aktivacija zasipa. Takrat iz vrtine proizvajamo termalno vodo, da se delci v zasipu ustrezno orientirajo in se količina iznosa drobnega materiala zmanjša. V kolikor se pri izvajanju čiščenja pojavljajo povišani tlaki, je te spremembe potrebno analizirati in preveriti zakaj se to dogaja in vrtino preizkusiti z krajšimi intervali vtiskovanja in črpanja, na podlagi katerih se sprostijo morebitne napetosti v nahajališču in spremeni orientacija zrn, ki najverjetneje preprečuje podzemno pretakanje tekočin. V kolikor to ni uspešno, je treba razmisliti o kislini obdelavi slojev.

3.4 Pregled tehničnega stanja vrtine

Vrsta in obseg geofizikalnih - karotažnih meritev v reinjekcijski vrtini sta odvisna od njene starosti, stanja, dosedanje uporabe, globine, temperature in podobno. Pregled običajnih preiskav in njihovega namena je podan v Mozetič in sod. (2020), tukaj podajamo le nekaj najbolj ključnih priporočil.

Pregled stanja vrtine po izgradnji oziroma pred izvajanjem testiranja na dalj časa mirujočih vrtinah naj zajema vsaj:

- pregled s kamero ali akustičnim pregledovalnikom za oceno stanja zaščitnih cevi (stopnja korozije, oborin...) in prehodnosti vrtine,
- meritve premera cevovoda (caliper) za oceno stanja zaščitnih cevi in stanja odprtega kanala vrtine,
- pregled s sondo CBL ("cement bond log") za oceno kvalitete cementacije in likvidacije posameznih slojev,
- meritve naravne gamma aktivnosti v smeri navzgor za razločevanje litoloških členov,
- zvezne meritve statičnega tlaka, kjer se z analizo gradienta tlaka ugotavlja tudi točka razplinjanja,
- zvezne meritve statične temperature (ter če je možno še elektroprevodnosti vode) po celotni dolžini vrtine v smeri navzdol za določitev con in globine dotokov in iztokov vode.
- preizkus hermetičnosti vrtine in ustja vrtine na pričakovani delovni tlak.

Med hidrogeološkim testiranjem vrtin v različnih dinamičnih pogojih (različne količine proizvodnje in vtiskanja vode) se naj izvedejo tudi:

- zvezne meritve statičnega tlaka, kjer se z analizo gradienta tlaka ugotavlja tudi točka razplinjanja,
- zvezne meritve temperature (ter če je možno še elektroprevodnosti vode) po celotni dolžini vrtine za določitev con in globine dotokov in iztokov vode,
- zvezne meritve pretoka vode s flow metrom.

Po koncu dolgotrajnega hidrogeološkega testiranja vrtine je priporočljivo izvajati zvezne meritve temperature in tlaka v smeri navzdol po vrtini večkrat in z zamikom pol ure. Vse meritve se prikažejo na istem grafu in na ta način se lahko iz hitrosti obnavljanja temperature določi območje skladiščenja (prepustne cone).

Testiranje posameznih odsekov se lahko izvede zvezno ali z uporabo mehanskih barier (pakerjev).

Rezultate se predstavi v **poročilu o tehničnem stanju vrtine**, v katerem je podana ocena o stanju vrtine ter možnem vplivu na okolje in varnost ljudi in predlog vzdrževanja oziroma možne rabe v prihodnje.

3.5 Hidrogeološka testiranja

Reinjekcijska vrtina bo dosegla svoj namen, torej ohranjala ustrezne tlake v vodonosniku, v kolikor bo hidravlično povezana s proizvodnimi vrtinami in sposobna sprejeti željeno količino odpadne termalne vode.

Načeloma velja pravilo, da hladnejša, kot je vtiskana voda, lažje teče iz vrtine v vodonosnik in manjši je potreben tlak vtiskanja na ustju, saj teža gostejšega vodnega stolpca potiska vodo v vodonosnik zaradi gravitacije. Po izkušnjah v Panonskem bazenu se priporoča temperatura vtiskanja največ 40-45 °C, raje manj. **Poznavanje hitrosti in jakosti spremembe temperature vode na ustju in v vodonosniku je zelo pomembno za napovedovanje življenjske dobe geotermalnih parov vrtin, saj bistveno vpliva na hitrost toplotnega preboja in potencial za obarjanje mineralov.**

Vsa testiranja in spremembe med delovanjem sistema se poskuša izvajati z mehkim zagonom oziroma počasnimi prehodi, ki ne povzročajo hidravličnih udarov ali izrazitih temperaturnih nihanj.

3.5.1 Izhodiščni črpalni preizkus

Cilj izhodiščnega črpalnega preizkusa je ugotoviti osnovne hidrogeološke lastnosti in izdatnost vrtine ter lastnosti podzemne vode (in plina). V primeru slojevitosti proizvodnih plasti je smiselno testirati vsako plast posebej.

Ta preizkus se izvede po čiščenju vrtine, ko je tlak v vrtini stabilen.

Izvede se kratkotrajni večstopenjski preizkus v najmanj štirih korakih, imenovan tudi step test ali črpalni preizkus v korakih (Serianz in sod. 2020). Prične se z najnižjo količino, ki se jo v naslednjih korakih povečuje. Pomembno je, da je čas vseh korakov enak. Sledi mu analiza dviga gladine ter nato vsaj 24-48 h črpanja stalne (največje) količine, tudi če je stabilizacija gladine že dosežena. Ob koncu se lahko vzame tudi vzorec vode za določitev njene sestave. Skupno testiranje traja približno nekje do 5 dni.

Med črpanjem je priporočljivo vodo filtrirati na 5 mikronskih filterih in nato za pravilno dimenzioniranje površinskega sistema za čiščenje analizirati vzorce sedimenta na granulometrijo, vrsto delcev in kvantiteto sedimenta.

Kot rezultat testiranja se poleg hidrogeoloških parametrov določita tudi optimalna in največja količina črpanja vrtine. Največja količina naj bo takšna, da se omeji iznos melja iz vrtine.

3.5.2 Izhodiščni vtiskovalni preizkusi

Cilj izhodiščnega vtiskovalnega preizkusa je ugotoviti osnovne vtiskovalne sposobnosti vrtine, torej pri kakšnih tlakih na ustju (in v vrtini) lahko vtiskamo določeno količino vode.

Priporočljivo je, da je ob tem že vzpostavljen površinski sistem za čiščenje vode (peščeni filtri in vrečasti filtri), da se prepreči vnos nečistoč, ki bi lahko poškodovale filtre ali naredile blokado filterskega zasipa.

Ta preizkus se izvede po izhodiščnem črpalnem preizkusu, ko je ponovno dosežena stabilizacija tlakov v vrtini. Izvede se kratkotrajni večstopenjski preizkus z vtiskovanjem v najmanj štirih korakih. Po prenehanju vtiskanja se analizira še padca gladine. Sledi mu vsaj 24-48 h vtiskanja stalne (največje) količine vode. V kolikor je možno, priporočamo vtiskovanje vode v obdobju vsaj še nekaj dni. Skupno testiranje traja približno 5-7 dni.

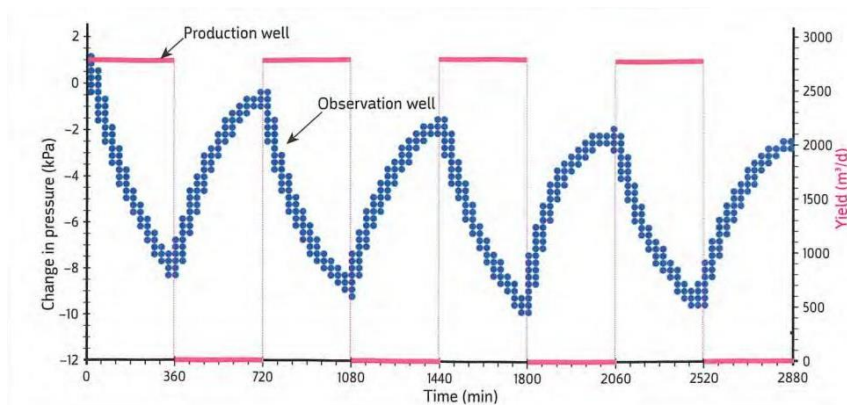
Največja količina vtiskanja vode naj bo takšna, da ne bodo presežene hitrosti toka, pri katerih bi prišlo do premeščanja delcev v vrtini in vodonosniku. Tlak vtiskanja v vodonosniku naj ne presega kritičnega formacijskega tlaka, ob katerem bi nastale razpoke.

Kot rezultat testiranja se določita tudi optimalni in največji delovni tlak vtiskanja pri izbranih količinah na reinjekcijski vrtini.

3.5.3 Interferenčni preizkusi

Cilj interferenčnih testov je določiti, ali in v kakšni meri je reinjekcijska vrtina hidravlično povezana z obstoječimi proizvodnimi in opazovalnimi vrtinami.

Izjava se po izhodiščnih preizkusih in v času nekaj dni do nekaj tednov, zato jih lahko kombiniramo z dolgotrajnejšimi preizkusi (3.5.4). Najlažje se ga izvaja kot pulzni test, pri čemer ustvarimo poljubno zaporedje pulzov s črpanjem ali vtiskanjem vode, ki jih nato iščemo v opazovalnih vrtinah.



Slika 5: Primer odziva opazovalne (neaktivne) vrtine na črpanje izbrane vrtine (Szanyi in sod. 2015).

Pri tem testiranju je zelo smiselno, da so sonde nameščene ne le na ustju vrtine, ampak tudi tik nad filtrsko cono. Če se le da, se izogibamo dolžini cikla, ki sovpada naravnim ciklom (lune, plime...), sploh v kolikor je pričakovana razlika v tlačnem odzivu tako majhna, da bi lahko dobili lažne rezultate.

3.5.4 Dolgotrajnejši preizkusi

Cilj dolgotrajnejših testiranj je zanesljivejše oceniti dolgoročne vtiskovalne sposobnosti vrtine ter obnašanje hidravličnega in temperaturnega polja v in ob vrtini. Tukaj je nujno, da je že vzpostavljen površinski sistem za odstranjevanje nečistoč pred vtiskanjem vode in vzpostavljen cevovod med vrtinami.

Ta preizkus se izvede po izhodiščnih preizkusih in naj obsega vsaj vtiskovanje vode v obdobju vsaj 21 do 90 dni s predvideno največjo količino vtiskanja med rednim delovanjem sistema.

Največja količina vtiskanja vode naj bo takšna, da ne bodo presežene hitrosti toka, pri katerih bi prišlo do premeščanja delcev v vrtini in vodonosniku. Kot rezultat testiranja naj se izboljšajo vsi parametri, ki so bili določeni že s kratkotrajnimi preizkusi, sploh največji delovni tlak vtiskanja. Hkrati se na podlagi pridobljenih informacij in trendov soodvisnosti tlaka, temperature in količine vode lahko oceni potrebo pogostosti čiščenja vrtine v bodoče.

3.5.5 Sledilni preizkusi

Cilj sledilnih preizkusov je ugotavljati, kolikšen del vtiskane vode, kdaj in pod kakšnimi pogoji se ponovno pojavi v proizvodni vrtini.

