

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**LIKVIDACIJA NAFTNO-PLINSKIH VRTIN NA ŠIRŠEM
OBMOČJU LENDAVE MED LETI 1999 IN 2008**

ŠPELA ZMRZLIKAR

VELENJE, 2026

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**LIKVIDACIJA NAFTNO-PLINSKIH VRTIN NA ŠIRŠEM
OBMOČJU LENDAVE MED LETI 1999 IN 2008**

ŠPELA ZMRZLIKAR

Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentor: doc. dr. Franc Žerdin

Somentor: dr. Miran Veselič

VELENJE, 2026

Številka: 727-3/2026-2

Datum: 2. 3. 2026

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

Študentka Fakultete za varstvo okolja **Špela Zmrzlikar** lahko izdela magistrsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Ekološka sanacija naftno plinskih vrtin na širšem območju Lendave med letoma 1999 in 2008

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku:

Environmental rehabilitation of oil and gas wells in the wider Lendava area between 1999 and 2008

Mentor: **doc. dr. Franc Žerdin**

Somentor: **prof. dr. Miran Veselič**

Magistrsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat FVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.



Prof. dr. Boštjan Pokorny

dekan



Fakulteta za varstvo okolja

Trg mladosti 7 | 3320 Velenje

t: 03 898 64 10 | e: info@fvo.si

www.fvo.si



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Špela Zmrzlikar, vpisna številka 34230024, študentka podiplomskega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtorica magistrskega dela z naslovom:

LIKVIDACIJA NAFTNO-PLINSKIH VRTIN NA ŠIRŠEM OBMOČJU LENDAVE MED LETI 1999 IN 2008,

ki sem ga izdelala pod mentorstvom doc. dr. Franca Žerdina in somentorstvom prof. dr. Mirana Veseliča.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili FVO;
- so vsa dela drugih avtorjev, navedena seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili FVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na FVO;
- je diplomsko delo jezikovno lektorirano in da je delo lektorirala dr. Petra Kunc;
- dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani FVO;
- sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični.

V Velenju, dne _____

Podpis avtorice _____

ZAHVALA

Ob zaključku magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju **doc. dr. Francu Žerdinu** za strokovno vodenje, podporo, usmeritve, konstruktivne pripombe ter pripravljenost deliti svoje bogato znanje in izkušnje. Posebno se mu zahvaljujem za pomoč pri navezovanju stikov s strokovnjaki, ki so s svojim znanjem pomembno prispevali k raziskovalnemu delu.

Posebna zahvala gre tudi somentorju **dr. Miranu Veseliču** za njegovo strokovno pomoč, dragocene nasvete, deljenje bogatih praktičnih izkušenj ter pripravljenost za sodelovanje skozi celoten proces izdelave magistrskega dela.

Iskrena hvala tudi partnerju in družini za vso potrpežljivost, razumevanje, spodbudo in podporo v času študija ter priprave magistrskega dela.

Špela Zmrzlikar

IZVLEČEK

Magistrsko delo obravnava problematiko trajne likvidacije naftno-plinskih vrtin na območju Lendave, ki predstavlja del Panonskega bazenskega sistema in edino pomembnejše območje pridobivanja ogljikovodikov v Sloveniji. Dolgoletna eksploatacija nafte in zemeljskega plina je privedla do velikega števila vrtin, katerih opuščanje predstavlja pomemben tehnični in okoljski izziv.

Namen dela je analiza in vrednotenje postopkov zapiranja vrtin z vidika zagotavljanja integritete vrtine, preprečevanja migracije fluidov ter varstva okolja. Raziskava temelji na pregledu geoloških značilnosti območja, analizi tehničnih rešitev ter zakonodajnega in normativnega okvira. Poseben poudarek je namenjen oceni integritete vrtin in vplivu geoloških ter tehničnih dejavnikov na uspešnost likvidacije.

V delu so obravnavani ključni postopki zapiranja vrtin, kot so cementiranje, uporaba mehanskih zapor ter večbariarni sistem izolacije, ki omogoča trajno ločitev geoloških plasti. Analiza vključuje tudi primerjavo s tujimi praksami, ki kaže na uporabo naprednejših tehnologij in sistemov nadzora v primerljivih geoloških okoljih.

Rezultati raziskave potrjujejo, da kakovost izvedbe tehničnih postopkov bistveno vpliva na dolgoročno stabilnost vrtin. Neustrezna likvidacija lahko povzroči migracijo fluidov ter negativne vplive na podzemne vode in tla. Delo poudarja pomen celovitega pristopa, ki vključuje tehnično izvedbo, zakonodajni nadzor in dolgoročno spremljanje stanja kot ključnega za trajnostno upravljanje podzemnega prostora.

Ključne besede: likvidacija vrtin, naftno-plinske vrtine, integriteta vrtine, cementiranje, večbariarni sistem, zaščita podzemnih voda, Lendava, Panonski bazen

ABSTRACT

This master's thesis addresses the issue of permanent abandonment of oil and gas wells in the Endava area, which is part of the Pannonian Basin system and represents the only significant hydrocarbon production region in Slovenia. Long-term exploration and production activities have resulted in a large number of wells, whose abandonment poses important technical and environmental challenges.

The aim of the thesis is to analyse and evaluate well abandonment procedures in terms of well integrity, prevention of fluid migration, and environmental protection. The study is based on the analysis of geological characteristics, technical solutions, and the relevant regulatory framework. Special emphasis is placed on well integrity assessment and the influence of geological and technical factors on the effectiveness of abandonment procedures.

Key well abandonment techniques, including cementing, mechanical barriers, and multi-barrier isolation systems, are examined as essential measures for ensuring long-term separation of geological formations. The study also includes a comparison with foreign practices, highlighting the use of more advanced technologies and monitoring systems in similar geological environments.

The results confirm that the quality of technical execution significantly affects the long-term stability of abandoned wells. Improper abandonment may lead to fluid migration and negative impacts on groundwater and soil. The thesis emphasizes the importance of an integrated approach combining technical execution, regulatory oversight, and long-term monitoring to ensure sustainable subsurface management.

Keywords: well, plugging and abandonment, oil and gas wells, well integrity, cementing, multi-barrier system, groundwater protection, Lendava, Pannonian Basin

KAZALO VSEBINE

1.	UVOD	1
1.1.	Namen in cilji	1
1.2.	Delovne hipoteze	1
1.3.	Metode dela	1
2.	OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA	3
2.1.	Predstavitev obravnavanega območja	3
2.2.	Kratek opis zgodovine raziskovanja in izkoriščanja ogljikovodikov	4
2.3.	Razvoj in značilnosti naftnih in plinskih vrtin na območju Lendave	5
2.4.	Razvoj in število vrtin na območju Lendave	6
2.4.1.	Raziskovalne vrtime	6
2.4.2.	Proizvodne vrtime	6
2.5.	Napake in težave pri vrtanju vrtin	7
2.5.1.	Nestabilnost vrtinske stene	8
2.5.2.	Izguba vrtalne tekočine (<i>lost circulation</i>)	9
2.5.3.	Nenadzorovan dotok fluidov (<i>kick</i>) in izbruh (<i>blowout</i>)	10
2.5.4.	Korozijski vplivi	12
2.5.5.	Težave pri zaščiti vodonosnikov	13
3.	LIKVIDACIJA	15
3.1.	Pomen likvidacije	15
3.2.	Potreba po likvidaciji vrtime	16
3.3.	Tehnični postopki likvidacije vrtin: cementiranje, zapiranje vrtin in rekultivacija površine	18
4.	VRTINE IN NJIHOVE ZNAČILNOSTI	20
4.1.	Življenjski cikel naftno-plinske vrtime	24
4.2.	Tehnične značilnosti naftnih in plinskih vrtin	25
4.2.1.	Migracija plina po anulusih	25
4.3.	Možnosti ponovne uporabe vrtin	27
4.4.	Proces opuščanja in likvidacije vrtin	28
4.5.	Tveganja za okolje in podzemne vode pri zapiranju vrtin	29
5.	ANALIZA STANJA VRTIN NA OBMOČJU LENDAVE (1999–2008)	32
5.1.	Pregled izbrane vrtime	32
5.2.	Ocena integritete vrtime	35
5.3.	Centralna plinska postaja in njen tehnološki proces	35
5.4.	Analiza postopka likvidacije in okoljski vidik izvedene sanacije	37
5.4.1.	Polaganje cementnega čepa po fazah	37
5.5.	Sanacija naključne vrtime skozi projekt	42

6.	ZAKONODAJNI IN NORMATIVNI OKVIR	45
6.1.	Industrijski standardi in dobre prakse (API, ISO).....	45
6.2.	Slovenska zakonodaja na področju rudarstva in varstva okolja	46
6.3.	Industrijski standardi zapiranja vrtin	48
6.4.	Evropska zakonodaja in okoljske smernice.....	49
7.	PRIMERJALNA ANALIZA S TUJO PRAKSO	54
7.1.	Izbrani primer naftno-plinskega polja v tujini	54
7.2.	Prakse iz tujine	55
7.3.	Primerjava zapiranja naftno – plinskih vrtin med Slovenijo in sosednjimi državami (Avstrija, Madžarska in Hrvaška)	56
7.4.	Primerjava uporabljenih tehnologij zapiranja vrtin.....	59
7.5.	Primerjava okoljskih standardov in praks	61
7.6.	Identifikacija dobrih praks	62
7.7.	Vpliv slabih praks zapiranja vrtin na podzemne vode ter tla in kmetijstvo	63
8.	IZVEDBA IN ANALIZA VPRAŠALNIKA	65
9.	SKLEP	68
10.	POVZETEK	71
11.	SUMMARY	72
12.	VIRI IN LITERATURA.....	74
	PRILOGA - INTERVJU.....	1

KAZALO SLIK

Slika 1: Pregledna karta raziskovalnih območij RS (vir: Projekt)	4
Slika 2: Plinski cevovod v Petišovcih (vir: Delo)	7
Slika 3: Shematski prikaz pojava kicka v vrtini (vir: lastna izdelava s pomočjo Canve)	11
Slika 4: Slika naftne vrtine pred in po likvidaciji (vir: medmrežje)	16
Slika 5: Prikaz prereza neznane vrtine Pg (vir: lastna izdelava s pomočjo Canve)	23
Slika 6: Poškodba na sanirani vrtini (vir: medmrežje)	30
Slika 7: Nahajališče vrtine po sanaciji (Vir: osebni arhiv)	31
Slika 8: Lokacija sanirane vrtine V1, ki je predana v ponovno uporabo zemljišča za kmetijske namene (Vir: osebni arhiv)	33
Slika 9: Tehnično stanje v vrtini V1 (vir: projekt)	34
Slika 10: CPP Lendava (vir: osebni arhiv)	36
Slika 11: Predvideno stanje v vrtini in na ustju vrtine V1 po izvedbi sanacijskih del (Vir: projekt)	39
Slika 12: Erupcijska naprava oziroma ustje zaprte vrtine (Vir: osebni arhiv)	40
Slika 13: Proizvodna oprema na ustju vrtine (Vir: projekt)	41
Slika 14: Prvotno stanje vrtine (Vir: projekt)	42
Slika 15: Vrtina v projektu po sanaciji (Vir: projekt)	44
Slika 16: Zakonodajni okvir življenjskega cikla vrtin v SLO (vir: lasten vir)	48
Slika 17: Postopek zapiranja vrtine (Vir: medmrežje)	58
Slika 18: Prikaz ločenega dela pod in nad površjem (Vir: medmrežje)	59

KAZALO TABEL

Tabela 1: Zacevitev in cementiranje V1	32
Tabela 2: Nastreljeni intervali izbrane vrtine V1	32

SEZNAM KRATIC

AB	Armiran beton
ANSI	American National Standards Institute (Ameriški nacionalni inštitut za standarde)
API	American Petroleum Institute (Ameriški naftni inštitut)
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Ameriško združenje strojnih inženirjev)
ATEX	Atmosphères Explosibles (direktiva za eksplozijsko ogrožena območja)
BAT	Best Available Techniques (najboljše razpoložljive tehnike)
BOP	Blowout Preventer (preventer oziroma zaporna naprava za preprečevanje izbruha)
CBL	Cement Bond Log (karotažna meritev kakovosti cementacije)
CCS	Carbon Capture and Storage (zajemanje in skladiščenje CO ₂)
CO ₂	Ogljikov dioksid
CPP	Centralna plinska postaja
EIA	Environmental Impact Assessment (presoja vplivov na okolje)
EOR	Enhanced Oil Recovery (izboljšano pridobivanje nafte)
EPA	Environmental Protection Agency (Agencija ZDA za varstvo okolja)
ES	Evropska skupnost
EU	Evropska unija
H ₂ S	Vodikov sulfid
IEA	International Energy Agency (Mednarodna agencija za energijo)
IOGP	International Association of Oil & Gas Producers (Mednarodno združenje proizvajalcev nafte in plina)
ISO	International Organization for Standardization
LCM	Lost Circulation Material (material za preprečevanje izgub vrtalne tekočine)
MIC	Microbiologically Induced Corrosion (mikrobiološko povzročena korozija)
NORSOK	Norwegian Petroleum Industry Standards (Norveški standardi za naftno in plinsko industrijo)
P&A	Plug and Abandonment (trajna likvidacija oziroma trajno zapiranje vrtine)
RP	Recommended Practice (priporočena praksa)
RS	Republika Slovenija
SPE	Society of Petroleum Engineers (Združenje naftnih inženirjev)
SURS	Statistični urad Republike Slovenije

ZDA	Združene države Amerike
ZRud-1	Zakon o rudarstvu
ZV-1	Zakon o vodah
ZVO-2	Zakon o varstvu okolja
V1	Obravnavana vrtina v delu
XY	Naključna obravnavana vrtina
TVD	True Vertical Depth (dejanska vertikalna globina)
psi	Pound per square inch (enota tlaka)
P _{ck}	Gostota cementne kaše
P	Tlak
W/C	Water/Cement Ratio (vodocementni faktor)
kg/l	Kilogram na liter
Kg	Kilogram
mm	Milimeter
m	Meter
m ³	Kubični meter
l	Liter

1. UVOD

1.1. Namen in cilji

Namen magistrskega dela je pregled, analiza, načrtovanje in vrednotenje postopkov likvidacije naftno-plinskih vrtin na pridobivalno-raziskovalnem območju Lendave. Območje ima dolgoletno zgodovino raziskovanja in pridobivanja ogljikovodikov, zato je trajno in okoljsko ustrezno opuščanje vrtin ključnega pomena za zmanjševanje okoljskih tveganj ter zagotavljanje dolgoročne varnosti prostora. Magistrsko delo bo osredotočeno na izbor tehnično, ekonomsko in okoljsko najustreznejših postopkov trajnega zaprtja vrtin.