Vtiskani delci pridejo v proizvodno vrtino (snovni preboj) veliko hitreje preden se zniža temperatura pridobljene vode (toplotni preboj). Zato lahko, v kolikor je pričakovan snovni preboj merljiv v času in prostoru, s takšnimi preizkusi napovemo oziroma spremljamo intenzivnost povezave med obema tipoma vrtin. V razpoklinskih vodonosnikih se z njimi lahko oceni prostornino razpok. Takšne preizkuse je smiselno izvajati po interferenčnih testih.

Sledilo mora biti odporno na povišane temperature v geotermalnem vodonosniku in imeti lokalnim pogojem prilagojen razpolovni čas oziroma pogoje naravne razgradnje. Uporabljajo se na primer tricij, različni izotopi joda, fluorescin, rodamin in brom, v novejšem času tudi žlahtni plini. Pri izbiri je zelo pomembno, v kolikšen čas pričakujemo dotok sledila v proizvodno vrtino (stvar dni ali mesecev in let), saj to bistveno vpliva na način vzorčenja in s tem ceno analiz oziroma samega preizkusa. Načrtovanje izvedbe se lahko olajša z uporabo predhodnih simulacij toka podzemne vode in napovedi časa dospetja.

3.6 Geotermične meritve

V primeru reinjekcije je za napoved spreminjanja temperature vzdolž vrtine in v vodonosniku ključno dobro poznavanje toplotne prevodnosti in difuzivnosti ter poroznosti vodonosnega sloja. Te lastnosti se lahko prevzame iz podatkov bližnjih vrtin, še boljša pa je analiza jeder iz same produkcijske in reinjekcijske vrtine, ne le na kemično in mineralno sestavo, velikost in razporeditev zrn in poroznost ter prepustnost jedra, temveč tudi na geotermične lastnosti. Pri tem je v primeru zelo plastovitih vodonosnikov smiselno ocenjevati tudi njihovo homogenost in anizotropnost ter določiti lastnosti tudi manj prepustnih plasti, ki zapirajo glavni geotermalni vodonosnik.

3.7 Simulacija delovanja dubleta skozi celotno življenjsko dobo

Vsako delovanje para proizvodno-reinjekcijskih vrtin povzroči hidravlični in temperaturni vpliv na vodonosnik. Ocenimo lahko spremembo piezometrične gladine (0,1 m, 1 m, 10 m....), temperature (1 °C, 3 °C ali več) in količino povratka vtiskane vode v proizvodno vrtino (0-100%) v izbranem času delovanja sistema (1, 10, 25 let...) in v primeru 2D in 3D modelov tudi v prostoru. V slovenski zakonodaji mejna vrednost spremembe parametrov gladine in temperature vode v vodonosniku ni podana. Temperaturni ali hidravlični kriteriji so stvar dogovora, prav tako njihova lokacija (npr. ali so podani na meji parcele, na druge obstoječe objekte in podobno). Vpliv je nato potrebno dokazovati z monitoringom in ocenjevati v času z analitičnimi ali matematičnimi modeli.

Vračanje najprej povzroči hidravlični vpliv na vodonosnik (angl. hydraulic front / cone of influence), torej zviša gladino podzemne vode v okolici reinjekcijske vrtine. Temu sledi premikanje delcev vode po vodonosniku, ki običajno slej ali prej ponovno prispejo v proizvodno vrtino. Tak povratek je pričakovan in celo želen in ga opisujemo s t.i. *snovnim čelom oziroma prebojem* (angl. tracer front / breakthrough). Z vidika pridobivanja geotermalne energije je dobro, da je čim višji, saj je voda prenašalec toplote na površje. Snovni preboj je lahko čas, v katerem prvi vtiskani delci ponovno dospejo do proizvodne vrtine, lahko pa razdalja dospetja vtiskane vode v vodonosniku, ki je izračunana kot aritmetična sredina začetne koncentracije snovi v rezervoarju in vtiskane vode. Sčasoma, običajno bistveno počasneje kot pri snovnem preboju, lahko pride do *toplotnega čela / preboja* (angl. thermal front / breakthrough). Ta pojem označuje čas, ko prvi hladni delci dospejo do proizvodne vrtine, kar se odraža kot znižanje temperature za izbrano vrednost (lahko npr. 1 °C), oziroma trenutek, ko se začne temperatura rezervoarja pomembno nižati ali pa se cel ohladi na temperaturo vtiskane vode, spet drugi ga podajo pri aritmetični sredini temperature v rezervoarju in vtiskane vode.

Ker definicije oziroma izračuni snovnega in toplotnega preboja niso enoznačni, je nujno, da je jasno podano, kaj in kako je izračunano.

Analitični in matematični pristopi k oceni omenjenih prebojev so številni, zato je najpomembnejše, da so uporabljene metode, vhodni podatki in izbrane mejne vrednosti jasne in nedvoumno pojasnjene, da je moč modele preveriti in z novimi podatki sčasoma izboljšati.

Analitični modeli podajo osnovno idejo o obsegu vpliva vrtin, običajno z eno rešitvijo kot strmo/hipno spremembo, medtem ko je prehod pri matematičnih modelih postopen. Načeloma je srednja točka matematične rešitve enaka analitični. Na Nizozemskem je za pridobitev (finančne) garancijske sheme za rabo geotermalne energije celo zahtevana raba programa DoubletCalc (Miljnlieff in sod. 2014), ki oceni moč dubleta.

V praksi se za simulacijo toka podzemne vode, prenosa snovi in toplote v 2D in 3D prostoru in ob izbranih časih delovanja dubleta najpogosteje uporablja programska oprema FEFLOW, SHEMAT ali TOUGH2. Po testiranju vrtin se z njo lahko napove pričakovano delovanje dubleta, nato pa se z uporabo podatkov monitoringa simulacije stalno izboljšuje in tako upravlja z vrtinami, da se zagotavlja optimalno delovanje za celotno načrtovano življenjsko dobo sistema (angl. reservoir management). Pri simulaciji je zelo pomembno uporabiti dovolj veliko območje, da se izničijo efekti ročnih pogojev zaradi numeričnih operacij. Hkrati mora biti pri interpretaciji dinamičnih modelov zelo jasno opredeljeno upoštevanje zgodovinskega stanja (morebitni depresijski radij, nastal zaradi črpanja pred vzpostavitev reinjekcije) ter sovplivov med več vrtinami ali uporabniki.

3.8 Kemijska in izotopska sestava podzemne vode

Ob izgradnji oziroma pred testiranjem predvidene reinjekcijske vrtine za njene vtiskovalne sposobnosti je potrebno določiti kemijsko in izotopsko sestavo podzemne vode. Predlagamo, da se analize opravi po enakih zahtevah, kot so podane v točkah k c) in k č) v obstoječih Uredbah, Priloga 2: Monitoring, 3. Spremljanje fizikalno-kemijskih značilnosti podzemne in odpadne vode. Te analize naj zajemajo: določitev osnovnih fizikalno-kemijskih lastnosti,

Nabora parametrov 1 in 2 ter analizo izotopske sestave vode (vrednosti razmerja med ^{16}O in ^{18}O , razmerja med vodikom in deuterijem ter aktivnost tritija).

Primerjati je potrebno sestavo vode v reinjekcijski vrtini s tisto, ki se bo vtiskovala. Z vidika ohranjanja enakega kakovostnega stanja je smiselno, da se vodi ne razlikujeta za več kot 20% povprečne sestave. Vendar je uporaba te razlike za kriterij lahko pogojena tudi z namenom reinjekcije in vrsto geološke formacije, v katero se voda vrača.

Opredeliti se je potrebno do možnih trendov sprememb v kemijski in izotopski sestavi vode okoli reinjekcijske vrtine zaradi vtiskanja vode iz druge vrtine, v kolikor je to načrtovano. Za to se priporoča geokemično modeliranje z upoštevanjem pričakovanih sprememb tlaka in temperature med samim procesom.

Oceniti je potrebno tveganje za neželene kemijske reakcije zaradi spremenjenega tlaka, temperature in dotoka morebiti nekoliko različne vode in plinov, morda kisika; predvsem za pojav korozije in obarjanja mineralov. Pri tem velja pozornost na koncentracije kalcita, kremenice, železa, sulfidov, klorida, sulfata, O_2 , H_2S ter CO_2 . Vsaka lokacija ima svoje posebnosti, pomoč in smernice pa so, na primer, razvijali v projektu PERFORM (Mathiesen in sod. 2021).

V Sloveniji je najverjetnejša težava pričakovano obarjanje karbonatov zaradi spremembe tlaka na površju in zmanjšanja topnosti z naraščajočo temperaturo ob reinjekcijskih vrtinah.

V nekaterih primerih se je smiselno opredeliti tudi do potenciala za nabrekanje mineralov glin v vodonosniku, kar se lahko preverja tudi z laboratorijskimi preizkusi. Težave se lahko pojavijo, ko se na Ca-montmorillonit veže natrij iz termalne vode in nastane nabrekli Na-montmorillonit. Neugodna je lahko tudi prisotnost organskih snovi (premoga). Za te preiskave se lahko uporabijo tudi izpirki med vrtanjem, še boljše pa je pridobiti in testirati jedro vodonosnega sloja.

Reinjecirana voda naj bo brez prostega plina, da se mehurčki ne ujamejo v pore ob vrtini in z zelo visokim tlakom vtiskanja preprečujejo uspešno reinjekcijo. To je še posebej pomembno, kadar voda vsebuje prosti CO_2 ali CH_4 . Metan je inertni plin, zato ga lahko vtiskamo, vendar je slabo topen in je potrebno upoštevati tudi večje varnostne zahteve zaradi možnosti eksplozije. Hkrati lahko organske snovi služijo kot hrana za bakterije, katerih razrast lahko povzroči zamašitev por. Ogljikov dioksid je načeloma ugoden v raztopini, ker znižuje pH in tako preprečuje obarjanje kalcita, vendar pa lahko tudi vpliva na potek kemijskih in mikrobioloških reakcij v vodonosniku.

3.9 Monitoring reinjekcijskih vrtin

Monitoring reinjekcijskih vrtin naj se izvaja po podobnem protokolu, kot je predpisan za proizvodne vrtine v obstoječih Uredbah, Priloga 2: Monitoring. Zajema naj stalne in zvezne meritve:

- vtiskane količine (trenutna količina in skupna odvzeta količina),
- temperature vtiskane vode na ustju vrtine,
- tlaka (ali gladine) na ustju vrtine.

Priporočljivo je izvajati:

- stalne in zvezne meritve temperature in tlaka tik nad filtri v vrtini in/ali na ustju vrtin,
- sistematične meritve kemijske sestave vode in plinov ter prostornine plinov na ustju reinjekcijske vrtine (kjer je to relevantno),
- stalne in zvezne meritve gladine v zalogovnikih,
- stalne in zvezne meritve tlaka in temperature pred in po različnih izmenjevalcih in filtrih,
- stalne in zvezne meritve časa delovanja in frekvenc črpalke v cevovodih ter na ustju reinjekcijske vrtine,
- periodične tlačne preizkuse tesnosti vrtine in ustja vrtine.

Enkrat letno, ob črpanju iz vrtine predlagamo določitev kemijske in izotopske sestave vode po enakem protokolu, kot je določeno v uredbah za proizvodne vrtine v Priloga 2: Monitoring, le brez žlahtnih plinov.

Sistematično naj se izvaja meritve učinkovitosti in specifične izdatnosti vrtine, kot je določeno v uredbah za proizvodne vrtine v Priloga 2: Monitoring, točka 4. k b). Smiselno je izvajati tako kratkotrajne večstopenske črpalne kot vtiskovalne preizkuse in kot določene karotažne meritve, predvsem temperature po celotni dolžini vrtini.