V delu bo analizirano, na kakšen način je bila zagotovljena strokovna podlaga za varno, dolgoročno stabilno in z zakonodajo skladno zaprtje vrtin. Poseben poudarek bo namenjen identifikaciji morebitnih tehničnih in okoljskih tveganj, vplivov na okolje ter možnostim za izboljšanje in optimizacijo postopkov likvidacije. Del raziskave bo vključeval tudi primerjavo izbranih podatkov z eno naključno izbrano tujo naftno-plinsko proizvodnjo. Analiza bo vsebinsko omejena na en tip vrtnice.

Raziskovalni cilji so:

- analizirati obstoječe stanje obravnavanih vrtin ter pregledati razpoložljive geološke, geomehanske in tehnične podatke ter dokumentacijo;
- oceniti integriteto posamezne vrtnice (ohišje, cementni obroči, ustje vrtnice) in opredeliti potencialna tehnična in okoljska tveganja;
- pregledati in primerjati postopke likvidacije vrtin ter možne metode trajnega opuščanja v skladu z veljavno zakonodajo, industrijskimi smernicami (npr. API, ISO) in načeli dobrih praks;
- kritično ovrednotiti obstoječo dokumentacijo ter opredeliti možnosti za izboljšanje postopkov z vidika varstva okolja in dolgoročne varnosti.

1.2. Delovne hipoteze

HIPOTEZA 1: Stanje infrastrukture in tehničnih elementov vrtin (cevi, cementacija, nadzemna oprema) neposredno vpliva na zahtevnost in trajanje postopkov likvidacije ter sanacije.

HIPOTEZA 2: Postopki likvidacije naftno in plinskih vrtin so se v obdobju od leta 1999 do danes bistveno spremenili z vidika uporabljenih tehničnih rešitev in delovnih postopkov.

HIPOTEZA 3: Z uporabo sodobnih metod in tehnologij likvidacije vrtin bi bilo mogoče zmanjšati okoljska tveganja ter izboljšati dolgoročno varnost in trajnost zaprtih vrtin v primerjavi z nekaterimi tradicionalnimi postopki.

1.3. Metode dela

Magistrsko delo temelji na kombinaciji analitičnih, dokumentacijskih, terenskih in primerjalnih metod. Metodološki pristop je usmerjen v sistematično in strokovno utemeljeno obravnavo postopkov likvidacije naftno-plinskih vrtin na pridobivalno-raziskovalnem območju Lendave oziroma na polju Petišovci, s poudarkom na varstvu okolja, dolgoročni varnosti in skladnosti z veljavno zakonodajo.

V raziskavi bo izveden pregled relevantne strokovne in znanstvene literature, zakonodajnih zahtev ter industrijskih standardov (npr. API, ISO). Sledila bo analiza razpoložljive tehnične in upravne dokumentacije, povezane z izgradnjo, obratovanjem in likvidacijo vrtin. Na podlagi zbranih podatkov bo opravljena kvalitativna in kvantitativna analiza stanja vrtin, njihove integritete ter postopkov trajnega zaprtja.

Terenski del bo vključeval ogled obravnavanega območja in preveritev dejanskega stanja likvidiranih vrtin s pomočjo fotodokumentacije. Rezultati analize bodo dopolnjeni s primerjalno analizo izvedenih postopkov likvidacije z izbranimi primeri dobre prakse, kar bo omogočilo oceno možnosti za izboljšanje postopkov z vidika varstva okolja in dolgoročne stabilnosti.

2. OPIS OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

2.1. Predstavitev obravnavanega območja

Območje Lendave je v severovzhodnem delu Slovenije, v pokrajini Prekmurje, tik ob meji z Madžarsko in Hrvaško. Upravno središče območja je mesto Lendava, ki leži v vzhodnem delu Murske kotline, ta pa predstavlja del širšega območja Panonski bazen. Gre za obsežen sedimentarni bazen, ki se razteza čez več držav srednje in jugovzhodne Evrope ter predstavlja eno najpomembnejših geoloških struktur v regiji. Panonski bazenski sistem je znan po bogatih naravnih virih, med katerimi so poleg termalnih voda tudi različni energetski viri, vključno z ogljikovodiki (Šram idr., 2015; Markič idr., 2025).

Pomemben element rabe prostora na območju Lendave predstavljajo tudi energetske in industrijske površine, povezane z raziskovanjem in izkoriščanjem ogljikovodikov. Na širšem območju Lendave je namreč edino pomembnejše nahajališče nafte in zemeljskega plina v Republiki Sloveniji. Ta nahajališča so del Mura-Zala bazena, ki predstavlja zahodni rob Panonskega bazenskega sistema. Bazenska struktura je nastala v neogenu kot posledica tektonskega raztezanja zemeljske skorje, zaradi česar so se oblikovale depresije, v katere so se odlagale debele plasti sedimentov (Markič idr., 2011).

Sedimentno zaporedje v Mura-Zala bazenu presega več kilometrov debeline in je sestavljeno predvsem iz glinavcev, laporjev, meljevcev in peščenjakov, ki so nastajali v različnih sedimentacijskih okoljih, kot so jezerska, deltasta in rečna okolja. Pomemben del teh sedimentov predstavljajo tudi litostratigrafske enote, kot so Haloška, Špiljska, Lendavska in Murska formacija, ki skupaj tvorijo kompleksno geološko zgradbo območja (Šram idr., 2015).

Ugodna kombinacija izvornih kamnin, rezervoarskih kamnin in neprepustnih zapornih plasti je omogočila nastanek nahajališč nafte in zemeljskega plina. Ogljikovodiki so večinoma vezani na miocenske sedimente, kjer porozni peščenjaki delujejo kot rezervoarske kamnine, medtem ko glinavci in laporji predstavljajo neprepustne zaporne plasti, ki preprečujejo migracijo ogljikovodikov proti površju.

Najpomembnejše nahajališče ogljikovodikov na tem območju predstavlja naftno-plinsko polje Petišovci, ki je severovzhodno od Lendave v neposredni bližini slovensko-madžarske meje. Nahajališče je bilo odkrito leta 1942 kot nadaljevanje že znanega naftnega polja Lovász na Madžarskem (Markič idr., 2025). Rezervoarji ogljikovodikov so razporejeni v več horizontih, ki so na različnih globinah, približno med 1000 in 3500 m. Plitvejši rezervoarji so bili v večji meri izkoriščani v zgodnejših fazah proizvodnje, medtem ko se danes več pozornosti namenja globljim plinskim horizontom.

Raziskovanje in izkoriščanje ogljikovodikov je na območju Lendave potekalo skozi več desetletij in je pomembno vplivalo na razvoj energetike in industrije v regiji. Na območju je bilo izvrtanih več deset raziskovalnih in proizvodnih vrtin, ki so omogočile podrobnejše razumevanje geološke zgradbe bazena in lastnosti rezervoarjev. Poleg gospodarskega pomena imajo te vrtine tudi pomembno znanstveno vrednost, saj predstavljajo ključni vir podatkov o stratigrafiji, litologiji in geološkem razvoju Mura-Zala bazena (Kerčmar, 2018).

Danes območje Lendave poleg obstoječih energetskih dejavnosti predstavlja tudi pomembno raziskovalno območje za preučevanje potenciala podzemnega prostora. Zaradi ustreznih geoloških pogojev se poleg raziskav ogljikovodikov preučujejo tudi možnosti geotermalne rabe ter podzemnega skladiščenja energentov ali ogljikovega dioksida (Markič idr., 2025). V tem kontekstu imajo obstoječe naftne in plinske vrtine pomembno vlogo, saj omogočajo neposreden vpogled v geološko zgradbo ter lastnosti podzemnih rezervoarjev.



Slika 1: Pregledna karta raziskovalnih območij RS (vir: Projekt)

2.2. Kratek opis zgodovine raziskovanja in izkoriščanja ogljikovodikov

Raziskovanje ogljikovodikov na območju severovzhodne Slovenije se je razvijalo postopoma, predvsem kot del širših raziskav Panonskega bazena. Geološke raziskave v prvi polovici 20. stoletja so pokazale, da imajo sedimentni bazeni v tem delu Evrope potencial za nastanek in akumulacijo nafte ter zemeljskega plina. Na podlagi teh spoznanj so se raziskovalne aktivnosti postopoma razširile tudi na območje današnje občine Lendava, kjer so bile izvedene prve sistematične raziskave podzemnih struktur (Markič idr., 2011).

Začetki industrijskega raziskovanja segajo v štirideseta leta 20. stoletja, ko so bile izvedene prve raziskovalne vrtine. Te so potrdile prisotnost ogljikovodikov v sedimentnih plasteh in spodbudile nadaljnje raziskave. Po drugi svetovni vojni je sledilo intenzivnejše obdobje geološkega kartiranja in vrtanja, ki je omogočilo podrobnejše razumevanje zgradbe rezervoarjev in razporeditve ogljikovodikov v podzemlju. V tem času so bile vrtine ključni raziskovalni instrument, saj so poleg pridobivanja energentov zagotavljale tudi pomembne podatke o stratigrafiji in lastnostih kamnin.

V drugi polovici 20. stoletja so se raziskovalne metode postopoma nadgrajevale z uporabo sodobnejših geofizikalnih tehnik. Zlasti seizmične raziskave so omogočile natančnejše določanje podzemnih struktur in identifikacijo potencialnih rezervoarskih območij. Takšen tehnološki razvoj je bistveno izboljšal učinkovitost raziskovalnega vrtanja ter omogočil boljše načrtovanje novih vrtin. V tem obdobju je bilo na širšem območju Lendave izvrtanih več raziskovalnih in proizvodnih vrtin, ki so prispevale k razvoju domače naftno-plinske dejavnosti.

V poznejšem obdobju so se raziskave osredotočale predvsem na izboljšanje razumevanja globljih rezervoarskih struktur ter na optimizacijo pridobivanja plina iz manj prepustnih kamnin. Razvoj tehnologij vrtanja in obdelave vrtin je omogočil učinkovitejše izkoriščanje obstoječih nahajališč ter podaljšanje njihove proizvodne dobe. Hkrati so podatki iz vrtin postali pomemben vir informacij za regionalne geološke raziskave, saj omogočajo podrobnejši vpogled v razvoj sedimentnih bazenov.

Danes ima raziskovanje ogljikovodikov na območju Lendave poleg energetskega tudi izrazit raziskovalni pomen. Vrtine, ki so bile izvrtane v različnih fazah raziskovanja, predstavljajo dragoceno zbirko podatkov o geološki zgradbi in lastnostih podzemnih rezervoarjev. Ti podatki so pomembni za nadaljnje znanstvene raziskave, pa tudi za ocenjevanje potenciala prihodnje rabe podzemnega prostora, na primer v kontekstu skladiščenja energentov ali drugih oblik izrabe geoloških struktur (Markič idr., 2025).