V primeru ugotovljenih sprememb tehničnega stanja vrtine je priporočljivo izvesti meritve prehodnosti vrtine ter temperaturnega in tlačnega gradienta po celotni dolžini vrtine tako v statičnem kot dinamičnem stanju.

Ker v smernicah opisujemo le reinjeciranje vode pri nizkih tlakih (do približno 5 bar na ustju), se ne opredeljujemo do potencialnih mikro seizmičnih pojavov in potreb po njihovem monitoringu.

3.10 Zagotavljanje čiste vode za vtiskovanje

V primeru reinjekcije v medzrnske vodonosnike Panonskega bazena je še veliko bolj kot pri razpoklinskih vodonosnikih pomembno zmanjšati tveganja za erozijo oziroma premeščanje delcev v vodonosniku. Osnovni tehnični dejavnik je ustrezen filterni zasip in filterne cevi same vrtine, smiselno pa je izvajati tudi številne postopke priprave vode.

Vodo v cevovodih je smiselno sterilizirati, da se v njej ne razrastejo mikroorganizmi, ki lahko tvorijo kosme in prevleke. To je še posebej pomembno v času zaustavitve sistemov ali morebitnih 'mrtvih rokavov', zato se v času nedelovanja sistema priporoča izpraznjenje cevovodov. Sterilizacija se lahko izvaja z različnimi tehnološkimi postopki, tudi z UV svetlobo, ozonom, segrevanjem nad 75 °C ipd., pri čemer je potrebno paziti, da se ne spodbuja korozivnosti vode ter ne uporablja biocidov.

Poleg mikroorganizmov se skozi proizvodno vrtino izpirajo tudi zrna iz vodonosnika, ali pa v cevovodu nastajajo produkti korozije in obarjanja v sistemu izrabe vode. Priporočljivo je, da je celoten površinski sistem cevovodov pod stalnim nadtlakom, da se izognemo vdoru zraka in s tem produktom oksidacije in/ali korozije.

Delce odstranimo z večstopenjskim (mehanskim) filtriranjem, pri čemer so primerni različni kovinski, peščeni in tekstilni vrečasti filtri. Velikost por je odvisna od velikosti zrn v sistemu, ki jih lahko določimo z raziskavo sedimenta, kar je smiselno ugotoviti za vsak tip zrn posebej, in velikost por je običajno v razponu od 1, 10 do 25 (tudi do 80) µm.

Sistem priprave termalno izrabljene vode je sestavljen iz več komponent, ki tvorijo zaključeno celoto priprave termalne vode, in sicer:

- Zbirni rezervoar vsaj 100 m³ z usedalnikom za umirjanje termalne vode pred filtracijo in vtiskanjem ter za potrebe regulacije delovanja sistema
- Črpalke za črpanje, potiskanje in vtiskanje vode preko sistema v vrtino.
- Armature in sistemom filtracije na 10 in 5 mikronov ter sistemom čiščenja filternih enot.
- Povezovalni tlačni vod do vrtine.

Za zanesljivo in učinkovito delovanje sistema je ključno redno preventivno čiščenje zalogovnikov in površinskega filternega sistema (povratno izpiranje in menjava tekstilnih filtrov), s čimer se spremlja in vzdržuje mehanska čistost vode ter prepreči morebiten vnos nečistoč v reinjekcijsko vrtino.

3.11 Vzdrževalni posegi tekom obratovanja

Le stalen in natančen opazovalni sistem vseh faz delovanja sistema, od proizvodne vrtine preko cevovodov in zalogovnikov do reinjekcijske vrtine, omogoča pravočasno ukrepanje v primeru poslabšanja vtiskovalnih sposobnosti.

Najkasneje ko se doseže največji delovni tlak vtiskanja na reinjekcijski vrtini, je potrebno vrtino revitalizirati. Najprej se izvede povratno izpiranje vrtine, torej se jo črpa nekaj ur, do stabilizacije gladine in fizikalno-kemijskih lastnosti vode. S tem se delci, prilepljeni na steno vrtine (tudi zaradi obarjanja mineralov) ali ujeti v režah filtrov, običajno uspešno odstranijo. Poseg je običajno potreben enkrat do dvakrat na leto.

V medzrnskih vodonosnikih Panonskega bazena je običajni delovni tlak na ustju reinjekcijske vrtine 2-3 bar. Ko doseže 5 bar, se vrtino aktivira s povratnim črpanjem. Tudi pred filtri je priporočljivo, da je tlak pod 5,5 bar, zato da se ne uničijo in nečistoče ne preidejo nenadzorovano v reinjekcijsko vrtino.

Kadar se delci usedejo na dno vrtine in zaprejo odprte intervale, jih odstranimo s čiščenjem (aktivacijo) vrtine pri višjih tlakih, ki lahko poteka tudi le v posameznih slojih.

V kolikor še vedno ni uspeha, je morda potrebno mehansko čiščenje (v vrtino se vgradi orodje za čiščenje filtrov z izpiranjem pod tlakom) ali vtiskanje kisline in s tem raztapljanje oborjenih karbonatnih mineralov.

3.12 Ravnanje v primeru dotoka hladnejše vode v proizvodno vrtino

V kolikor pride do toplotnega preboja v proizvodni vrtini, se ga lahko rešuje na več načinov. Sprememba obratovanja lahko zajema:

- Znižanje količine vtiskane vode.
- Izmenjevanje namena vrtin (služijo enkrat za proizvodnjo, drugič za vtiskanje vode), za kar morajo biti že predhodno ustrezno pripravljene, tudi njihov površinski sistem.
- Sezonsko/ciklično rabo vrtin (tudi s poletnim skladiščenjem toplote).

V kolikor se vrta nove vrtine, je možno:

- Povečati oddaljenost novih reinjekcijskih vrtin.
- Spremeniti prostorsko razporeditev vrtin glede na njihov namen.
- Spremeniti globino vtiskanja, a da je še vedno v isti vodonosnik.
- Narediti trojček vrtin (vrtini iz starega para postaneta reinjekcijski vrtini, izvrtata se nova proizvodna).

4 Priznavanje reinjekcijskih vrtin v drugih državah

4.1 Vodna direktiva

Po Direktivi Evropskega parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike (OJ L 327, 22.12.2000) velja:

11. člen: Države članice lahko dovolijo ponovno injiciranje vode, uporabljene za izkoriščanje geotermične energije, v isti vodonosnik.

11. člen 3. alineja točka (f): Osnovni ukrepi“ so najmanjše zahteve, ki jih je treba izpolniti, in jih sestavljajo: nadzor, skupaj z zahtevo za predhodno dovoljenje za umetno napajanje ali bogatenje teles podzemne vode. Uporabljena voda se lahko pridobiva iz katere koli površinske ali podzemne vode, če raba vira ne ogroža doseganja okoljskih ciljev, določenih za ta vir ali za obnovljeno ali obogateno telo podzemne vode. Ta nadzor se redno preverja in po potrebi posodobi.

Ob določitvi pogojev lahko dovolijo tudi: injiciranje vode, ki vsebuje snovi, ki nastajajo v postopkih za iskanje in pridobivanje ogljikovodikov ali iz rudarskih dejavnosti, in injiciranje vode zaradi tehničnih razlogov v geološke formacije, iz katerih so bili ogljikovodiki ali druge snovi pridobljeni, ali v geološke formacije, ki so zaradi naravnih razlogov trajno neprimerne za druge namene. Taka injiciranja ne smejo vsebovati nobenih drugih snovi, razen tistih iz zgoraj navedenih postopkov.

Poleg nje se reinjekcije najbolj dotika Direktiva o varstvu podzemnih voda pred onesnaževanjem omogoča reinjekcijo v isti vodonosnik, dodatno umetno napajanje pa je dovoljeno le s posebnimi raziskavami in dovoljenji.

4.2 Slovenija

4.2.1 Zakon o vodah

46. alineja 7. člena Zakona o vodah (Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdl-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15 in 65/20) določa, da »Neposredna raba vode za pridobivanje toplote je energetska izraba vode z odvzemanjem ali dodajanjem toplote z uporabo toplotnega izmenjevalnika, kjer se vsa voda v primarnem vodokrogu vrača na izvorno mesto (v isti vodonosnik ali isto tekočo ali stoječo vodo ali v morje).«

4.2.2 Zakon o rudarstvu

V 2. členu Zakona o rudarstvu (Uradni list RS, št. 14/14 – uradno prečiščeno besedilo in 61/17 – GZ) so podane sledeče definicije:

2. Mineralne surovine, razen geotermičnih energetskega virov, so neobnovljivi naravni viri, ki so posredno ali neposredno gospodarsko izkoristljivi.

2.2. Geotermični energetski vir je toplotna energija, ki se nahaja v geoloških plasteh pod površjem tal in se obnavlja s toplotnim tokom iz Zemljine notranjosti.

3.2.5. Vrtina, namenjena izkoriščanju ogljikovodikov in geotermičnih energetskega virov, je točkovni površinski kop s podzemnim izkoriščanjem mineralne surovine.

4.2.1.4. Izkoriščanje geotermičnega energetskega vira z reinjektiranjem pomeni, da se toplotna energija iz geoloških plasti odvzema preko dveh vrtin, ki se na površju stikata oziroma sta medsebojno povezani, v geološki strukturi pa sta oddaljeni najmanj 25 m, kot nosilec za odvzem toplotne energije pa se uporablja naravna podzemna voda, ki se jo v eni vrtini črpa iz določene geološke strukture oziroma vodonosnika do odzemnega mesta toplote, po odvzemu toplote iz nje pa se ta voda preko druge vrtine vrača nazaj v izvorno geološko strukturo oziroma vodonosnik.

Iz besedila sledi, da je v tem primeru zahtevana 100% reinjekcija.

Ob tem 2 odstavek 5. člena pravi, da je pred začetkom raziskovanja potrebno pridobiti tudi dovoljenje za raziskovanje (DZR), 4. odstavek pa, da »Ne glede na določbe prejšnjega odstavka se izkoriščanje geotermičnih energetskega virov z reinjektiranjem, kadar sta črpalna in povratna vrtina globoki manj kot 30 metrov, izkoriščanje geotermičnih energetskega virov z geokolektorjem in izkoriščanje geotermičnih energetskega virov z geosondo, izvajajo brez koncesije po tem zakonu.«

4.2.3 Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14 in 98/15) v 2. odstavku 3. člena podaja, da se določbe te uredbe NE uporabljajo za emisijo toplote pri vračanju podzemne vode po uporabi za ogrevanje ali hlajenje objektov v isti vodonosnik. Odpadna termalna voda, ki se po uporabi izpušča v površinske vode, se po njej tretira kot industrijska odpadna voda.

4.2.4 Obstoječe reinjekcijske vrtine v Sloveniji

V Sloveniji smo imeli v 90. letih prejšnjega stoletja prvi geotermalni dublet v regionalnem in čezmejnem peščenem vodonosniku Murske formacije v Moravskih Toplicah, vendar je dokumentacija o uspešnosti vračanja razmeroma pomanjkljiva. Edina odklonjena reinjekcijska vrtina Mt-7 je bila testirana po vrtanju v letu 1993 in nato občasno še kasneje, pri čemer poročajo, da so vračali do približno tretjine pridobljene termalne vode. Nato je bila po letu 2000 zaradi večjih potreb po termalni vodi vrtina spremenjena v proizvodno in se še aktivno uporablja.

Od leta 2008 uspešno deluje geotermalni par vrtin v Murski formaciji v Lendavi, kjer se pri reinjekcijski vrtini Le-3g uporabljajo tudi zalogovnik, površinski filtrni sistem s peščenimi filtri in dvema vrstama mikrofiltrir iz tkanine, črpalke za vtiskanje in on-line opazovalni sistem za nadzor delovanja. Po koncu obratovalne sezone vedno izvedejo povratno izpiranje reinjekcijske vrtine, po potrebi tudi med sezono. Natančna količina vtisnjene vode ni znana, ker pa je to edini dublet pri nas z rudarsko koncesijo, bi glede na tip dovoljenja morala biti 100% proizvedene termalne vode.

Preglednica 1: Pregled obstoječih reinjekcijskih vrtin v Sloveniji, testiranih do leta 2024

Lokacija	Vodonosnik	Delovanje (leto)	Globina proizvodnih vrtin	Vertikalna globina reinjekcijskih vrtin	Temp proiz. Vode (°C)	Temp. vtisk. Vode (°C)	Tlak vtiskanja na ustju (bar)	Vir
Moravske Toplice	Murska formacija	Občasno 1993-1997	Mt-6: 720-974 m	Mt-7: 751-985 m; odklonjena	57	35	1,6 bar	Kraljič in sod., 2004
Vračanje 10-30 % zaradi slabe črpalke za vtiskanje. Vrtina je odklonjena dolvodno od črpalnih.								
Moravske Toplice	Murska formacija	Izvrtna 2023	Mt-6 in Mt-7	Mt-9: 820-1024 m; odklonjena	Testirana bo v letu 2024 ali kasneje			
Vrtina je vzporedno glede na tokovnice od črpalne vrtnice Mt-7 in v depresijskem radiju obeh črpalnih vrtin. Opremljena je z Johnson filtri in filtrskim zasipom.								
Lendava	Murska formacija	Od 2008	Le-2g: 813-1493 m	Le-3g: 720-1216, Vodoravna razdalja je 650 m	66	40-50	3 bar pri 30 l/s; 6,5 bar pri 50 l/s	Vukelič in sod., 2013
Vrtina je gorvodno od črpalne. Opremljena je z Johnson filtri, filtrski zasip in površinski filtrirni sistem za odstranjevanje nečistoč. Na koncu sezone (spomladi) vrtino aktivirajo, da sprejejo filtre.								
Murska Sobota	Murska do Haloška formacija	Testiranje 2016	Sob-3g: 1520 m; Sob-1:	Sob-4g: 1200 m	52-56	22,5	4,2-4,8 bar pri 10 l/s; 4,2-4,2 pri 10 l/s; 19 bar pri 13,8 l/s	Nafta Geoterm, 2013; Rogelj in sod., 2016
Vrtina je 1,9 km dolvodno od Sob-3 in 0,7 km gorvodno od Sob-1 in Sob-2 (skoraj na sredi med njimi). Ima Johnson filtre in filtrski zasip. Testiranje v 2016 je potekalo z vtiskanjem hladne vode iz hidranta.								
Izlake	dolomit	Testiranje 2015	Jamski izvir, V-3/84: 775 m	P-1, P-2, P-3: vse 50 m, razdalja med njimi je 10-17 m, od V-3 pa cca 140 m	24,5	np	np	Črepinšek, 2016
Vrtine so dolvodno od črpalnih in Jamskega izvira. Filtrski odsek je na 6-9 m ter na 44-50 m, torej v melju in dolomitu.								

V letu 2012 je bil izvrtn geotermalni par vrtin v Murski Soboti, od katerega je bila Sob-4g mišljena kot reinjekcijska vrtina. Tako v Lendavi kot Murski Soboti so filtrski odseki izdelani s prefabriciranimi Johnson filtri in peščenim zasipom, odprte odseke pa aktivirali posamično, da so se bolje očistili. Glavna težava testiranja te vrtnice je bila, da do nje še ni bil izveden ustrezen cevovod in je bilo testiranje izvedeno predvsem s hladno vodo iz hidranta, hkrati pa je občina opustila rabo geotermalne energije iz termalne vode kot eno izmed svojih prioritet in zato se njene primernosti za ta namen ne ugotavlja več.

Menda je v letu 2012 potekalo testiranje opuščene naftne vrtnice Fi-5 v Renkovcih za namene vtiskanja, vendar nam rezultati niso poznani.

V letu 2016 so bile izdelane tri plitve vrtnice za vračanje termalne vode v Izlakah. Nasprotno od prejšnjih, so te vrtnice bistveno plitvejšje in v karbonatnem vodonosniku z obstoječim termalnim izvirom. Podatki o njihovem testiranju so zelo skopi in količina ponikanja v posamezno vrtino se ne spremlja.

4.3 Avstrija

Podatke je posredoval Gregor Goetzl, Avstrijski geološki zavod.

V Avstriji je reinjekcija obvezna za rabo termalne vode v energetske namene in prepovedana pri rabi za balneologijo. Namenjena je vzdrževanju hidravličnega in kemičnega stanja vodonosnikov. Reinjekcija je strošek podjetja, ki plača administrativne stroške pridobivanja dovoljenja, ne pa »porabe«, ker je po njihovem razmišljanju uporabljena le temperatura vode in ne voda sama. Za vsak primer se potreba po njej presoja individualno.

Smernice so podane v OEWA RB 215, vendar ni tehničnih standardov. Dokument podaja, da je priporočljivo vračati energijsko izrabljeno vodo v isti vodonosnik in se opira na avstrijski Zakon o vodah, kjer je reinjekcija (termalne vode in za plitve hladne vode) regulirana z dovoljenji (WRG 1959, §32), vendar ni opredeljenih tehničnih standardov ali mejnih vrednosti. Priporočajo, da se dovoljenje za energijsko rabo termalne vode izda za največ 30 let, za balneološko rabo brez reinjekcije pa za največ 20 let.

Podpore o raziskavah in razvoju so načrtovane s strani National research programs on energy KLIEN, FFG in funding agency KPC (Šantl & Rojnik, 2019).

4.4 Bosna in Hercegovina, Hrvaška, Romunija in Srbija

Bosna in Hercegovina, Hrvaška, Romunija in Srbija nimajo zakonodaje, ki ureja področje reinjekcije (Rman in sod. 2019b).

V Bosni in Hercegovini, lokacija Slobomir v Republiki Srpski, se termalna voda vrača v drug, plitev aluvialni vodonosnik, čeprav reinjekcija ni zahtevana. Vpliv takšnega vračanja ni nadzorovan.

Na Hrvaškem reinjekcija za pridobivanje toplote že poteka v okviru ogrevanja športnega kompleksa Mladost v Zagrebu od leta 1987. Namen vrtin se lahko izmenjuje, vrtime delujejo brez opaznejših težav in vodonosnik predstavljajo razpokane karbonatne kamnine (Rman in sod. 2019c). Od leta 2020 deluje tudi reinjekcija v okviru geotermalne elektrarne v Veliki Cigleni, tudi v karbonatne kamnine v podlagi. O reinjekciji v peščen vodonosnik, ekvivalenten naši Murski formaciji, ne poročajo. Pri novih lokacijah rabe reinjekcija v slednji vodonosnik ni a priori zahtevana in se potreba po njej presoja od primera do primera.

Podpora za razvoj geotermalne energije je na voljo s strani EPEEF – Environmental Protection and Energy Efficiency Fund Hrvaških voda (Šantl & Rojnik 2019), podpore sheme so tudi za geotermalno elektriko.

V Srbiji na območju projekta DARLINGe ni bilo reinjekcijskih vrtin.

4.5 Češka

Po informacijah Zdenka Triskala iz češkega inšpektorata za toplice in mineralne izvire pod okriljem Ministrstva za zdravje (Rman in sod. 2019a) je na Češkem prioriteta raba termalne vode za toplice. Za pridobivanje toplote uporabljajo le zaprte sisteme geosond, zato se s težavami reinjekcije ne ukvarjajo.

Podatke za Češko sta sporočila tudi Vit Hladik in Jan Holeček, Češki geološki zavod, enota Brno. Pravita, da za vračanje termalne vode ni posebnih pravilnikov in dovoljenja ureja administracija za upravljanje z vodami na individualni osnovi. Običajen pogoj je, da reinjekcija ne vpliva na kvaliteto podzemne vode. Testiranje vrtin ni predpisano in se presoja od primera do primera.

4.6 Islandija

Mnenje smo pridobili od dr. Juliet Newson, Iceland School of Energy, Reykjavik University.

Glede na njene izkušnje predvsem v srednje in visokotemperaturnih geotermalnih sistemih na Novi Zelandiji in Islandiji pogoj vračanja v isto hidravlično enoto velja za veliko primerov, vendar so včasih potrebne drugačne rešitve zaradi strukture rezervoarja. Namen reinjekcije je, da zagotavlja ustrezen tlak v rezervoarju in njegovo ne-prehitro

ohlajanje, zato naj strategija za reinjekcijo optimizira podporo tlaka v rezervoarju ob zmanjševanju tveganja za upad njegove entalpije (temperature).

Zahteva po reinjekciji se običajno presoja v fazi podeljevanja dovoljenj za raziskave in rabo termalne vode in od primera do primera, saj ni a priori zahtevana. V nekaj primerih so uporabniki geotermalnih vodonosnikov sami prišli do odločitve o vzpostavitvi reinjekcije, čeprav ta ni bila zahtevana s strani države, saj jim je gladine vode tako upadla, da so imeli težave z zagotavljanjem primernih količin termalne vode za delovanje sistemov rabe geotermalne energije. Drugod so jo vzpostavili, ker imajo v dovoljenju za rabo termalne vode definiran največje dovoljeno znižanje gladine podzemne vode. Spet tretjič je reinjekcija vzpostavljena zato, ker toplotno izrabljene termalne vode ne smejo vnašati v okolje (reke, morja...), kar je zopet odvisno od individualne geološko-okoljske situacije.

4.7 Italija

Mnenje je v letu 2023 podal Maurizio Guerra, Geološki oddelek ISPRA. Načeloma je reinjekcija prepovedana, razen za vračanje v isti vodonosnik za namene rabe geotermalne energije, pa še to po predhodnih raziskavah. Relevantna zakonodaja je:

- DPR 27. maj 1991, št. 395, čl. 64: Potrditev izvedbene uredbe zakona z dne 9. decembra 1986, št. 896, ki ureja raziskovanje in rabo geotermalnih virov (DPR je odlok predsednika Italijanske republike)
- Zakonodajni odlok z dne 11. februarja 2010, št. 22 (Reorganizacija zakonodaje o raziskovanju in rabi geotermalnih virov, v skladu z 28. odstavkom 27. člena zakona z dne 23. julija 2009, št. 99)

DPR 27. maj 1991, št. 395 64. Člen določa injiciranje in reinjektiranje tekočin:

1. injiciranje in reinjektiranje tekočin v iste formacije izvora ali v vsakem primeru pod podzemno vodo, ki se lahko uporabljajo v civilne in industrijske namene, odobri glavni inženir pristojnega oddelka.

2. Vlogi za pridobitev dovoljenja za injiciranje in reinjektiranje tekočin v podtalje mora biti priloženo podrobno tehnično poročilo s slikovno dokumentacijo in program nadzora, ki ga je treba izvesti zaradi varstva okolja in mineralne surovine.