2.3. Razvoj in značilnosti naftnih in plinskih vrtin na območju Lendave

Na širšem območju Lendave imajo raziskovalne in proizvodne vrtine ključno vlogo pri preučevanju ter izkoriščanju ogljikovodikov. Vrtine predstavljajo neposreden stik s podzemnimi geološkimi strukturami, zato so poleg pridobivanja nafte in zemeljskega plina tudi pomemben vir podatkov o litologiji, stratigrafiji ter fizikalnih lastnostih rezervoarskih kamnin. Informacije, pridobljene med vrtanjem in poznejšimi meritvami v vrtinah, omogočajo podrobnejše razumevanje geološke zgradbe območja.

Prve vrtine so bile izvedene kot raziskovalne vrtine, katerih namen je bil preveriti prisotnost ogljikovodikov v sedimentnih plasteh. Z razvojem raziskav so se poleg raziskovalnih začele izvajati tudi proizvodne vrtine, namenjene črpanju nafte in zemeljskega plina iz rezervoarskih horizontov. Razlikujemo lahko več tipov vrtin, med katerimi so najpomembnejše raziskovalne vrtine, ki služijo identifikaciji in potrditvi nahajališč, ter proizvodne vrtine, ki omogočajo dolgoročno pridobivanje ogljikovodikov iz že potrjenih rezervoarjev (Markič idr., 2025).

Globine vrtin na območju Lendave se razlikujejo glede na geološko strukturo in ciljne rezervoarske horizonte. Nekaterе vrtine segajo do globin približno 1000 m, kjer so bili identificirani plitvejši rezervoarji, medtem ko globlje vrtine dosegajo tudi več kot 3000 m. S povečevanjem globine se spreminjajo tudi fizikalne lastnosti kamnin, kot so poroznost, prepustnost ter tlak v rezervoarjih, kar pomembno vpliva na tehnologijo vrtanja in poznejšega pridobivanja ogljikovodikov (Kerčmar, 2018).

Pomemben del raziskovanja predstavlja tudi zbiranje geoloških podatkov med vrtanjem. Pri vrtanju se odvzemajo vzorci kamnin, ki omogočajo določanje litološke sestave in stratigrafskega zaporedja sedimentnih plasti. Poleg tega se izvajajo različne geofizikalne meritve v vrtinah (karotažne meritve), s katerimi se določajo lastnosti kamnin, kot so gostota, električna upornost in naravna radioaktivnost. Ti podatki omogočajo identifikacijo rezervoarskih plasti ter oceno njihovega potenciala za akumulacijo ogljikovodikov (Markič idr., 2011).

V zadnjih desetletjih se tehnologija vrtanja nenehno razvija, kar omogoča učinkovitejše in varnejše vrtanje tudi v zahtevnejših geoloških razmerah. Sodobne metode vključujejo napredne sisteme nadzora vrtanja, izboljšane vrtalne tekočine ter natančnejše geofizikalne meritve v vrtinah. Takšen tehnološki razvoj omogoča boljšo izrabo obstoječih nahajališč in hkrati zmanjšuje vplive na okolje.

Zaradi velike količine zbranih geoloških podatkov imajo vrtine na območju Lendave tudi dolgoročno raziskovalno vrednost. Podatki iz vrtin se uporabljajo pri regionalnih geoloških študijah ter pri ocenjevanju potenciala različnih oblik izrabe podzemnega prostora. V tem kontekstu predstavljajo pomembno osnovo za nadaljnje raziskave, povezane z energetskimi viri in trajnostno rabo geoloških struktur (Markič idr., 2025).

2.4. Razvoj in število vrtin na območju Lendave

2.4.1. Raziskovalne vrtine

Raziskovalne vrtine predstavljajo začetno fazo raziskovanja ogljikovodikov na določenem območju. Njihov osnovni namen je preverjanje prisotnosti ogljikovodikov, določanje litološke sestave sedimentov ter identifikacija potencialnih rezervoarskih horizontov.

Na območju Lendave so bile prve raziskovalne vrtine izvrtane v začetku štiridesetih let 20. stoletja. Prva vrtina, izvedena leta 1942, je potrdila prisotnost ogljikovodikov v miocenskih sedimentih in s tem potrdila potencial območja za nadaljnje raziskave. V naslednjih dveh desetletjih je bilo izvedenih več dodatnih raziskovalnih vrtin, ki so omogočile določitev osnovnih geoloških struktur ter potrditev rezervoarskih plasti v okolici Petišovcev.

Raziskovalne vrtine so bile praviloma globoke med 1000 in 2000 m, saj so bile usmerjene predvsem v plitvejšje rezervoarje. Poleg potrditve prisotnosti ogljikovodikov so te vrtine zagotovile tudi ključne podatke o stratigrafiji, litologiji ter fizikalnih lastnostih kamnin, ki so bili pozneje uporabljeni pri načrtovanju proizvodnih vrtin.

2.4.2. Proizvodne vrtine

Po potrditvi nahajališč so bile izvedene proizvodne vrtine, namenjene neposrednemu črpanju nafte in zemeljskega plina iz rezervoarskih plasti. Največ proizvodnih vrtin je bilo izvrtanih v obdobju med šestdesetimi in osemdesetimi leti 20. stoletja, ko je bilo izkoriščanje ogljikovodikov na območju Lendave najintenzivnejše.

Proizvodne vrtine so bile pogosto globlje od prvih raziskovalnih vrtin in so dosegle globine med približno 1500 in 3000 m. Njihova razporeditev je bila prilagojena strukturi rezervoarjev, ki so v podzemlju razporejeni v obliki struktur, omejenih s prelomi in stratigrafskimi spremembami.

Skupno je bilo na območju naftno-plinskega polja Petišovci izvrtanih več kot 30 vrtin. Del teh vrtin je bil namenjen proizvodnji, nekatere pa so bile pozneje preurejene za opazovanje rezervoarskih razmer ali za dodatne raziskovalne meritve.

2.4.3. Globine in tehnične značilnosti vrtin

Globine vrtin na območju Lendave se razlikujejo glede na ciljne rezervoarske horizonte. Plitvejši rezervoarji so približno med 1000 in 1800 m globine, medtem ko globlji plinski rezervoarji segajo tudi do približno 3500 m.

Med vrtanjem se zbirajo različni geološki in geofizikalni podatki, kot so:

- vzorci kamnin (jedra),
- karotažne meritve,
- podatki o tlaku in temperaturi v rezervoarju.

Ti podatki omogočajo določanje poroznosti, prepustnosti ter drugih lastnosti rezervoarskih kamnin. Na podlagi teh analiz je mogoče oceniti količino ogljikovodikov v rezervoarju in načrtovati optimalen način pridobivanja.

Število in razporeditev vrtin

Na širšem območju naftno-plinskega polja Petišovci je bilo do danes izvrtanih več kot 30 raziskovalnih in proizvodnih vrtin. Večina vrtin je koncentrirana na relativno majhnem območju severovzhodno od Lendave, kjer so bile identificirane najprimernejše geološke strukture za akumulacijo ogljikovodikov.

Razporeditev vrtin sledi geološkim strukturam rezervoarjev, saj je bil cilj vrtanja doseči območja z največjo koncentracijo ogljikovodikov. Vrtine se med seboj povezujejo z infrastrukturo za zbiranje in transport zemeljskega plina, ki omogoča nadaljnjo obdelavo in distribucijo energenta.



Slika 2: Plinski cevovod v Petišovcih (vir: Delo)

2.5. Napake in težave pri vrtanju vrtin

Ena izmed najpogostejših težav je nestabilnost vrtinske stene. Mehanske lastnosti kamnin v Panonskem bazenu so pogosto takšne, da ne zagotavljajo zadostne stabilnosti, zlasti v plasteh glin in peskov, ki so slabo vezani. Med vrtanjem lahko pride do sesedanja sten vrtine, kar povzroči zmanjšanje premera vrtine, otežuje spuščanje ohišja in lahko vodi do zagozditve vrtalne opreme. Takšne situacije zahtevajo takojšnje ukrepanje, pogosto v obliki spremembe sestave vrtalne tekočine ali dodatnega utrjevanja sten vrtine.

Pomemben problem predstavlja tudi izguba vrtalne tekočine, ki nastane, ko vrtalna tekočina uhaja v porozne ali razpokane plasti. Ta pojav zmanjšuje hidrostatični tlak v vrtini, kar lahko vodi do nenadzorovanega dotoka plinov ali tekočin iz formacije. Izguba cirkulacije ne vpliva le na varnost, temveč tudi na ekonomiko vrtanja, saj zahteva dodatne materiale in čas za stabilizacijo razmer.

Posebej kritična situacija je nenadzorovan dotok plina ali nafte, znan kot *kick*. Ta se pojavi, ko tlak v vrtini ni dovolj visok, da bi preprečil vdor fluidov iz okolice. Če takšen dotok ni pravočasno zaznan ali ustrezno nadzorovan, lahko preraste v izbruh, ki predstavlja eno najresnejših in najnevarnejših nesreč v naftni industriji. Na območju Lendave, kjer so prisotne plinske plasti, je nadzor nad tlakom ključnega pomena za varno izvajanje vrtanja.

2.5.1. Nestabilnost vrtinske stene

Nestabilnost vrtinske stene je ena najpogostejših in tehnično najzahtevnejših težav pri vrtanju naftno-plinskih vrtin, zlasti v sedimentnih bazenih, kot je območje Lendave. Gre za pojav, pri katerem stene vrtine izgubijo svojo mehansko stabilnost, kar vodi do krušenja, sesedanja ali deformacije odprtega dela vrtine. Ta proces lahko resno ogrozi nadaljnja vrtanja, poveča stroške in v skrajnih primerih povzroči izgubo vrtine.

Glavni vzrok nestabilnosti je porušitev ravnovesja med napetostmi v kamnini in tlakom v vrtini. Z vrtanjem vrtine se poruši naravno stanje napetosti v kamnini, kar lahko povzroči premike ali porušitve. Na območju Lendave je ta problem še posebej izrazit zaradi prisotnosti slabo konsolidiranih sedimentov, kot so gline, peski in laporji.

V glinah lahko pride do nabrekanja zaradi stika z vrtalno tekočino, kar povzroča dodatne napetosti in zoženje vrtine. Pri peskih pa je pogost pojav mehanskega krušenja, kjer delci kamnine odpadajo v vrtino. Dodatno nestabilnost lahko povzročijo tudi razpoke v kamnini, ki omogočajo premike večjih blokov.

Pomemben dejavnik je tudi neustrezna gostota vrtalne tekočine. Če je tlak v vrtini prenizek, ne more stabilizirati sten, kar vodi do porušitev. Če pa je previsok, lahko povzroči razpoke v formaciji in s tem druge težave, kot je izguba vrtalne tekočine.

Nestabilnost vrtinske stene se lahko kaže v različnih oblikah:

- krušenje sten – odpadanje manjših delcev kamnine;
- zagozditev vrtalnega orodja – posledica zoženja vrtine;
- kolaps vrtine – delna ali popolna porušitev sten;
- deformacija vrtine – sprememba oblike vrtine iz krožne v eliptično.

Vsaka od teh oblik ima različne posledice in zahteva specifične ukrepe za sanacijo.

Posledice za vrtanje so lahko številne, saj nestabilnost vrtinske stene neposredno vpliva na potek vrtanja. Zoženje vrtine otežuje spuščanje ohišja in lahko povzroči zagozditev opreme, kar pogosto zahteva zapletene in drage reševalne postopke. Poleg tega krušenje sten povečuje količino trdnih delcev v vrtalni tekočini, kar zmanjšuje njeno učinkovitost i+ter povečuje obrabo opreme.

V hujših primerih lahko pride do popolne izgube vrtine, kar pomeni prekinitev projekta in znatne finančne izgube. Nestabilnost lahko vpliva tudi na kakovost cementiranja, saj nepravilna oblika vrtine otežuje enakomerno razporeditev cementa.

Za preprečevanje nestabilnosti vrtinske stene je ključnega pomena pravilna izbira vrtalne tekočine. Ta mora imeti ustrezno gostoto in kemijsko sestavo, ki stabilizira kamnino in preprečuje njeno razpadanje. V primeru glin se pogosto uporabljajo inhibirane vrtalne tekočine, ki zmanjšujejo nabrekanje.

Pomemben ukrep je tudi hitro vgrajevanje ohišja, ki mehansko stabilizira vrtino in preprečuje nadaljnje porušitve. Poleg tega se uporabljajo napredni modeli napetosti v kamninah, ki omogočajo boljše načrtovanje vrtanja in izbiro optimalnih parametrov.

Kritična ocena: nestabilnost vrtinske stene je primer problema, ki ga je težko popolnoma odpraviti, saj izhaja iz naravnih lastnosti kamnin. Na podlagi analiz in strokovne literature je mogoče ugotoviti, da je nestabilnost vrtinske stene tesno povezana z geološkimi razmerami in ustreznostjo načrtovanja vrtanja. Uporaba sodobnih geomehanskih modelov ter natančnejše spremljanje parametrov vrtanja omogočata učinkovitejše preprečevanje tovrstnih težav. Največji izziv je v tem, da se rešitve pogosto osredotočajo na prilagajanje parametrov vrtanja, namesto na boljše razumevanje geoloških razmer pred začetkom vrtanja.

Razvoj naprednih geomehanskih modelov in boljša karakterizacija kamnin bi lahko bistveno izboljšala napovedovanje nestabilnosti. Prav tako bi večja uporaba realnočasovnih meritev omogočila hitrejšo odzivanje na spremembe v vrtini.

2.5.2. Izguba vrtalne tekočine (*lost circulation*)

Izguba vrtalne tekočine predstavlja enega najpogostejših in hkrati najbolj problematičnih pojavov pri vrtanju naftno-plinskih vrtin. Gre za proces, pri katerem vrtalna tekočina nekontrolirano prehaja iz vrtine v okoliško geološko formacijo, kar povzroči motnje v kroženju tekočine in poruši ravnotežje tlakov v vrtini. Ta pojav je še posebej izrazit v geološko heterogenih območjih, kot je območje Lendave, kjer so prisotne porozne, razpokane ali slabo konsolidirane sedimentne plasti.

Do izgube vrtalne tekočine pride, ko tlak v vrtini preseže sposobnost geološke formacije za zadrževanje tekočine. V takšnih primerih vrtalna tekočina prehaja v porozne ali razpokane plasti, kar povzroči motnje v kroženju in zmanjša stabilnost vrtine. To se najpogosteje zgodi v poroznih peskih, razpokanih kamninah ali območjih z naravnimi kavernami, kjer obstajajo odprte poti za pretok tekočine. V takih primerih vrtalna tekočina prodira v formacijo, namesto da bi krožila nazaj na površje.

Izgube lahko razdelimo na več tipov:

- delne izgube, kjer se del tekočine izgublja, vendar kroženje še vedno poteka;
- popolne izgube, kjer se cirkulacija popolnoma prekine;
- nenadne izgube, ki nastanejo zaradi preboja v večjo razpoko ali votlino;
- postopne izgube, ki se povečujejo s časom zaradi erozije formacije.

Izguba vrtalne tekočine ima več pomembnih posledic. Najprej vpliva na hidrostatični tlak v vrtini, saj zmanjšanje količine tekočine pomeni tudi zmanjšanje tlaka, ki deluje na stene vrtine. To lahko povzroči nestabilnost vrtinske stene ali celo nenadzorovan dotok fluidov (*kick*), saj se poruši ravnovesje med tlakom v vrtini in tlakom v formaciji.

Poleg tega izguba tekočine zmanjšuje učinkovitost odstranjevanja izvrtanega materiala (*cuttings*), kar lahko vodi do kopičenja materiala na dnu vrtine in otežuje nadaljnje vrtanje. Prav tako se poveča obraba vrtalne opreme, saj se zmanjša mazalni učinek vrtalne tekočine.

Ekonomski vpliv je prav tako pomemben, saj izgube zahtevajo dodatno količino vrtalne tekočine, uporabo posebnih dodatkov in pogosto tudi začasno prekinitev vrtanja. V nekaterih primerih lahko pride do potrebe po spremembi načrta vrtanja ali celo opustitve vrtine.

Za obvladovanje izgube vrtalne tekočine se uporabljajo različne tehnike. Ena najpogostejših je uporaba posebnih materialov za zapiranje razpok, znanih kot *lost circulation materials* (LCM). Ti materiali, ki lahko vključujejo vlakna, delce ali gelne snovi, se dodajo vrtalni tekočini in pomagajo zapolniti pore ali razpoke v formaciji.

Druga metoda je znižanje tlaka v vrtini, kar se doseže z uporabo lažjih vrtalnih tekočin ali zmanjšanjem pretoka. Vendar pa ta pristop povečuje tveganje za pojav *kicka*, zato je potrebno skrbno ravnovesje med obema pojavoma.

V zahtevnejših primerih se uporablja tudi cementiranje izgubljenih con, kjer se v problematično območje vbrižga cement, ki zapre razpoke in ponovno omogoči kroženje tekočine. Ta metoda je učinkovita, vendar časovno in finančno zahtevna.

Kritična ocena: izguba vrtalne tekočine je dober primer kompleksnega problema, kjer tehnični ukrepi pogosto rešujejo posledice, ne pa vzroka. Ena največjih slabosti pristopa je ta, da se večina rešitev osredotoča na zapiranje že nastalih izgub, namesto na njihovo preprečevanje.

V prihodnje bi bilo smiselno več pozornosti nameniti naprednim geološkim modelom in napovednim metodam, ki bi omogočale boljše predvidevanje območij z visokim tveganjem za izgube. Prav tako bi lahko razvoj novih materialov za vrtalne tekočine bistveno izboljšal odpornost sistema na takšne pojave.

2.5.3. Nenadzorovan dotok fluidov (*kick*) in izbruh (*blowout*)

Nenadzorovan dotok fluidov, znan kot *kick*, predstavlja enega najpomembnejših varnostnih in tehničnih izzivov pri vrtanju naftno-plinskih vrtin. Gre za pojav, pri katerem fluidi iz geološke formacije (plin, nafta ali voda) vdrejo v vrtino zaradi neustreznega ravnovesja tlakov. Osnovni vzrok za nastanek *kicka* je razlika med tlakom v vrtini (hidrostatični tlak vrtalne tekočine) in tlakom v formaciji. Če tlak vrtalne tekočine ni dovolj visok, da bi uravnotežil ali presegel tlak v kamnini, pride do vdora fluidov v vrtino.

Na območju Lendave, kjer so prisotne plinske in naftne plasti v sedimentnih kamninah, je pojav *kicka* še posebej relevanten. Geološka heterogenost in prisotnost različnih tlačnih režimov pomenita, da se lahko tlak v formaciji hitro spremeni, kar otežuje njegovo natančno napovedovanje. To povečuje tveganje za nenaden vdor plina ali tekočin v vrtino.

Mehanizem nastanka *kicka* nastane med vrtanjem, ko se vrtalna tekočina uporablja za uravnavanje tlaka v vrtini. Ta tekočina ustvarja hidrostatični tlak, ki mora biti dovolj velik, da prepreči vdor fluidov iz okolice. Če pride do zmanjšanja gostote vrtalne tekočine, izgube cirkulacije ali nepravilnega nadzora nad nivojem tekočine, se lahko tlak v vrtini zniža pod tlak formacije. Posledica je vdor fluidov v vrtino.

Posebno nevarni so plini, saj imajo nizko gostoto in se ob dvigu proti površju širijo (zaradi zmanjšanja tlaka), kar dodatno povečuje volumen in tlak v vrtini. Ta pojav lahko hitro eskalira, če ni pravočasno zaznan.

Zgodnje zaznavanje *kicka* je ključno za preprečevanje resnejših posledic. Med najpogostejšimi kazalniki so:

- povečanje pretoka iz vrtine (večji iztok kot dotok vrtalne tekočine),
- nenadno zmanjšanje tlaka črpanja,
- sprememba nivoja vrtalne tekočine v rezervoarjih,
- povečanje hitrosti vrtanja (zaradi zmanjšane uporabe v formaciji),
- prisotnost plina v vrtalni tekočini.

Operaterji morajo stalno spremljati te parametre in ob zaznavi odstopanj takoj ukrepati.

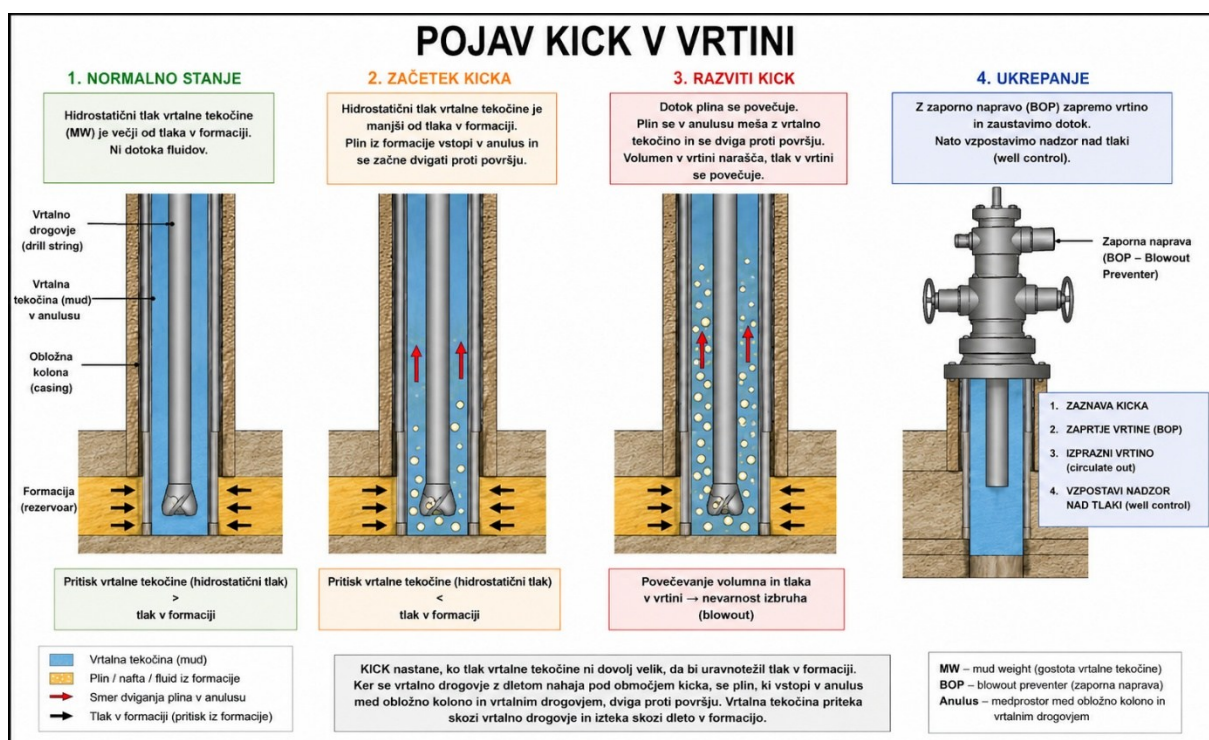
Obvladovanje *kicka* zahteva, ko je *kick* zaznan, takojšnjo stabilizacijo vrtine. To se običajno izvede z zaprtjem vrtine s pomočjo zaporne naprave (*Blowout Preventer* – BOP), ki prepreči nadaljnji iztok fluidov. Nato se v vrtino črpa gostejša vrtalna tekočina, ki ponovno vzpostavi ravnovesje tlakov.

Postopek obvladovanja zahteva visoko stopnjo usposobljenosti osebja, saj nepravilni ukrepi lahko povzročijo dodatno destabilizacijo sistema. Pomembno je tudi, da so vsi varnostni sistemi redno testirani in pripravljeni na uporabo.

Če *kick* ni pravočasno zaznan ali ustrezno obvladan, lahko preraste v izbruh (*blowout*), ki predstavlja nenadzorovan iztok fluidov na površje. Takšni dogodki imajo lahko katastrofalne posledice, vključno z eksplozijami, požari in obsežnim onesnaženjem okolja. Zgodovinski primeri kažejo, da so izbruhi pogosto posledica kombinacije tehničnih havarij in človeškega dejavnika.

Kritična ocena: kljub razvoju naprednih tehnologij za nadzor vrtanja *kick* ostaja eden ključnih izzivov v naftni industriji. Po mojem mnenju je največja slabost v tem, da sistemi za zaznavanje pogosto temeljijo na posrednih kazalnikih, ki zahtevajo interpretacijo operaterja. To pomeni, da je človeški dejavnik še vedno pomemben vir tveganja.

Zato bi bilo smiselno v prihodnje več pozornosti nameniti avtomatizaciji nadzora, uporabi naprednih senzorjev in umetne inteligence za zgodnje zaznavanje anomalij. Prav tako je ključnega pomena redno usposabljanje osebja in izvajanje simulacij izrednih dogodkov.



Slika 3: Shematski prikaz pojava kicka v vrtni (vir: lastna izdelava s pomočjo Canve)

Slika prikazuje pojav *kicka* v vrtni ter razvoj nenadzorovanega dotoka fluidov iz geološke formacije v vrtno. Prikazan je potek od normalnega stanja vrtnice do razvoja *kicka* in ukrepanja z uporabo zaporne naprave BOP. Shema prikazuje osnovne principe nadzora tlakov v vrtni in pomen pravočasnega ukrepanja za preprečevanje izbruha (*blowout*).

V prvem delu slike je prikazano normalno stanje v vrtni, kjer je hidrostatični tlak vrtnale tekočine večji od tlaka v formaciji. Zaradi tega fluidi iz rezervoarske plasti ne vdirajo v vrtno. Prikazana sta vrtno drogovje z vrtnim dletom ter obložna kolona (*casing*), med katerima je anulus oziroma medprostor, zapolnjen z vrtno tekočino. Vrtalna tekočina po vrtnem drogrovju priteka proti dletu, nato pa se po anulusu vrača proti površju.