3. Postopke vbrizgavanja je treba izvajati znotraj območij dovoljenj za raziskovanje ali koncesij za pridelavo, ki jih ima vlagatelj, ali v sosednjih dovoljenjih ali koncesijah s predhodnim dovoljenjem ustreznih imetnikov, z uporabo ustreznih geotermalnih vrtin.

4. Tehnično poročilo mora navajati: a) namen izvedbe; b) kemično sestavo in fizikalne lastnosti prvotnih geotermalnih tekočin in tekočin, ki jih je treba reinjektirati; c) hitrosti pretoka tekočin in tlake med injiciranjem; d) lokacijo območij, ki spadajo v vplivno polje vrtin iz odstavka 3, ter geografsko, geološko, stratigrafsko, tektonsko, seizmično in hidrogeološko karakterizacijo teh območij; e) kakršne koli državne ali prostorske omejitve, ki vplivajo na območja, vključena v postopke; f) razpoložljive informacije o sistemu kroženja podzemne vode ter o porazdelitvi temperature in tlaka v globini; g) petrofizikalne in geometrijske značilnosti ter hidravlične parametre vodonosnikov in krovnine; h) tehnični sistem za reinjekcijo, varnostno opremo in merilne instrumente; i) upravljanje in nadzor teh sistemov

5. Nadzorni program se nanaša zlasti na vrsto in pogostost nadzora tlaka reinjektiranja in značilnosti vode ali drugih tekočin, stanja vrtin, stanja in hidrodinamičnega ravnovesja ter o kakršnih koli posegih v podzemno vodo izven območja in v površinske vode ter o potresni dejavnosti in morebitnih premikih tal. Navesti je treba tudi sredstva in tehnike, ki naj bi se uporabljali za izvajanje samega nadzora.

6. Za kratkoročne postopke reinjekcije, ki v nobenem primeru ne presegajo dveh mesecev, je imetnik oproščen izvajanja pregledov v zvezi s seizmično dejavnostjo in morebitnimi premiki tal.

7. Postopki reinjektiranja morajo biti ustrezni in v skladu s tehničnimi predpisi, ki veljajo na tem področju, in s posebnimi varnostnimi ukrepi, metodami in pogoji, ki jih lahko naloži glavni inženir ob izdaji dovoljenja.

8. Za vrtanje reinjekcijskih vrtin se uporabljajo določbe 16. ali 49. člena, če se izvajajo v okviru dovoljenja za raziskovanje ali koncesije za rabo (pridelavo?).

9. Glavni inženir lahko odredi prekinitev dejavnosti po uradni dolžnosti, z obrazloženo določbo ali na zahtevo zainteresirane stranke.

10. Zoper odločitve glavnega inženirja je dovoljena hierarhična pritožba pri ministru za industrijo, trgovino in obrt, ki odloča po posvetovanju s tehničnim odborom za ogljikovodike in geotermalno energijo.

Zakonodajni odlok z dne 11. februarja 2010, št. 22 in člen 1 pravijo:

c. 3-bis. Za spodbujanje raziskav in razvoja novih geotermalnih elektrarn z zmanjšanim vplivom na okolje v skladu z 9. členom zakonodajnega odloka z dne 29. decembra 2003, št. 387 so geotermalne tekočine s srednjo in visoko entalpijo prav tako v nacionalnem interesu, katerih namen je po vsej državi preizkusiti pilotne naprave z reinjeksijo geotermalne tekočine v isti vodonosnik in v vsakem primeru z ničelnimi procesnimi emisijami, z nazivno močjo, ki ni nameščena več kot 5 MW za vsako napravo (op.p. predvidevam da električno), pri čemer skupna odobrena obveznost ne presega 50 MW; v vsakem primeru pa se za vsakega predlagatelja ne smejo odobriti več kot tri naprave, katerih nazivna moč ne presega 5 MW.

c. 10. Injeksijo in reinjeksijo geotermalnih tekočin v isti vodonosnik ali v vsakem primeru pod podzemno vodo, ki se lahko uporablja v civilne ali industrijske namene, tudi v morskih območjih, odobri pristojni organ.

4.8 Kanada

Kanada ima zelo raznoliko rabo vrtin, predvsem v industriji in rudarstvu (Government of Saskatchewan, 2018). Tudi za reinjekcijske vrtnice za vzdrževanje tlaka potrebujejo avtorizacijo pred licenco.

Vrtine na območju razvoja geotermalnih projektov morajo imeti termalni cement in cevitev, od dna do površja in vsa mesta z vodonosnimi sloji (razen pridobivalnega) morajo biti cementirana. Predpisujejo formulo za izračun najvišjega tlaka vtiskanja na ustju in karotažne meritve.

Največja skupna količina reinjecirane vode za določitev delovnih tlakov in vtiskovalnih spodobnosti vrtnice brez predhodne odobritve dovoljenjedajalca znaša 500 m³ (op.p. približno 6 dni testiranja s približno 10 l/s).

4.9 Madžarska

Na Madžarskem reinjeksija ni obvezna.

Na Madžarskem ni neposredne zakonodaje o reinjeksiji, ampak na podlagi Zakona 8 iz leta 1998 o upravljanju z vodami, vladna uredba 219/2004, aneks 4, je težko uporabljati termalno vodo brez reinjeciranja (Bálan in sod. 2018). Končna odločitev je odvisna od organa za izdajo dovoljenj (Nador, 2023). Pri tem je opredeljena življenjska doba takšnega sistema na 25 let (toplotni preboj), poudarjena pa je raba modeliranja za preprečevanje negativnih vplivov v proizvodnih vrtinah in za okolje (Bálan in sod. 2018). Večinoma so geotermalni dubleti nameščeni v vzhodnem delu države, kjer je vračanje tudi nekje do največ 60% (Rman in sod. 2019b). Trenutno je v gradnji velik sistem za rabo termalne vode v Szegedu, kjer je ob 3 črpalnih vrtinah predvidenih tudi 6 reinjekcijskih vrtin.

V preteklosti so bile številne težave z uvedbo reinjeksije. Madžarska vladna uredba iz leta 2012 (147/2010; IV.29.) o splošnih predpisih v zvezi z dejavnostmi in obrati za izkoriščanje in varstvo voda vsebuje najpomembnejše predpise v zvezi z reinjeciranjem termalnih vod (Lapanje in sod. 2011):

- 10. člen: Odvzeta termalna voda za energetske namene mora biti po njeni uporabi vrnjena v isti vodonosnik.
- 11. člen: Pri načrtovanju uporabe se je potrebno usmeriti v večnamenske (kaskadne) sisteme, prav tako je potrebno težiti k gospodarni rabi vode.
- 78. člen: Pri načrtovanju reinjeksije uredba velja za vsa izdana in podaljšanja vodna dovoljenja po 22. 12. 2012, z izjemo nosilcev vodnih dovoljenj izdanih pred njeno pravnomočnostjo. Izjeme za vzpostavitev vračanja veljajo za uporabnike vode samo v energetske namene:
 - a) ki izkoriščajo vodna telesa z dobrim kakovostnim stanjem - ti so dolžni vzpostaviti reinjeksijo do 22. 12. 2020, ter tiste b) ki izkoriščajo vodna telesa s slabim ali slabšajočim kakovostnim stanjem - ti so dolžni vzpostaviti reinjeksijo do 22. 12. 2014.

Zaradi lobiranja kmetijskega sektorja je bila leta 2012 sprejeta nova uredba o izjemah vračanja termalne vode uporabljene za energetske namene v kmetijstvu (1002/2012 (L.11.)). Ta podaljšuje časovni rok za obvezno vračanje v VT s slabim ali slabšajočim kakovostnim stanjem iz 22. 12. 2014 na 30.6.2015, tako za obstoječe kot nove uporabnike, a ne vpliva na mejnik za telesa v dobrem stanju. Sočasno bi moralo do 31.12.2012 Ministrstvo za razvoj podeželja pripraviti daljnosežni trajnostni koncept rabe termalne vode v kmetijstvu z upoštevanjem ekonomskih dejavnikov in povezanih dejavnosti ter časovnic.

Na Madžarskem s spremembo zakonodaje v l. 2013 reinjekcija ni več obvezna. V skladu s členom 15/C (KvVM rendelet – zakon o mejnih vrednostih izpustov onesnaževal v vodo in o določenih pravilih za njihovo uporabo) ni potrebno plačevati pristojbine v primeru, da se celotno količino odvzete vode vrača v isti vodonosnik pod pogojem, da vrnjena voda ne vsebuje drugačnih snovi kot odvzeta voda in tako ne ogroža kakovostnega stanja podzemne vode. Pristojbine za odvzem termalne vode samo v energetske namene se lahko zmanjšajo za znesek, ki se porabi za izgradnjo reinjekcijske vrtine v danem letu. Podpore o raziskavah in razvoju so načrtovane s strani National Research Fund. Madžarska kot država praviloma ne izvaja geotermalnih posojil, podpor, bančnih garancij, podpor (Šantl & Rojnik, 2019).

S 1. 3. 2023 je v veljavo stopilo dopolnilo Zakona o rudarstvu, ki opredeljuje nov sistem izvajanja dovoljenj za raziskovanje in rabo geotermalne energije (Nador, 2023). Vse raziskave in pridobivanje geotermalne energije (ne glede na uporabljeno proizvodno tehnologijo in globlje od 150 m) mora odobriti rudarski organ (razen pri rabi za balneologijo in kmetijstvo - rastlinjaki). Tako ni več klasičnih koncesij, ampak se gleda pobude razvijalcev projektov, za kar so že prejeli več kot 70 vlog. Postopek je takšen: Razvijalci geotermalnih projektov vložijo pobudo, ki jim omogoča izključno pravico za raziskovanje v obdobju 4 let na največ 4 raziskovalnih blokih s površino največ 400 km²/blok. Zahtevano je finančno jamstvo, predložiti je treba podroben program raziskovanja. Po končanju faze raziskovanja se rudarskemu organu predloži končno poročilo o raziskavah in določi geotermalno zaščiteno območje okrog proizvodnih in reinjekcijskih vrtin na podlagi dovoljenih največjih temperaturnih in tlačnih sprememb. To območje mora zagotavljati proizvodnjo geotermalne toplote za 25 let in v 3D prostoru se z matematičnim modelom opredeli, kjer je sprememba temperature manjša od 1 °C ter hidrostatskega tlaka manj kot 0,2 bar. V tretji fazi se sklene pogodba o rabi geotermalne energije, kjer se predpiše način uporabe vode in vodonosnika, pogodbeno letno proizvodnja toplote in pogoje za reinjekcijo. Raba se dovoli največ za 35 let (s podaljšanjem za dodatnih 17,5 let).

Nov sistem ni idealen, saj omogoča prednost prvega prosilca in povzroči prekrivanje ciljnih raziskovalnih območij. V prvi fazi raziskav soglasje občine ali lastnika zemlje ni potrebno. V primeru da se posega na območje koncesije za pridobivanje ogljikovodikov, je potrebno pridobiti soglasje koncesionarja. Še vedno tudi potrebujejo soglasje direktorata za vode zaradi možnega vpliva na vire podzemne vode. Ni jasno, kako bodo postopali, če geotermalno zaščitno območje ne bo znotraj raziskovalnega »bloka«. Razmišljajo, kako naj zaščitijo obstoječe uporabnike termalne vode. Ena možna rešitev je, da določijo najmanjšo razdaljo med vrtinami ali pa, na primer, da nov uporabnik ne sme znižati kapacitete obstoječega za več kot 10%.