Drugi del prikazuje začetek *kicka*, ki nastane, ko hidrostatični tlak vrtnale tekočine postane manjši od tlaka v formaciji. Zaradi razlike v tlakih začne plin oziroma drug fluid iz rezervoarja vdirati v vrtno. Ker je vrtno drogovje z vrtnim dletom pod območjem dotoka, se plin začne dvigati po anulusu med obložno kolono in vrtnim drogrovjem proti površju. Vrtalna tekočina medtem še vedno kroži skozi vrtno drogovje.

V tretjem delu je prikazan razviti *kick*, kjer se količina plina v anulusu povečuje. Zaradi širjenja plina med dviganjem proti površju se povečuje volumen fluidov v vrtini, posledično pa narašča tudi tlak v vrtalnem sistemu. Če se dotok pravočasno ne zazna in ne omeji, lahko pride do izbruha vrtine (*blowout*), ki predstavlja resno varnostno in okoljsko tveganje.

Četrty del prikazuje ukrepanje ob pojavu *kicka*. Vrtina se zapre z zaporno napravo BOP, ki prepreči nadaljnji dotok fluidov in omogoči vzpostavitev nadzora nad tlakom v vrtini. Po zaprtju vrtine se izvede nadzorovano kroženje vrtalne tekočine ter odstranitev plina iz sistema. Slika 3 poudarja pomen zgodnjega zaznavanja *kicka*, pravičnega nadzora tlakov in ustreznega ukrepanja za zagotavljanje varnega vrtanja.

2.5.4. Korozijski vplivi

Korozija predstavlja enega ključnih dolgoročnih dejavnikov tveganja pri vrtanju, obratovanju in zapiranju naftno-plinskih vrtin. Gre za kemijsko ali elektrokemijsko reakcijo med materialom vrtine (predvsem jeklom) in okoljem, ki povzroča postopno razgradnjo materiala. Na območju Lendave, ki je del Panonskega bazena, so korozijski procesi še posebej pomembni zaradi prisotnosti agresivnih plinov in mineraliziranih voda v podzemlju.

Korozijski vplivi v vrtinah so najpogostejše povezani s prisotnostjo plinov, kot sta ogljikov dioksid (CO_2) in vodikov sulfid (H_2S), ter s slanimi formacijskimi vodami. CO_2 v stiku z vodo tvori ogljikovo kislino, ki napada jeklene površine, medtem ko H_2S povzroča t. i. sulfidno korozijo in lahko vodi do krhkega loma materiala.

Poleg kemijskih dejavnikov na korozijo vplivajo tudi:

- temperatura in tlak,
- hitrost pretoka fluidov,
- mehanske poškodbe zaščitnih slojev,
- sestava vrtalne tekočine.

Na območju Lendave so pogosto prisotne kombinacije teh dejavnikov, kar povečuje kompleksnost korozijskih procesov.

Korozija v vrtinah se lahko pojavlja v različnih oblikah:

- enakomerna (uniformna) korozija, kjer material enakomerno izgublja debelino;
- lokalna korozija (*pitting*), ki povzroča nastanek majhnih, a globokih poškodb;
- napetostna korozija, kjer kombinacija napetosti in kemijskih vplivov povzroči razpoke;
- mikrobiološko inducirana korozija (MIC), ki jo povzročajo bakterije v podzemlju.

Lokalna korozija je še posebej nevarna, saj lahko hitro povzroči preboj ohišja vrtine, čeprav je večina materiala še vedno videti nepoškodovana.

Korozija ima lahko resne posledice za varnost in funkcionalnost vrtine. Postopno tanjšanje jeklenega ohišja zmanjšuje njegovo mehansko trdnost, kar lahko vodi do poškodb ali porušitve. V primeru nastanka razpok ali lukenj lahko pride do nenadzorovanega uhajanja fluidov med geološkimi plastmi ali proti površju.

To predstavlja veliko tveganje za okolje, zlasti za podzemne vode, saj lahko pride do kontaminacije z ogljikovodiki ali slanici. Poleg tega lahko korozija vpliva na učinkovitost cementnih zapor, saj poškodbe ohišja omogočajo nastanek kanalov za migracijo fluidov.

Korozijski procesi imajo pomembno vlogo tudi v fazi zapiranja vrtin. Če je ohišje že poškodovano zaradi korozije, lahko to oteži učinkovito cementiranje in zmanjša zanesljivost zapornih barier. V takih primerih je treba uporabiti dodatne ukrepe, kot so večplastni cementni čepi ali posebni tesnilni materiali.

Dolgotrajna korozija po zaprtju vrtine lahko vodi do ponovne vzpostavitve poti za migracijo plinov ali tekočin, kar pomeni, da vrtina tudi po zaprtju ni popolnoma varna brez ustreznega spremljanja.

Za zmanjšanje korozijskih vplivov se uporabljajo različni ukrepi:

- uporaba korozijsko odpornih materialov (npr. legirana jekla);
- nanos zaščitnih premazov na notranje površine ohišja;
- dodajanje inhibitorjev korozije v vrtalno ali proizvodno tekočino;
- nadzor kemijske sestave fluidov;
- redni pregledi in meritve debeline materiala.

Pomembno vlogo ima tudi pravilno načrtovanje vrtine, ki vključuje oceno korozijskih tveganj že v fazi projektiranja.

Kritična ocena: korozija je pogosto podcenjen problem, saj njeni učinki niso takoj vidni, vendar imajo lahko dolgoročno zelo resne posledice. Po mojem mnenju je največja slabost v tem, da se pozornost pogosto osredotoča na fazo vrtanja in obratovanja, medtem ko je nadzor po zaprtju vrtine pogosto nezadosten.

Razvoj naprednih materialov in sistemov za spremljanje bi lahko bistveno izboljšal obvladovanje korozije. Posebej pomembno je tudi dolgoročno spremljanje zaprtih vrtin, saj se korozijski procesi nadaljujejo tudi po zaključku obratovanja.

2.5.5. Težave pri zaščiti vodonosnikov

Zaščita vodonosnikov predstavlja enega ključnih okoljskih vidikov pri vrtanju naftno-plinskih vrtin, saj podzemne vode pogosto predstavljajo glavni vir pitne vode. Na območju Lendave, ki je del Panonskega bazena, so vodonosniki razmeroma plitvi in hidrogeološko povezani z različnimi sedimentnimi plastmi, kar dodatno povečuje njihovo ranljivost. Vrtanje vrtin pomeni neposreden poseg v geološko strukturo, pri čemer lahko pride do vzpostavitve umetnih povezav med sicer ločenimi vodonosniki ali med onesnaženimi in neonesnaženimi plastmi.

Eden glavnih problemov je **neustrezna izolacija vodonosnikov** z ohišjem in cementnim plaščem. Vrtina mora biti zasnovana tako, da popolnoma loči vodonosnike od globljih plasti, ki lahko vsebujejo ogljikovodike, slanice ali druge škodljive snovi. Če cementiranje ni pravilno izvedeno, lahko nastanejo mikrokanali ali praznine, skozi katere se lahko tekočine premikajo med plastmi.

Drugi pomembni mehanizem je **mehanska poškodba ohišja vrtine**, ki lahko nastane zaradi korozije, napetosti ali nestabilnosti vrtinske stene. Takšne poškodbe omogočajo neposreden prehod fluidov v vodonosnike. Tveganje je še posebej veliko pri starejših vrtinah, kjer materiali sčasoma degradirajo.

Poleg tega lahko do onesnaženja pride tudi med samim vrtanjem, če vrtalna tekočina ali druge kemikalije prodrejo v vodonosnik. Vrtalne tekočine pogosto vsebujejo različne dodatke, ki lahko ob neustreznem ravnanju predstavljajo potencialno nevarnost za kakovost podzemne vode.

Vzrok za potencialno ogrožanje vodonosnikov je dejstvo, da vrtina predstavlja umetno povezavo med različnimi geološkimi plastmi, ki so sicer naravno ločene. Med vrtanjem lahko pride do porušitve teh naravnih barier, kar omogoča migracijo fluidov med plastmi. Če vrtina ni ustrezno zatesnjena, lahko pride do prehajanja onesnaženih tekočin ali plinov v vodonosnik.

Pomembno tveganje predstavljajo tudi vrtalne tekočine, ki pogosto vsebujejo različne kemijske dodatke. V primeru izgube vrtalne tekočine ali poškodbe ohišja lahko ti kemični elementi prodrejo v podzemne vode. Poleg tega lahko tudi naravni fluidi iz globljih plasti, kot so slanice ali ogljikovodiki, kontaminirajo vodonosnike, če ni zagotovljena ustrezna izolacija.

Ključna elementa zaščite vodonosnikov sta pravilna vgradnja ohišja vrtine in kakovostno cementiranje. Ohišje mora biti nameščeno tako, da mehansko ločuje vrtino od okoliške formacije, medtem ko cement zagotavlja hidravlično tesnjenje. V praksi pa se pojavljajo številne težave, kot so:

- nepopolno zapolnjeni cementni prostori,
- nastanek mikrokanalov v cementu,
- neenakomerna porazdelitev cementa,
- slaba adhezija med cementom in ohišjem.

Takšne napake lahko povzročijo nastanek poti za migracijo fluidov, kar ogroža vodonosnike. Posebej problematične so situacije, kjer vrtina prečka več vodonosnikov z različnimi tlaki, saj lahko pride do medsebojnega mešanja voda.

Pomembna je tudi uporaba več zapornih barier, ki zagotavljajo dodatno varnost v primeru odpovedi ene od njih. Poleg tega se izvajajo različni nadzorni ukrepi, kot so meritve tlaka, testi tesnosti in spremljanje kakovosti podzemne vode.

Hidrogeološke posebnosti območja Lendave: na območju Lendave so vodonosniki pogosto plitvi in neposredno povezani s površinskimi vodami, kar pomeni, da so še posebej občutljivi na onesnaženje. Poleg tega se pojavljajo velike razlike v slanosti, kemični sestavi in temperaturi vode med posameznimi plastmi. To pomeni, da lahko že majhne napake pri vrtanju ali cementiranju povzročijo pomembne spremembe v kakovosti vode. Dodatno težavo predstavlja dejstvo, da so nekatere starejše vrtine na tem območju izvedene po starejših standardih, kar pomeni, da njihova zaščita vodonosnikov ni vedno ustrezna.

Onesnaženje vodonosnikov ima lahko dolgotrajne in pogosto nepopravljive posledice. Poleg neposrednega vpliva na kakovost pitne vode lahko pride tudi do vpliva na kmetijstvo, saj se podzemna voda pogosto uporablja za namakanje. Kontaminacija pitne vode z ogljikovodiki ali slanicami lahko povzroči neuporabnost vodnega vira, kar ima neposreden vpliv na lokalno prebivalstvo in lahko spremeni kemijsko sestavo tal in zmanjša njihovo rodovitnost. Poleg tega je sanacija podzemnih vod izjemno zahtevna in pogosto zelo draga. Zaradi počasnega pretoka podzemne vode se onesnaženje lahko širi na večja območja, hkrati pa ostane dolgo neopaženo. To pomeni, da se lahko problem odkrije šele, ko je že močno razvit.

Kritična ocena: zaščita vodonosnikov je pogosto obravnavana kot tehnični problem, vendar ima tudi izrazito okoljsko in družbeno dimenzijo. Po mojem mnenju je največja pomanjkljivost v tem, da se nadzor pogosto osredotoča na fazo vrtanja, medtem ko je dolgoročno spremljanje stanja vodonosnikov manj razvito. Poleg tega je problem tudi v omejeni razpoložljivosti podatkov o podzemnih vodah, kar otežuje natančno oceno tveganj. Zato bi bilo smiselno okrepiti hidrogeološke raziskave ter uvesti sistematično spremljanje kakovosti podzemnih voda. Prav tako bi bilo treba več pozornosti nameniti preventivi, zlasti pri načrtovanju vrtin in izbiri materialov.

3. LIKVIDACIJA

3.1. Pomen likvidacije

Likvidacija naftno-plinskih vrtin predstavlja tehnološko in zakonodajno reguliran proces trajnega zapiranja vrtine, katerega namen je preprečiti migracijo fluidov med geološkimi plastmi ter zaščititi okolje in ljudi. V Sloveniji je ta proces danes sistemsko urejen v okviru Zakona o rudarstvu, vendar je bil njegov razvoj postopen, zlasti v povezavi z opuščanjem naftno-plinske dejavnosti na območju severovzhodne Slovenije.

V obdobju med letoma 1999 in 2005 je bila likvidacija vrtin predvsem sanacijske narave, saj je šlo za odpravljanje posledic preteklega izkoriščanja. Postopki sicer niso bili bistveno drugačni kot danes, vendar so bili manj standardizirani in pogosto prilagojeni konkretnim terenskim razmeram. Tehnično je likvidacija že takrat temeljila na osnovnem principu izolacije posameznih geoloških plasti, pri čemer je bilo ključno preprečevanje prehajanja plinov in tekočin v podtalnico ali na površje.

Sodobni postopki likvidacije vrtin, ki se uporabljajo tudi kot referenčni standardi za razumevanje preteklih praks, so sestavljeni iz več jasno opredeljenih faz. Prva faza vključuje pripravo vrtine, kjer se odstrani vsa proizvodna oprema (cevi, črpalke, armatura) ter izvede čiščenje vrtine z uporabo posebnih fluidov, ki omogočajo stabilizacijo tlaka in odstranitev ostankov nafte ali plina. V tej fazi se opravi tudi ocena integritete vrtine, ki je ključna za načrtovanje nadaljnjih ukrepov (Andersen, 2024).

Osrednji del postopka predstavlja t. i. zapiranje z vgradnjo zapornih barier, kjer se v vrtino vgrajujejo cementni in mehanski čepi. Cementiranje je najpomembnejši tehnološki postopek, saj omogoča trajno tesnjenje vrtine. Cementni čepi se nameščajo na strateških globinah, predvsem nad produktivnimi plastmi ter v območjih vodonosnikov, pri čemer mora cementni sloj običajno segati več deset metrov nad in pod posamezno plastjo, da se zagotovi popolna izolacija. V primerih, kjer cementiranje ni zadostno, se uporabljajo tudi mehanski čepi, ki dodatno stabilizirajo zaporo.

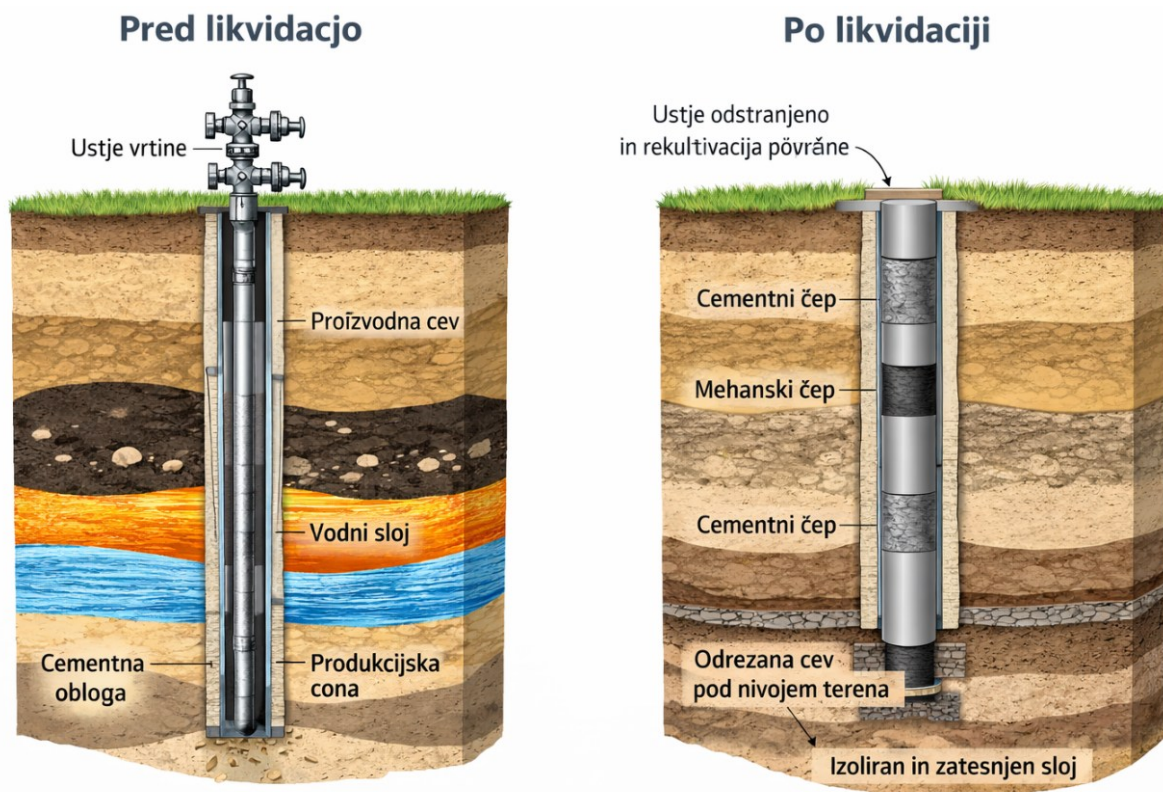
Pomembno načelo sodobnih postopkov je uporaba več zapornih barier, saj mora biti vsaka plast, ki vsebuje tekočine ali pline, izolirana od drugih plasti in površja. To načelo je uveljavljeno tudi v mednarodni praksi, kjer standardi organizacije American Petroleum Institute določajo zahteve za načrtovanje, izvedbo in preverjanje cementnih čepov ter zagotavljanje dolgoročne tesnosti vrtine. Poleg cementiranja je nujno tudi testiranje posameznih zapor (npr. tlačni preizkusi), s čimer se preveri njihova učinkovitost.

Po uspešni vgradnji zapornih elementov sledi zaključna faza, ki vključuje odstranitev ustja vrtine, rezanje ohišja pod nivojem terena ter rekultivacijo površine. Ta faza je ključna z vidika varstva okolja, saj se zemljišče vrne v prvotno stanje ali pripravi za novo rabo. V sodobni praksi se pogosto izvaja tudi naknadni monitoring, s katerim se spremlja morebitno uhajanje plinov ali spremembe v okolju po zaprtju vrtine.

Zakonodajno je danes postopek likvidacije v Sloveniji bistveno natančneje opredeljen kot v obravnavanem obdobju. Veljavna ureditev zahteva, da nosilec rudarske pravice pripravi rudarski projekt zapiranja, pridobi ustrezna dovoljenja ter zagotovi finančna sredstva za izvedbo likvidacije. Postopek poteka pod nadzorom države, pri čemer se po zaključku izvede tehnični pregled, ki potrdi ustreznost izvedenih del. Takšen pristop pomeni prehod od reaktivnega sanacijskega modela, značilnega za obdobje po letu 1999, k preventivnemu modelu, kjer je likvidacija načrtovana že v fazi projektiranja vrtine.

Primerjava kaže, da so osnovni tehnični postopki (cementiranje, izolacija plasti, odstranitev opreme) ostali enaki, vendar se je bistveno spremenil način njihovega upravljanja. Danes je

večji poudarek na standardizaciji, nadzoru in dolgoročni odgovornosti izvajalcev, kar zmanjšuje tveganja za okolje in povečuje varnost zaprtih vrtin. Tak razvoj odraža širši premik k trajnostnemu upravljanju naravnih virov in večji okoljski odgovornosti rudarske dejavnosti.



Slika 4: Slika naftne vrtine pred in po likvidaciji (vir: medmrežje)

Shematski prikaz prereza naftno-plinske vrtine pred in po postopku likvidacije. Aktivna vrtina (levo) vsebuje proizvodno kolono in omogoča pretok fluidov iz produktivnega horizonta. Po likvidaciji (desno) je vrtina zatesnjena z več zapornimi barierami, vključno s cementnimi in mehanskimi čepi, ki zagotavljajo hidravlično izolacijo med geološkimi plastmi. Ohišje vrtine je odrezano pod nivojem terena, nadzemni elementi so odstranjeni, površina pa sanirana in rekultivirana.

3.2. Potreba po likvidaciji vrtine

Potreba po likvidaciji naftno-plinskih vrtin izhaja iz več medsebojno povezanih okoljskih, varnostnih in prostorskih razlogov. Vrtine, ki niso več v uporabi, predstavljajo potencialno tveganje za podzemne vode, saj lahko delujejo kot umetni kanali, ki omogočajo migracijo ogljikovodikov, slanice in drugih tekočin med geološkimi plastmi. Takšni procesi lahko vodijo do dolgotrajnega onesnaženja vodonosnikov, ki so pogosto ključni vir pitne vode. Poleg tega lahko pride do uhajanja plinov, zlasti metana, kar prispeva k emisijam toplogrednih plinov in predstavlja varnostno tveganje zaradi možnosti eksplozij ali požarov. Likvidacija vrtin je zato nujna za preprečevanje teh vplivov ter za zagotavljanje dolgoročne stabilnosti podzemnega okolja.

Pomemben vidik predstavlja tudi fizična varnost in stabilnost prostora. Opuščene ali neustrezno zaprte vrtine lahko povzročijo posedanje tal, poškodbe infrastrukture ali predstavljajo neposredno nevarnost za ljudi in živali. S pravilno izvedeno likvidacijo se ta tveganja bistveno zmanjšajo, hkrati pa se omogoči rekultivacija površine in ponovna uporaba

zemljišča. To je še posebej pomembno v regijah z intenzivno rabo prostora, kot je Pomurje, kjer ima zemljišče pomembno kmetijsko in gospodarsko vrednost.

Kljub številnim prednostim pa likvidacija vrtin predstavlja tudi določene izzive in omejitve. Med ključne slabosti sodijo visoki stroški izvedbe, tehnična zahtevnost postopkov ter potreba po dolgoročnem nadzoru. Proces zahteva specializirano opremo, strokovno usposobljen kader ter natančno načrtovanje, kar lahko predstavlja finančno obremenitev za upravljavce. Poleg tega obstaja tveganje, da postopki ne bodo izvedeni optimalno, kar lahko vodi do poznejših okvar, kot so degradacija cementa ali korozija ohišja, in s tem do ponovnega pojava okoljskih tveganj.

Dodatno problematiko predstavlja dejstvo, da se negativni vplivi lahko pojavijo šele po daljšem časovnem obdobju, kar otežuje njihovo zaznavanje in sanacijo. Prav tako je v praksi pogosto prisoten problem neustreznega evidentiranja starejših vrtin, kar lahko oteži njihovo nadzorovanje in pravočasno ukrepanje. Kljub temu pa prednosti likvidacije bistveno presegajo njene slabosti, saj omogoča zmanjšanje okoljskih tveganj, zaščito vodnih virov, izboljšanje varnosti ter trajnostno upravljanje prostora.

Potrebo po likvidaciji dodatno opredeljuje zakonodaja, predvsem Zakon o rudarstvu (ZRud-1), ki določa obveznost zapiranja vrtin po prenehanju njihove uporabe, ter Zakon o varstvu okolja (ZVO-2), ki zahteva preprečevanje onesnaženja in sanacijo degradiranih območij. Likvidacija vrtin tako ni le tehnična in okoljska nujnost, temveč tudi zakonska obveznost, ki zagotavlja dolgoročno varstvo naravnih virov in zmanjšuje negativne vplive industrijske dejavnosti na okolje.

Likvidacija naftno-plinskih vrtin ni le teoretična zahteva zakonodaje, temveč se njena nujnost jasno kaže tudi na konkretnih primerih iz prakse, kot je območje Lendave. Na tem območju je bilo zaradi dolgoletnega izkoriščanja ogljikovodikov izvrtanih več sto vrtin, od katerih so mnoge po prenehanju proizvodnje ostale opuščene in potencialno nevarne za okolje. V Sloveniji se je prav zaradi teh tveganj konec 90. let začela sistematična sanacija vrtin.

Konkreten primer predstavlja sanacija več vrtin na naftno-plinskem polju Petišovci in v okolici (npr. vrtine Pt-2, Pt-5, Pt-7, Pt-12 ter Fi-5 in Fi-14), kjer so bile izvedene aktivnosti, kot so cementiranje, zapiranje vrtin in rekultivacija površine. Ti postopki so bili nujni, saj so opuščene vrtine predstavljale neposredno tveganje za okolje, predvsem zaradi možnosti prehajanja nafte, plina in slojnih vod med geološkimi plastmi ter potencialnega onesnaženja podtalnice. Sanacija je bila izvedena na podlagi predhodno pripravljenih rudarskih projektov za vsako posamezno vrtino, pri čemer je bilo treba upoštevati specifične geološke in tehnične pogoje (Ujma, 1999).

Pomembnost pravilne likvidacije vrtin potrjujejo tudi sodobni primeri iz istega območja. V primeru plinskega polja Petišovci so strokovnjaki opozorili, da bi nenadzorovana zaustavitev proizvodnje brez ustrezne sanacije lahko povzročila resne posledice, kot so onesnaženje podzemnih voda, povečano tveganje za požare ter nevarnost za zdravje ljudi in infrastrukturo. Takšne situacije jasno kažejo, da sama ustavitev črpanja ni dovolj, temveč je nujna celovita in strokovno izvedena likvidacija vrtin (Občina Lendava, 2025). Dodatno je bilo poudarjeno, da lahko prehitra ali nepravilno izvedena opustitev nadzora nad vrtinami vodi v nenadzorovane pojave, kar potrjuje tudi primer upravnih postopkov inšpekcije, kjer je bila zahtevana postopna sanacija ob stalnem monitoringu.