4.10 Nemčija

V Nemčiji (podatek za deželo Bavarsko) je reinjeciranje toplotno izrabljene termalne vode pri novih rabah in povečevanju kapacitet obvezno po Zveznem rudarskem zakonu, razen za termalne vode, ki se uporabljajo za balneologijo, predvsem zaradi uporabe majhnih količin vode in mikrobiološke oporečnosti vode.

Glede na pridobljene podatke je v Nemčiji do leta 2012 obstajal sistem podpor: državne subvencije za delovanje elektrarn (urejeno z zakonodajo s področja o obnovljivih virih), program tržnih spodbud – program za sofinanciranje globokega vrtanja za sisteme reinjeciranja (>hydrothermal doublets<) in ugodno kreditiranje za zavarovanje tveganj v fazi raziskav novih virov (Šantl & Rojnik 2019).

4.11 Nizozemska

Na Nizozemskem je ob rabi geotermalne energije (torej za pridobivanje toplote) reinjekcija obvezna.

4.12 Poljska

Po informacijah Monike Koniecznyńska iz Poljskega geološkega inštituta v letu 2023 Zakon o vodah na Poljskem dovoljuje reinjekcijo slanic, termalnih in zdravilnih voda. Tudi vode iz rudnikov se lahko reinjecirajo in vsi postopki se postopki izvajajo po Geološkem in Rudarskem zakonu. Vsi trije zakoni se močno prepletajo. Dodatno se pri rabi energije povezuje še Energetski zakon, v katerem pripravljajo tudi člene za podzemno skladiščenje energije in ogljikovega dioksida.

V praksi se reinjekcijski preizkusi načrtujejo med izvedbo raziskovalnih geoloških del, o čemer se pripravi tudi poročilo in na njegovi podlagi zaprosi za koncesijo. Reinjekcija oziroma geotermalni dubleti niso a priori predpisani. Poročajo, da imajo od šestih sistemov daljinskega ogrevanja le trije vzpostavljeno reinjekcijo.

4.13 Slovaška

Na Slovaškem reinjekcija ni obvezna.

V uredbah republike Slovaške je omenjeno, da je reinjeciranje geotermalne vode urejeno v skladu z Okvirno vodno direktivo. Preučitev možnosti reinjekcije v medzrnske vodonosnike je bila izvedena že v 1980-ih, čeprav se reinjekcija v takšno okolje ne uporablja (Šantl & Rojnik, 2019). Reinjeciranje se izvaja na območju Podhajske v razpokane karbonatne kamnine, v zadnjih letih so nekaj reinjekcijskih vrtin na Slovaškem izvirtale tudi slovenske firme.

Reinjekcijo lahko izvajajo na podlagi Zakona o vodah 364/2004 in dovoljenja regijske okoljske agencije, ki mora podati tudi mnenje, v kolikor se vodi dodaja inhibitor. Njeno izvajanje pa se dotika tudi Geološkega zakona. Napredovanje toplotnega čela je potrebno oceniti z modeliranjem. Testiranje vrtin mora biti izvedeno v trajanju več kot 21 dni z oceno vpliva na sosednje vrtine. Predpisan je tudi monitoring reinjekcijskih vrtin (Lapanje in sod. 2011).

Zahteva po reinjekciji izhaja iz poznavanja zgradbe in lastnosti geotermalnega vodonosnika.

Finančna podpora za uvedbo ponovnega reinjeciranja za nova in obstoječa mesta izkoriščanja ni na voljo (Šantl & Rojnik, 2019).

4.14 Švica

Podatke za Švico nam je sporočil Luca Guglielmetti, Univerza v Ženevi, UNIGE, Section of Earth and Environmental Sciences.

V Švici prevladuje raba plitve geotermalne energije, zato je zakonodaja prilagojena rabi geotermalnim toplotnim črpalkam. Švicarska zakonodaja temelji na Zveznem zakonu za zaščito voda (Federal Ordinance on Water Protection; OEaux, priloga 2, poglavje 21, odstavek 3), ki pravi: Vtiskanje ali odvzem toplote ne sme spremeniti naravne temperature površinske ali podzemne vode za več kot 3 stopinje. V dodatnih pojasnilih iz leta 2009 je zvezna pisarna za okolje (Federal Office for the Environment, FOEN) to interpretirala, kot da je 3 °C največja dovoljena sprememba znotraj polmera 100 m od reinjekcijske vrtine. Takšen pristop je podrobno opisan v standardu SIA 384/7:2015 (Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine), ki določa: Razlika temperature med podzemno vodo v vodonosniku in naravno sezonsko temperaturo večjega območja (na polmeru 100 m) ne sme presegati 3 K, dovoljeno pa je kratkotrajno preseganje razlike 10 K (SIA, 2015). Kadar razlika temperatur med črpalno in reinjekcijsko vrtino preseže 10 K, je potrebno podrobno raziskati naravo podzemne vode. Čeprav ni izrecno napisano, je ta sprememba 3 K na razdalji 100 m v splošnem sprejeta kot modelirana po 30 letih delovanja sistema. SIA 384/7:2015 določa, da mora biti v odvisnosti od toka podzemne vode izračun narejen sezonsko ali dolgoročno, za celotno življenjsko dobo sistema rabe. Ta standard izrecno izključuje sezonsko skladiščenje toplote ali hladu in podzemne vode s temperaturo nad 25 °C. V nekaterih kantonih, npr. Zurichu, so lahko postopki priznavanja nekoliko drugačni. Npr. v primeru ogrevanja stavb dovoljujejo lokalne razlike temperature do 7 K za ohlajanje podzemne vode (FOEN, 2017). Reinjekcijska strategija je prepuščena kantonom. FOEN v poglavju 5.3 v priporočilih svetuje ponikanje v nenasičeno cono zaradi pufrskega termalnega učinka, v aneksu D pa v nasičeno cono podzemne vode, da se izogne stiku z zrakom in zato fizikalno-kemijskim spremembam vode. Bolj natančno, izbira tipa reinjekcijske strategije dejansko pogojuje z lokalnimi pogoji in zato zahtevami dovoljenjedajalca. Po informacijah Univerze v Baslu v letu 2024 se trenutno pripravlja študija, če, kje in pod kakšnimi pogoji bi lahko ta kriterij dovoljene spremembe 3 °C v prihodnosti spremenili.

Trenutno izmed globljih projektov s termalno vodo po slovenskem pojmovanju deluje le projekt za daljinsko ogrevanje mesta Riehen. Dublet iz leta 1989 je bil razvit še pred temi pogoji za plitvo geotermijo (± 3 K na razdalji 100 m), zato je temperaturna razlika med 1550 m globoko črpalno vrtino in 1250 m globoko reinjekcijsko vrtino pozimi tudi do 40 K (<http://www.erdwaermeriehen.ch/de/geothermie/index.php>). Tako pridobijo približno 15 GWh/leto energije, kar pomeni prihranek izpustov reda velikosti 3000 ton CO₂ na leto, kar je ekvivalent skoraj 1 milijonu litrov kurilnega olja na leto. Trenutno želijo razširiti projekt na 25 GWh/leto za popolno zamenjavo plina, kar bi rezultiralo v prihranku 5000 ton CO₂ na leto.

Načrtujejo velik razvoj energetske raba podzemne (termalne) vode, saj omogoča nadomeščanje fosilnih goriv in omejevanje podnebne segrevanja, zato se trudijo prilagoditi zakonodajo tudi globljim projektom in bolj prilagodljivim mejnim pogojem, kot je (± 3 K na razdalji 100 m). Zaenkrat je presoja za vsak globlji projekt izvedena individualno in podvržena zakonodaji posameznega kantona. Smernic za reinjekcijo nimajo, niti nimajo predpisane najmanjše razdalje med vrtinami.

4.15 Združene države Amerike

Reinjekcijske vrtine v ZDA nadzoruje Underground Injection Control (UIC) program, ki je namenjen zaščiti virov podzemne pitne vode. Izvajajo ga posamezne države ali pa agencija za zaščito okolja ipd. (EPA, 2020). Tipe reinjekcijskih vrtin delijo na 6 razredov (Class I do VI), ki se razlikujejo po namenu:

- Razred I: vračanje nevarnih in nenevarnih odpadkov (komunalni, industrijski in radioaktivni odpadki) v globoke zaprte geološke formacije pod viri podzemne pitne vode.
- Razred II: vračanje tekočin, vezanih na proizvodnjo nafte in plina. Načeloma ne za hidravlično frakturiranje.
- Razred III: vračanje tekočin, ki nastajajo pri pridobivanju mineralov (urana, soli, bakra, žvepla).
- Razred IV: vračanje obdelane vode ob sanaciji okolja, vrača se nevarne in radioaktivne odpadke v ali nad vire podzemne vode.
- Razred V: Vsi objekti, ki niso uvrščeni v razrede 1-4 in 6, 23 podtipov. Večinoma za gravitacijsko ponikanje nenevarnih tekočin, npr. meteorne vode, hišnih odpadnih voda, industrijskih odpadkov, KČN, slanic in druge preprostejše rabe v primerjavi z razredi I do IV. Ponikanje običajno poteka neposredno v vodonosnik pitne vode ali nenasičeno cono nad njim. Tudi vrtine za plitvo geotermijo, globlje vrtine za pridobivanje in skladiščenje geotermalne energije ter proizvodnjo geotermalne elektrike.
- Razred VI: vtiskanje CO₂ v geološke formacije za dolgotrajno skladiščenje.

Skog (2019) poroča, da je v ZDA reinjekcija načeloma zahtevana, vendar vsaka posamezna zvezna država določi svoje zakonodajno okolje in pravila.

5 Predlog meril za priznavanje reinjekcijske vrtine v Sloveniji

5.1 Pobuda za priznavanje reinjekcijske vrtine

Koncesionar naj koncendentu (MNVP) pošlje pobudo za priznavanje reinjekcijske vrtine, kateri priloži *hidrogeološko poročilo* o njenem testiranju. V kolikor gre za spremembo namembnosti obstoječe vrtine, je potrebno hidrogeološkemu poročilu priložiti tudi *poročilo o tehničnem stanju vrtine*.

Po dogovoru med MNVP in pobudnikom je možno presoditi načrt izvedbe hidrogeoloških raziskav še pred njihovo izvedbo.

Hidrogeološko poročilo naj bo zasnovano enako kot za Pobudo za pridobitev koncesije za rabo podzemne vode. V kolikor so zahtevane vsebine že opisane v hidrogeološkem poročilu, ki je bilo osnova za sprejetje uredbe o koncesiji za proizvodno vrtino za termalno vodo, poglavij ni potrebno ponavljati. Naredi se lahko sklic na osnovno

poročilo in doda le nove ugotovitve, ki so relevantne za novo reinjekcijsko vrtino in presojo njenih lastnosti in ustreznosti.