Na podlagi teh primerov je razvidno, da likvidacija vrtin ni zgolj formalna obveznost, temveč ključni ukrep za preprečevanje dolgoročnih negativnih vplivov na okolje. Opuščene in neustrezno sanirane vrtine lahko predstavljajo trajen vir tveganja, zato je njihovo sistematično zapiranje nujno za zaščito podzemnih voda, zmanjšanje emisij plinov ter zagotavljanje varnosti

prebivalstva. Prav izkušnje iz Lendave so pomembno prispevale k razvoju sodobnega zakonodajnega in tehničnega pristopa v Sloveniji, kjer je danes likvidacija vrtin obvezni del rudarskih projektov in poteka pod strogim nadzorom države.

Na podlagi analiz obstoječih primerov je mogoče ugotoviti, da predstavlja pravilna likvidacija vrtin enega ključnih ukrepov za zmanjševanje okoljskih tveganj na območjih nekdanje naftno-plinske dejavnosti. Dolgoročna varnost prostora je neposredno odvisna od kakovosti izvedenih sanacijskih postopkov in ustreznega nadzora po zaključku del.

3.3. Tehnični postopki likvidacije vrtin: cementiranje, zapiranje vrtin in rekultivacija površine

Likvidacija naftno-plinskih vrtin predstavlja eno izmed ključnih faz v življenjskem ciklu vrtine, saj zagotavlja trajno izključitev vrtine iz uporabe ter preprečevanje negativnih vplivov na okolje. Gre za kompleksen in tehnično zahteven proces, ki vključuje več zaporednih in medsebojno povezanih postopkov. Med najpomembnejše sodijo cementiranje, mehansko zapiranje vrtine ter rekultivacija površine. Ti postopki skupaj omogočajo trajno izolacijo geoloških plasti, preprečujejo migracijo fluidov in zmanjšujejo tveganja za podzemne vode, tla ter širše okolje.

Izvedba likvidacije vrtin mora biti skladna z veljavno zakonodajo in strokovnimi smernicami. V Sloveniji to področje ureja predvsem ZRud-1, ki določa obveznosti upravljavca pri zapiranju rudarskih objektov, vključno z zagotavljanjem stabilnosti, varnosti in trajne izolacije vrtin (npr. 68.–72. člen). Poleg tega ZVO-2 določa ukrepe za preprečevanje in sanacijo okoljskih škod ter obveznost vzpostavitve prvotnega stanja okolja po zaključku dejavnosti (npr. 15., 104. in 110. člen). Postopki likvidacije so dodatno podprti z mednarodnimi standardi, kot so priporočila Ameriškega naftnega inštituta (API), ki opredeljujejo dobre prakse za trajno zapiranje vrtin.

Cementiranje vrtin predstavlja temeljni tehnični postopek pri likvidaciji vrtin, saj omogoča vzpostavitev trajnih in neprepustnih zapor, ki preprečujejo migracijo tekočin ter plinov med geološkimi plastmi. Postopek vključuje vbrizgavanje cementne suspenzije v vrtino, kjer se po strditvi oblikujejo cementni čepi. Ti se nameščajo na ključnih globinah, zlasti v območjih, kjer vrtina prečka vodonosnike, produktivne sloje ali druge geološko pomembne horizonte.

Glavni namen cementnih čepov je vzpostaviti hidravlično izolacijo med posameznimi plastmi ter preprečiti vertikalni tok ogljikovodikov, slanice in drugih fluidov. Pri tem je pomembno, da cementni čep ustrezne dolžine prekriva tako zgornji kot spodnji del izolirane plasti, kar zagotavlja učinkovito tesnjenje. V sodobni praksi se pogosto uporablja več zapornih barier, pri čemer kombinacija več cementnih čepov bistveno povečuje zanesljivost sistema.

Kakovost cementiranja je ključnega pomena za dolgoročno stabilnost vrtine. Neustrezen izveden postopek lahko vodi do nastanka mikrokanalet ali razpok, skozi katere lahko pride do migracije plinov ali tekočin. Takšne okvare se pogosto pokažejo šele po daljšem časovnem obdobju, zato je nadzor nad izvedbo izjemno pomemben. V ta namen se izvajajo tlačni testi, meritve tesnosti ter druge metode nadzora. Zakonodaja zahteva tudi ustrezno dokumentiranje postopkov in nadzor nad izvedbo, kar omogoča sledljivost in preverjanje skladnosti z zahtevami (ZRud-1, 69. člen; API, 2018).

Zapiranje vrtine predstavlja širši sklop tehničnih postopkov, znotraj katerega je cementiranje osrednji element. Poleg cementnih čepov se uporabljajo tudi mehanske zapore, kot so t. i. *bridge plugs*, ki zagotavljajo dodatno mehansko stabilnost in služijo kot podpora cementnim barieram. Ti elementi omogočajo večstopenjsko zapiranje vrtine in povečujejo varnost sistema.

Postopek zapiranja vključuje tudi odstranitev proizvodne opreme, kot so proizvodne cevi, ventili in črpalke, ter pripravo vrtine na vgradnjo zapornih elementov. Ključno načelo pri zapiranju vrtin je uporaba več neodvisnih zapornih barier, pri čemer mora biti vsaka plast, ki

vsebuje fluide, ustrezno izolirana. Takšen pristop zagotavlja redundanco sistema in bistveno zmanjšuje tveganje za puščanje ogljikovodikov ali drugih nevarnih snovi.

Po vgradnji zapornih elementov se izvajajo preizkusi tesnosti, s katerimi se preveri učinkovitost zapiranja. Zaključna faza vključuje odstranitev ustja vrtine oziroma rezanje ohišja pod nivojem terena, kar preprečuje fizično izpostavljenost vrtine na površini in zmanjšuje tveganje za mehanske poškodbe ali nenadzorovane izpuste. V skladu z zakonodajo mora biti vrtina po zaprtju trajno stabilna, varna in brez negativnih vplivov na okolje, pri čemer so predpisani tudi kontrolni pregledi in spremljanje stanja po zaprtju (ZRud-1, 70. in 72. člen).

Z vidika varstva okolja je pravilno zapiranje vrtin ključnega pomena, saj nepravilno izvedeni postopki lahko vodijo do puščanja ogljikovodikov, kontaminacije podzemnih vod ter emisij toplogrednih plinov, zlasti metana. Takšni vplivi lahko trajajo desetletja, zato je kakovost izvedbe bistvena.

Rekultivacija površine predstavlja zaključni del likvidacije vrtine in je usmerjena v obnovo okolja ter ponovno vključitev zemljišča v rabo. Postopek vključuje odstranitev vseh nadzemnih objektov, kot so betonske ploščadi, cevovodi in druga infrastruktura, ter sanacijo morebitnega onesnaženja.

Sanacija tal lahko vključuje odstranitev kontaminiranih plasti, dodajanje rodovitne zemlje ter vzpostavitev vegetacijskega pokrova. Poseben poudarek je na obnovi zgornje humusne plasti, ki je ključna za ponovno vzpostavitev rodovitnosti tal. V primeru prisotnosti onesnaženja z ogljikovodiki ali slanicami je treba izvesti dodatne ukrepe, kot sta biološka sanacija ali kemična obdelava tal.

Pomemben vidik rekultivacije je tudi zagotavljanje stabilnosti tal, zlasti če je območje namenjeno nadaljnji rabi, kot sta kmetijstvo ali gradnja. V takih primerih je treba preprečiti posedanje ter zagotoviti ustrezne geotehnične lastnosti tal.

Rekultivacija mora biti izvedena v skladu z zahtevami ZVO-2, ki določa obveznost sanacije degradiranih območij in preprečevanja nadaljnjega onesnaženja (npr. 15. in 104. člen). Pomemben del postopka je tudi dolgoročno spremljanje stanja, saj se lahko vplivi na okolje pokažejo z določenim časovnim zamikom.

Celostni vidik likvidacije vrtin so opisani postopki cementiranja, zapiranja vrtin in rekultivacije površine, ki skupaj tvorijo celovit sistem likvidacije vrtin. Ta temelji na načelih varnosti, trajnosti in varstva okolja. Njihova pravilna izvedba je ključna za preprečevanje dolgoročnih negativnih vplivov, kot so onesnaženje podzemnih vod, degradacija tal ter emisije toplogrednih plinov.

Poleg tehničnih vidikov ima pomembno vlogo tudi zakonodajni okvir, ki določa obveznosti upravljavcev in zagotavlja nadzor nad izvajanjem postopkov. Skladnost z nacionalnimi predpisi in mednarodnimi standardi predstavlja temelj za varno in trajnostno zapiranje vrtin. V praksi to pomeni, da morajo biti vsi postopki skrbno načrtovani, izvedeni in dokumentirani, hkrati pa mora biti zagotovljeno tudi dolgoročno spremljanje stanja.

Celostni pristop k likvidaciji vrtin tako omogoča ne le preprečevanje okoljskih tveganj, temveč tudi ponovno uporabo prostora, kar je še posebej pomembno v regijah z intenzivno rabo zemljišč, kot je Pomurje. S tem se zagotavlja trajnostno upravljanje naravnih virov ter zmanjšuje vpliv preteklih industrijskih dejavnosti na okolje.

4. VRTINE IN NJIHOVE ZNAČILNOSTI

Raziskovanje in pridobivanje ogljikovodikov predstavlja enega ključnih segmentov globalnega energetskega sistema. Osnovni infrastrukturni element pri pridobivanju teh naravnih virov so vrtine, ki omogočajo dostop do rezervoarjev ogljikovodikov v zemeljski skorji. Vrtine, namenjene pridobivanju ogljikovodikov, se običajno delijo na plinske in naftne vrtine, pri čemer se ta klasifikacija nanaša predvsem na prevladujočo vrsto fluida, ki je v rezervoarju in se iz vrtine proizvaja. Čeprav je osnovna tehnologija vrtanja pri obeh vrstah vrtin podobna, se med plinskimi in naftnimi vrtinami pojavljajo pomembne razlike, ki izhajajo iz geoloških značilnosti ležišča, fizikalno-kemijskih lastnosti rezervoarskih fluidov ter tehnoloških zahtev proizvodnje in upravljanja rezervoarja. (Hyne, 2012)

Nastanek naftnih in plinskih ležišč je povezan z dolgoročnimi geološkimi procesi, ki potekajo v sedimentnih bazenih. Organska snov, ki izvira predvsem iz ostankov planktona, alg in mikroorganizmov, se je v geološki preteklosti kopičila na dnu morij in jezer, se postopoma prekrivala z mlajšimi sedimentnimi plastmi in pogrezala. S povečevanjem globine pogrezanja se povečujeta tlak in temperatura, kar povzroči toplotno razgradnjo organske snovi in nastanek ogljikovodikov. Ta proces poteka v izvornih kamninah, ki so običajno bogate z organskim materialom, najpogosteje v glinavcih ali skrilavcih. Nastali ogljikovodiki zaradi svoje manjše gostote migrirajo skozi prepustne kamnine proti višjim geološkim plastem, dokler ne naletijo na geološko strukturo, ki omogoča njihovo akumulacijo. Takšna struktura je sestavljena iz porozne in prepustne rezervoarske kamnine, ki omogoča shranjevanje fluida, ter neprepustne krovne kamnine, ki preprečuje nadaljnjo migracijo ogljikovodikov proti površju (Speight, 2019).

V rezervoarjih ogljikovodikov se lahko pojavljajo različne faze fluida, predvsem plinasta in tekoča faza ogljikovodikov. Zaradi razlik v gostoti med posameznimi fluidi se v rezervoarju vzpostavi gravitacijska razporeditev. Najlažji je plin, ki se kopiči v zgornjem delu rezervoarja in tvori tako imenovano plinsko kapo. Pod plastjo plina je plast tekočih ogljikovodikov oziroma nafte, medtem ko je v najnižjem delu rezervoarja pogosto prisotna formacijska voda. Ta razporeditev ima pomembno vlogo pri določanju lokacije vrtin in načrtovanju strategije pridobivanja, saj lahko vrtina, ki prodre v zgornji del rezervoarja, proizvaja predvsem plin, medtem ko vrtina, ki prodre v območje tekočih ogljikovodikov, proizvaja predvsem nafto.