Poudarek naj bo na naslednjih vsebinah: Predmet koncesije, Izvor zajete podzemne vode, Opis izvedbe zajetja, Kakovost vode, naravno (izvirno) stanje, Problematika povezana z različno uporabo zajete podzemne vode (opis podrobnosti oziroma razlik glede na naravno stanje vodonosnika ter opredelitev do možnih kemijskih procesov zaradi vtiskanja tako v vrtini kot v vodonosniku), Izdatnost vodonosnega sloja (opis vseh testiranj, tako črpalnih kot vtiskovalnih idr. in opis ničelnega stanja), Izdatnost zajetja (tako za črpanje kot za vtiskanje in z določitvijo največje trenutne količine in predvidene skupne letne količine rabe) in Program monitoringa. Dodati je potrebno tudi opis tehnološkega postopka od proizvodne do reinjekcijske vrtine, vključno s shematskim prikazom tehnološkega postopka in merilnimi mesti za monitoring sistema; podatke o dodatnih snoveh, ki se lahko pojavljajo v tehnološkem postopku ali o tehnologijah, ki se uporabljajo za na primer preprečevanje rasti bakterij v cevovodu, ter mesta obstoječih objektov, na katera bi delovanje nove vrtine lahko imelo vpliv. V poročilu naj se opredeli tudi do režima delovanja dubleta v normalnem scenariju ter ob izpadu ali okvari delovanja sistema oziroma ob izrednih razmerah (kam se v tistem primeru odvaža odpadno vodo), ter do hidravličnega, temperaturnega in hidrogeokemičnega vpliva in obsega vplivnega območja vsaj za obdobje, za katerega se zaproša za podelitev koncesije.

5.2 Merila za priznavanje reinjekcijske vrtine

Čeprav ima reinjekcija običajno več namenov, je z vidika upravljanja z viri podzemne vode pomembno predvsem, ali vpliva na stanje okolja in možnosti rabe geotermalnega vodonosnika lokalno ali regionalno.

5.2.1 Namen izvajanja reinjekcije

Reinjekcija je smiselna, v kolikor je to edini način, ki lahko prepreči površinsko onesnaževanje tal in površinske vode (reke, jezera) ter plitve podzemne vode, ki se lahko celo uporablja za vodooskrbo.

Reinjekcija se lahko izvaja tudi ali predvsem zaradi podpore vodni bilanci posamezne lokacije ali regionalnega vodonosnika, ki ga rabi več uporabnikov.

Reinjekcija je prioriteta na območjih, kjer je trend znižanja gladine podzemne vode bolj izrazit, na čezmejnih / regionalnih vodonosnikih, in sploh takšnih, ki jih uporablja več uporabnikov in bo s tem mogoče povečati število uporabnikov geotermalne energije. Reinjekcija je možna le v primeru rabe termalne vode le za toploto in hlad.

Reinjekcija na območju z naravnimi geotermalnimi pojavi (npr. izviri termalne vode) je lahko razmeroma tvegana z vidika prehitrega iztoka vtiskane vode nazaj na površje, a hkrati lahko podpira obstoj teh izvirov in vzdrževanje posebnih ekosistemov, v kolikor je ustrezno načrtovana in spremljana.

O namenu reinjekcije se presoja glede na podatke o stanju geotermalnih vodonosnikov (podatki ARSO-MOP, rezultati letnih poročil o obratovalnem monitoringu koncesionarjev itd.) ter izražen namen s strani pobudnika za priznavanje reinjekcijske vrtine.

5.2.2 Varnost vrtine in delovanja sistema

Reinjekcijska vrtina ne sme predstavljati tveganja za okolje in varnost ljudi. Tveganje za okolje se lahko odraža kot tveganje za povezavo več vodonosnikov znotraj ali ob vrtini, za nekontrolirano iztekanje (arteške) vode ali plina iz ali ob vrtini in za nezaščitenost ustje, kar je tvegano tudi za varnost ljudi, in možnost onesnaženja vodonosnika in podobno.

O varnosti vrtine se presoja na podlagi poročila o tehničnem stanju vrtine, v kolikor gre za obstoječo vrtino, oziroma projekta izvedenih rudarskih del, v kolikor gre za novo vrtino z dovoljenjem za raziskave.

Delovanje celotnega sistema rabe mora biti kontrolirano (monitoring vseh vrtin in površinskega sistema), delovni in mejni pogoji (tlaki in temperature) sistema pa natančno določeni, prav tako protokoli v primeru njihovega do-/preseganja.

5.2.3 Tehnična izvedba vrtine

V smernicah so podani predlogi, kako naj se pristopi k izdelavi kvalitetne reinjekcijske vrtine. V praksi se lahko uporabijo tudi manj optimalne rešitve, na primer obstoječe vrtine ali vrtine z majhno vtiskovalno sposobnostjo, v koliko to dopušča njihovo tehnično in varnostno stanje. Ta odločitev je stvar odločitve in ekonomske analize uporabnika.

Kot merilo za priznavanje reinjekcijske vrtine lahko s tehničnega vidika postavimo le pogoj, da je tehnično stanje vrtine poznano in je vrtna varna in ustrezno pregledana in poznano njeno začetno tehnično in hidravlično stanje.

O tehnični izvedbi vrtine se presoja na podlagi poročila o tehničnem stanju vrtine, v kolikor gre za obstoječo vrtino, oziroma projekta izvedenih rudarskih del, v kolikor gre za novo vrtino z dovoljenjem za raziskave.

5.2.4 Hidravlične lastnosti objekta

V smernicah je podan priporočen nabor hidrogeoloških testiranj reinjekcijske vrtine, ki mora biti smiselno prilagojen lokalnem konceptualnem modelu geotermalnega vodonosnika in stanju raziskav oziroma razvoja projekta dubleta.

Rezultati testiranj morajo podati vse relevantne hidravlično-geotermične lastnosti vrtine in vodonosnika, kot so na primer debelina vodonosnika, hitrost in smer toka podzemne vode, koeficient prepustnosti, transmisivnost, izdatnost in injektibilnost pri različnih pogojih pretoka in /ali tlaka, optimalna in največja priporočena količina črpanja in vtiskanja, tlačni in temperaturni gradienti, vplivni radij, hidravlična povezava med obstoječimi vrtinami in izviri ter pričakovan vpliv na njih, simulacija hidravličnega in temperaturnega polja ob koncu življenjske dobe dubleta ipd. S tem mora biti moč oceniti trenutno kapaciteto vrtine za dani namen in hidrogeološke in geotermične pogoje v vodonosniku.

Seveda se zanesljivost podatkov izboljšuje z nadaljevanjem raziskav oziroma časovnim razvojem projekta.

O hidravličnih lastnostih vrtine se presoja na podlagi hidrogeološkega poročila. Kot merilo za ustrezne lastnosti se prevzame, da mora reinjekcijska vrtna posegati v isti vodonosnik, iz katerega se pridobiva termalna voda, ki se bo vračala, ter izkazovati ustrezno hidravlično povezanost s proizvodnimi vrtinami.

5.2.5 Možnost iztoka reinjecirane vode na površje

Še posebno v primeru plitvejših reinjekcijskih vrtin oziroma takšnih v razpoklinskih conah z naravnimi termalnimi izviri mora biti testirana in ocenjena možnost iztoka reinjecirane vode na površje oziroma v plitvejše vodonosnike s hladno vodo. Tukaj ne moremo podati natančnih metodoloških navodil, saj je način (npr. sledilni preizkus s soljo, temperaturnim oblakom...) in trajanje preizkusa (ure do nekaj dni) potrebno prilagoditi lokalnem konceptualnem modelu geotermalnega vodonosnika.

O možnosti iztoka reinjecirane vode na površje se presoja na podlagi hidrogeološkega poročila. Kot merilo za ustreznost reinjekcijske vrtine se prevzame, da se vtiskana termalna voda ne pojavi v plitvejših vodonosnikih s hladno vodo ali termalnih izviri.

Slednje je potrebno ugotavljati tudi ves čas delovanja reinjekcije, z ustreznim obratovalnim monitoringom.

5.2.6 Vzdrževanje kvalitete vode v vodonosniku

Z vidika ohranjanja enakega kakovostnega stanja v geotermalnem vodonosniku je smiselno, da se reinjecirana voda od proizvedene ne razlikuje za več kot 20% in so podane ocene za tveganje neželenih fizikalno-kemijskih procesov v vodonosniku (obarjanje, korozija...). Smiselnost uporabe tega kriterija je lahko pogojena tudi z namenom reinjekcije in vrsto geološke formacije, v katero se voda vrača, zato se o njej smiselno presojati od primera do primera.

O primernosti reinjecirane vode se presoja na podlagi rezultatov interpretacije kemijske in izotopske sestave vode v hidrogeološkem poročilu.

5.2.7 Način delovanja dubleta

V pobudi za priznavanje reinjekcijske vrtine je potrebno opisati način običajnega in ekstremnega delovanja para proizvodno-reinjekcijske vrtine (režim delovanja ob običajni proizvodnji ter ob na primer napakah/izpadih sistema, spremembe količine in temperature reinjeciranja vode ob različnih režimih delovanja, npr. sezonskost,...) in predlaganega monitoringa delovanja sistema. Z analitičnimi in matematičnimi modeli je potrebno določiti hidravlični in temperaturni vpliv delovanja sistema skozi in ob koncu življenja dobe dubleta.

O primernosti načrtovanega načina delovanja dubleta na površje se presoja na podlagi hidrogeološkega poročila. Kot merilo za ustreznost reinjekcijske vrtine se prevzame, da ta v času pričakovane življenjske dobe ne bo povzročila neželenega vpliva na obstoječe proizvodne objekte in okolje (npr. naravni izviri).

5.2.8 Največja trenutna količina vtiskanja

Želena kapaciteto reinjekcijske vrtine lahko vežemo na njeno proizvodno zmogljivost. Odvisna je od tehnične zasnove vrtine, tipa vodonosnika, hidravličnega stanja v vodonosniku, temperature vtiskane odpadne termalne vode in drugih parametrov. Kot se v primeru proizvodnih vrtin v uredbah uporablja parameter »največja dovoljena trenutna prostornina (količina) rabe vode iz vrtine v l/s«, v primeru reinjekcije predlagamo podobno - največjo trenutno količino vtiskanja, ki označuje največjo priporočeno prostornino (količino) vode v l/s, ki jo je na podlagi testiranj možno aplicirati pri posameznih tlakih na ustju vrtine.

Kot minimalni kriterij za uspešno reinjekcijsko vrtino predlagamo, da največja trenutna količina vtiskanja znaša vsaj 40% največje dovoljene trenutne prostornine (količine) rabe. Dodatno klasificiramo vrtino kot bolj uspešno, če je sposobna sprejemati vsaj 60% navedene količine, in zelo uspešno, ko je ta vrednost vsaj 80%.

Pri tem se koncept načrtovanja sistema rabe geotermalne energije spremeni, obrne na glavo. Kajti v kolikor se načrtuje dublet - ena proizvodna in ena reinjekcijska vrtina, to sploh v primeru peščenih vodonosnikov, kot so v rabi v SV Sloveniji, pomeni, da bo potrebno sistem rabe dimenzionirati glede na lastnosti reinjekcijske vrtine in ne na proizvodno kapaciteto, kot se je izvajalo do sedaj.

5.2.9 Letna količina vtiskanja

Zaradi prilagajanja trenutne proizvodne količine aktualni potrebi po geotermalni energiji lahko dejanska trenutna količina vtiskanja skozi leto razmeroma niha oziroma se jo deloma kompenzira z uporabo zalogovnikov in podobnih tehničnih rešitev. Zato za oceno uspešnosti reinjekcije predlagamo tudi kriterij skupne letne količine vtiskanja (m^3 /leto). Ta označuje vso količino termalne vode, ki se je v danem letu reinjecirala nazaj v vodonosnik.

Novo reinjekcijsko vrtino lahko ocenimo kot učinkovito, v kolikor uspemo vtisniti vsaj 80% letno pridobljene količine vode iz nanjo vezane proizvodne vrtine dubleta. Za nenamensko izdelane in preurejene reinjekcijske vrtine, na primer preurejene črpalne ali opuščene naftne vrtine, predlagamo pol manjšo vrednost, torej 40% letne pridobljene količine vode iz nanjo vezane proizvodne vrtine dubleta.

5.2.10 Kriteriji za uspešnost reinjekcije

Oceno potrebe po reinjekciji smo do sedaj izvedli regionalno, za regionalni in čezmejni geotermalni vodonosnik v Murski formaciji v SV Sloveniji. Analiza obremenitev za NUV III (Cerar in sod. 2020) vsebuje informacijo, da bi se morala vračati vsa načrpana količina te termalne vode nad 1,8 milijona m^3 na leto, kar trenutno pomeni približno 700.000 m^3 na leto. Analiza možnosti po lokacijah glede na količino rabe vode le za ogrevanje je bila izvedena v letu 2015 (Rman in sod.), vendar s tehničnega vidika ni relevantna za razvoj tega kriterija.

Kriterije za uspešnost reinjekcije je težko enoznačno določiti, saj so odvisni od številnih parametrov in kombinacija tehničnih sposobnosti reinjekcijske vrtine in ocene stroškov delovanja oziroma ekonomičnosti dubleta. Zato je vedno nujna tudi presoja posameznega projekta.

Predlagamo devet kriterijev za oceno ustreznosti reinjekcijskih vrtin.



Če je vrtina manj uspešna z vidika doseganja ciljev največje trenutne količine vtiskanja in letne količine vtiskane vode, to ne pomeni, da se vode ne sme vračati, le ekonomičnost bo imela slabši izplen, kar pa ni stvar strokovne hidrogeološke presoje.

V primeru odstopanj do predlaganih kriterijev/ vrednosti je potrebno predlog ustrezno utemeljiti.

Preglednica 2: Pregled kriterijev za oceno ustreznosti reinjekcijske vrtine

Št.	Kriterij	Ustrezna reinjekcijska vrtina
1	Namen	Jasen namen in cilji reinjekcijske vrtine
2	Varnost vrtine in delovanja sistema	Vrtina in sistem rabe sta ne predstavljata tveganja za okolje in ljudi
3	Tehnična izvedba vrtine	Tehnično stanje vrtine je poznano in ustrezno, da bodo doseženi cilji vrtine in zagotovljena varnost delovanja
4	Hidravlične lastnosti objekta	Testirani in poznani so vsi potrebni hidrogeološki in geotermični parametri, ki vplivajo na delovanje sistema
5	Možnost iztoka reinjecirane vode na površje	Te možnosti glede na testiranje in/ali strokovno oceno ni
6	Vzdrževanje kvalitete vode v vodonosniku	Reinjecirana voda se od proizvedene ne razlikuje za več kot 20% in podane ocene tveganja neželenih fizikalno-kemijskih procesov.
7	Način delovanja dubleta	Opisani so različni scenariji delovanja, jasen je monitoring sistema, vrtina skozi pričakovano življenjsko dobo ne bo povzročila neželenega vpliva na obstoječe proizvodne objekte in okolje
8	Največja trenutna količina vtiskanja	Minimalna največja trenutna količina vtiskanja znaša vsaj 40% proizvodne kapacitete vrtine. Še bolj uspešna vrtina je sposobna sprejemati vsaj 60% proizvodne kapacitete vrtine in zelo uspešna vsaj 80%.
9	Letna količina vtiskanja	Skupna letna vtiskana količina v namensko reinjekcijsko vrtino je vsaj 80% letne pridobljene količine iz nanjo vezane proizvodne vrtine dubleta ter vsaj 40% te vrednosti za nenamenske (preurejene) reinjekcijske vrtine.

6 Viri

Bălan, L.L., Bobovečki, I., Gyöpös, P. in sod. 2018: D.5.5.1. Regulatory frameworks in DARLINGe partner countries. Poročilo projekta DARLINGe, 15 str.

Cerar, S. in sod. 2020: Priprava strokovnih podlag in strokovna podpora izvajanju vodne direktive (direktiva 2000/60/ES) na področju podzemnih voda - Posodobitev prikaza človekovega delovanja na stanje podzemnih voda vključno z analizo obremenitev in oceno verjetnosti doseganja okoljskih ciljev (OVDOC). GeoZS, Ljubljana.

Črepinšek J. 2016: Poročilo o izvedbi in testiranju ponikalnih vrtin za Dom starejših občanov Polde Eberl Jamski v Izlakah. GIH, geologija in hidrogeologija.

EPA, 2020: Underground Injection Control Program Protecting underground sources of drinking water and public health. EPA 816F19005 April 2020. https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/uic_fact_sheet.pdf in <https://www.epa.gov/uic/general-information-about-injection-wells>

Government of Saskatchewan, 2018: Disposal and Injection Well Requirements Directive PNG008. Linked to The Oil and Gas Conservation Regulations, 2012.

Kraljić, M., Lisjak, L., Kevrić, R., Torhač, E., Vižinitin, G., Vukelić, Ž., Supovec, I., Tancar, M., 2004: Hidrogeološka koncesija Naravni park Terme 3000 Moravske Toplice. Nafta Geoterm, Lendava.

Lapanje, A., Prestor, J. in sod. 2011: Overview of EU, national and regional legislation. Poročilo projekta TRANSENERGY, 111 str.

Lapanje, A., Benček, R., Rman, N., Bizjak, M., Matoz, T. 2019: Strokovni predlog ravnanja z objekti za rabo mineralne, termalne in termomineralne vode po prenehanju rabe. Priloga poročila Priprava strokovnih podlag za Uredbe o koncesijah za rabo podzemne vode – leto 2019. GeoZS, Ljubljana.

Mathiesen, T., Braüner Nielsen, J., Shoeibi Omrani, P. in sod. 2021: PERFORM - Best practice for geothermal plants to minimize scaling and corrosion. PERFORM-D4.01. GEOTHERMICA – ERA NET, HORIZON 2020 project. <https://www.geothermperform.eu/wp-content/uploads/2021/11/Best-practice-guide-for-geothermal-plants-to-minimize-scaling-and-corrosion.pdf>

Miljnleff, H.F., Obdam, A.N.M., van Wees, J.D.A.M., Pluymaekers, M.P.D., Veldkamp, J.G. 2014: DoubletCalc 1.4 manual English version for DoubletCalc 1.4.3. TNO report, TNO 2014 R11396. TNO, Utrecht, The Netherlands, 54 pp. <https://www.nlog.nl/en/tools>

MOP, 2016: Program ukrepov upravljanja voda na podlagi prvega odstavka 57. člena Zakona o vodah (Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 –ZZdl–A, 41/04 –ZVO–1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14 in 56/15); https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Voda/NUV/13ce67fe7a/program_ukrepov_upravljanja_voda.pdf

Mozetič, S., Matoz, T., Lapanje, A., Rman, N. 2020: Geofizikalne meritve v vrtinah - Karotažne meritve. GeoZS, Ljubljana. https://www.geo-zs.si/?option=com_content&view=article&id=765

Nador, A., 2023: Licencing deep geothermal projects in Hungary. GEEG webinar (<https://www.youtube.com/watch?v=CcrR3rkmQv4>).

Nafta Geoterm, 2013: Vrtina Sob-4g, predstavitev rezultatov: Lendava.

NZS 2403:2015 : Code of practice for deep geothermal wells, Superseding NZS 2403:1991. Standards New Zealand, Wellington, 188 str.

Rivera, J. 1995: Course on Injection Technology. WGC'95 Pre-Congress Course. IGA and CNR International School of Geothermics, Pisa, Italy, 174 str.

Rman, N., Prestor, J., Lapanje, A. 2015: Priprava strokovnih podlag in strokovna podpora pri izvajanju vodne direktive za področje podzemnih voda (Direktiva 2000/60/EC); Ukrep DUPPS8.6: Prepovedi, pogoji in omejitve rabe vode iz termalnih vodonosnikov, a) strokovna podlaga za strateški načrt vračanja vode in ustavitev neugodnih trendov - ukrep 1, b) strokovna podlaga za načrt spodbud - ukrep 2. GeoZS, Ljubljana.



Rman, N., Lapanje, A., 2021: Priprava strokovnih podlag za Uredbe o koncesijah za rabo podzemne vode – leto 2020. Priloga 2: Strokovni predlog ustreznih izvedbe reinjekcijskih vrtin in meril za priznavanje reinjekcije – dopolnjeno poročilo. GeoZS, Ljubljana.

Rman, N., Lapanje, A., Meglič, P., Prestor, J., Vengust, A. 2019a: Priprava strokovnih podlag za Uredbe o koncesijah za rabo podzemne vode – leto 2019. GeoZS, Ljubljana.

Rman, N., Szocs, T. in sod. 2019b: D.7.1.1 Summary report on the results of benchmark evaluation for the 3 pilot areas with transboundary comparison and transnational evaluation. Poročilo projekta DARLINGe, 19 str.

Rman, N., László Ádám, L., Szanyi J., Marković, T., Medgyes, T., Lapanje, A. 2019c: Reinjection of thermal water. DARLINGe project. http://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_public/0001/36/f83aa7759da72fbc06d4a7d62602fb77da1c3bf8.pdf

Rogelj, J., Rogelj, J., Karahodžič, M., Kmetec, V. 2016: Hidrogeološko poročilo o rezultatih izvedbe reinjekcijskega preizkusa v vrtini Sob-4g Murska Sobota. Geo-Hidro d.o.o., Preserje.

Serianz, L., Rman, N., Brenčič, M. 2020: Step-drawdown tests in exploitation wells for thermal and mineral water – Case study from Slovenia. Geologija 63/2, 281 – 294. <https://www.geologija-revija.si/index.php/geologija/article/view/1789/1856>

Skog, G. 2019: Current Status and Future Outlook of Geothermal Reinjection: A Review of the Ongoing Debate. Independent Project at the Department of Earth Sciences, Uppsala Universitet. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1318180/FULLTEXT01.pdf>

Szanyi, J., Medgyes, T., Kóbor, B., Pál-Molnár, E. 2015: Technologies of reinjection into sandstone reservoirs, Best Practices, Case Studies. Institute of Geosciences, University of Szeged, Szeged, Hungary, 156 str.

Šantl, S., Rojnik, A. 2019: Strokovne podlage s primerjalno analizo pravnih ureditev na področju emisij snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode zaradi posebne rabe vode za potrebe kopališč, ogrevanje in podobno, če se rabi termalna ali termomineralna voda. IZVRS, Ljubljana.

University of Szeged, 2013: Reinjection to sandstone reservoirs technology showcase, D5.3 – Draft version. GeoCom – FP7 CONCERTO – 239515. Poročil projekta Geothermal Communities.

Vukelič, Ž., Kraljič, M., and Dervarič, E., 2013, Lendava - The first geothermal city in Slovenia, 5th Balkanmine: Ohrid, Macedonia, 1-12.

Zarrouk, S. J., McLean, K. 2019: Geothermal Well Test Analysis: Fundamentals, Applications and Advanced Techniques, 1st Edition. Academic Press, India, 349 str.