Naftna vrtina je vrtina, katere primarni namen je pridobivanje tekočih ogljikovodikov iz rezervoarja. Surova nafta predstavlja kompleksno mešanico različnih ogljikovodikov, ki so pri standardnih pogojih v tekočem stanju. Fizikalne lastnosti nafte, kot sta viskoznost in gostota, pomembno vplivajo na dinamiko pretoka v rezervoarju ter na transport fluida skozi vrtino. V rezervoarjih je tekoča faza pogosto prisotna skupaj z raztopljenim zemeljskim plinom, vodo in drugimi anorganskimi primesmi. Zaradi relativno visoke viskoznosti nafte je njen pretok skozi porozni medij počasnejši kot pretok plina. Posledično je pri številnih naftnih vrtinah treba uporabiti sisteme umetnega dviga, ki omogočajo transport tekočine na površje. Geološko so naftni rezervoarji v poroznih in prepustnih kamninah, kot so peščenjaki ali karbonatne kamnine (apnenec, dolomit), ki služijo kot akumulacijski medij. Nad rezervoarjem se običajno nahaja krovna, neprepustna plast (*seal*), ki preprečuje vertikalno migracijo ogljikovodikov na površje in omogoča nastanek geoloških pasti ter s tem kopičenje ogljikovodikov v rezervoarju. Med najpogosteje uporabljenimi tehnologijami so mehanske črpalke z nihajno ročico, električne potopne črpalke in sistemi plinskega dviga, ki zmanjšujejo gostoto tekočinskega stolpca v vrtini ter omogočajo učinkovitejši dvig fluida (Ahmed, 2019).

Plinska vrtina je namenjena pridobivanju zemeljskega plina, ki je pri standardnih pogojih v plinastem stanju in ga sestavljajo predvsem metan ter manjši deleži drugih lahkih ogljikovodikov, kot so etan, propan in butan. Zemeljski plin se lahko v rezervoarju pojavlja kot prost plin ali pa je delno raztopljen v tekočih ogljikovodikih. Plin ima bistveno nižjo gostoto in

visoko stisljivost, kar vpliva na njegove tokovne lastnosti v rezervoarju. Zaradi visokega rezervoarskega tlaka in nizke gostote plin pogosto samodejno teče proti površju brez potrebe po mehanskih črpalnih sistemih. Ta pojav se imenuje naravna produkcija. Kljub temu pa plinske vrtine zahtevajo natančno upravljanje tlaka in pretoka, saj lahko nenadzorovan izbruh plina predstavlja resno varnostno tveganje. V številnih konvencionalnih ležiščih zemeljski plin tvori nad plasti nafte tako imenovano plinsko kapo, ki je zgoraj zaradi nižje gostote. Poleg tega pa obstajajo tudi samostojna plinska ležišča, v katerih tekočih ogljikovodikov ni. Zato so plinske vrtine pogosto opremljene z naprednimi sistemi za nadzor tlaka in varnostnimi ventili, ki preprečujejo nenadzorovan izpust fluida (Speight, 2019).

Postopek vrtanja naftnih in plinskih vrtin je v osnovi enak in temelji na rotacijskem vrtanju. Pri tem vrtalni sveder, ki je nameščen na koncu vrtalne kolone, prodira skozi geološke plasti. Med vrtanjem se uporablja vrtalna tekočina, ki ima več funkcij: stabilizira stene vrtine, hladi vrtalni sveder, prenaša izrezani material na površje ter uravnava tlak v vrtini. Ko vrtina doseže določeno globino, se v vrtino vstavijo jeklene zaščitne cevi, ki se cementirajo v steno vrtine. Ta postopek zagotavlja mehansko stabilnost vrtine ter preprečuje migracijo fluidov med različnimi geološkimi plastmi. Po zaključku vrtanja sledi faza dokončanja vrtine, v kateri se vrtina pripravi za proizvodnjo z namestitvijo proizvodne opreme, kot so proizvodne cevi, ventili in sistemi za nadzor pretoka (Hyne, 2012). Oba procesa vključujeta rotacijsko vrtanje, umestitev in cementiranje zaščitnih cevi ter vzpostavitev površinskega proizvodnega sistema, razlikujeta pa se pri dokončanju vrtine in načinu proizvodnje. Pri naftnih vrtinah je pogosto nujno zagotavljanje umetnega dviga, ker se tlak v rezervoarju s časom zmanjšuje, kar onemogoča samodejno dotok tekočine na površje. Umetni dvig se realizira z različnimi sistemi, kot so potopne črpalke, batne črpalke ali plinsko dviganje, ki omogočajo učinkovito dvigovanje tekočine v času proizvodne faze. Nasprotno pa pri plinskih vrtinah zaradi nižje gostote in običajno višjega tlaka v rezervoarju plin pogosto samodejno teče na površje (samodejna produkcija), čeprav je potrebno skrbno upravljanje pretoka in tlaka zaradi stisljivosti plina ter varnostnih tveganj (Ahmed, 2019).

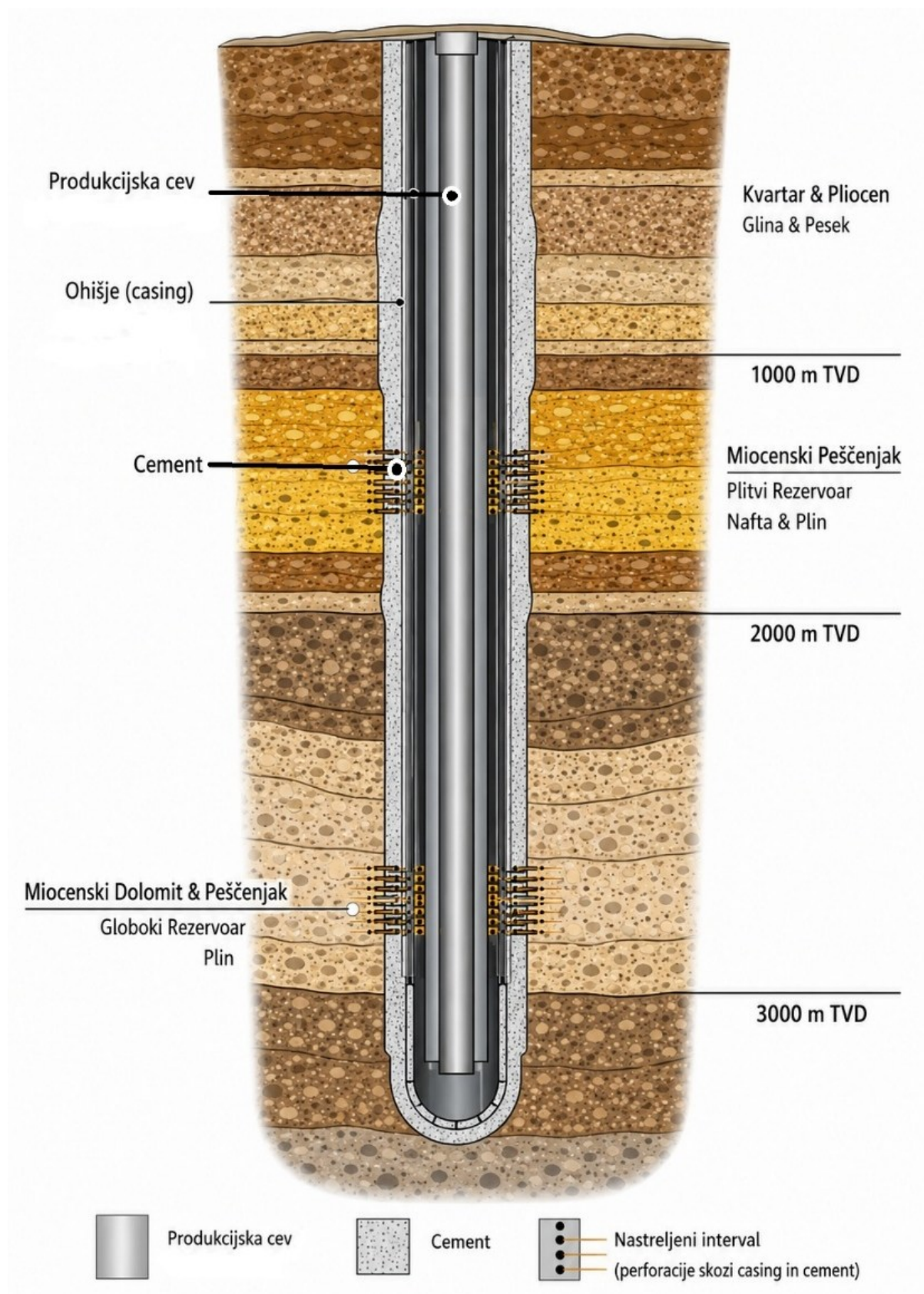
Poleg razlik v načinu proizvodnje obstajajo tudi pomembne razlike v površinski infrastrukturi. Naftne vrtine so običajno povezane s separacijskimi sistemi, ki omogočajo ločevanje nafte, plina in vode. Ločeni produkti se nato transportirajo po cevovodih ali skladiščijo v rezervoarjih. Plinske vrtine pa so običajno povezane z zbirnimi plinovodi, ki transportirajo plin do kompresorskih postaj in predelovalnih obratov. V teh obratih se plin očisti nečistoč, kot so voda, ogljikov dioksid in vodikov sulfid, ter pripravi za distribucijo v energetska omrežja.

V praksi obstajajo tudi rezervoarji, ki vsebujejo tako plin kot nafto. V takšnih primerih vrtine proizvajajo večfazni tok, ki vključuje plin, tekoče ogljikovodike in vodo. Upravljanje takšnih vrtin zahteva posebno pozornost, saj spremembe tlaka v rezervoarju lahko povzročijo premikanje kontaktnih ploskev med posameznimi fazami. Nepravilno upravljanje lahko povzroči prezgodnji vdor plina ali vode v vrtino, kar lahko zmanjša učinkovitost proizvodnje. Zato je pri načrtovanju in upravljanju takšnih rezervoarjev treba uporabljati napredne metode rezervoarskega inženirstva, ki omogočajo optimalno izkoriščanje ogljikovodikovih virov (Ahmed, 2019).

V praksi se vrtine ne načrtujejo vnaprej kot strogo »plinske« ali »naftne«, ampak je končna klasifikacija odvisna od dejanskega fluida, ki ga vrtina odkrije med in po vrtanju. Če rezervoar vsebuje predvsem tekoče ogljikovodike, govorimo o naftni vrtini, če pa prevladuje plin, gre za plinsko vrtino. Pogosto pa se ti dve vrsti pojavljata skupaj, saj številna konvencionalna ležišča vsebujejo tako plin kot nafto, kar zahteva integriran pristop pri načrtovanju, monitoringu in proizvodnem upravljanju. V takšnih primerih se iz vrtine lahko hkrati proizvajata plin in nafta, kar pomeni, da mora površinska oprema vključevati separacijske sisteme, ki ločujejo plin, tekočo fazo in vodo, preden se ti odvedejo v nadaljnjo obdelavo (Speight, 2019).

Razlikovanje med plinskimi in naftnimi vrtinami na terenu ni vedno neposredno vidno zgolj skozi površinsko opremo, saj ima oboje pogosto podoben vrtalni in varnostni sistem. Kljub temu pa se opazne razlike kažejo v proizvodnih in dvigalnih napravah; naftne vrtine imajo pogostejše mehanske naprave za dvig tekočine, medtem ko plinske vrtine zahtevajo kompleksnejši nadzor tlaka in pretoka zaradi narave plina kot stisljive snovi. Prav tako imajo plinske vrtine običajno dodatne varnostne sisteme za preprečevanje nevarnosti izbruha in za upravljanje visokih pritiskov ter hitrega raztezanja plina. Eden največjih naftnih rezervoarjev na svetu je Ghawar Oil Field v Savdski Arabiji, kjer prevladujejo vrtine, namenjene pridobivanju tekočih ogljikovodikov iz obsežnih karbonatnih rezervoarjev. Nasprotno pa je Groningen Gas Field na Nizozemskem primer velikega plinskega polja, kjer so vrtine zasnovane predvsem za pridobivanje zemeljskega plina iz poroznih peščenjakov.

Na podlagi navedenega je mogoče zaključiti, da se plinske in naftne vrtine razlikujejo predvsem glede na fizikalne lastnosti rezervoarskih fluidov, dinamike pretoka v rezervoarju ter tehnološke zahteve proizvodnje. Medtem ko naftne vrtine pogosto zahtevajo uporabo sistemov umetnega dviga zaradi viskoznosti in gostote tekočine, plinske vrtine običajno izkoriščajo naravni rezervoarski tlak za transport plina na površje. Kljub tem razlikam pa obe vrsti vrtin temeljita na podobnih načelih vrtanja in konstrukcije vrtin, kar omogoča učinkovito izkoriščanje ogljikovodikovih virov v različnih geoloških okoljih.



Slika 5: Prikaz prereza neznane vrtnine Pg (vir: lastna izdelava s pomočjo Canve)

4.1. Življenjski cikel naftno-plinske vrtine

Življenjski cikel naftno-plinske vrtine predstavlja celovit in zaporedno strukturiran proces, ki zajema vse faze od začetnega raziskovanja do končne likvidacije vrtine ter morebitne ponovne uporabe. Gre za kompleksen sistem tehničnih, ekonomskih in okoljskih aktivnosti, katerih skupni cilj je varno, učinkovito in trajnostno izkoriščanje ogljikovodikov. V sodobnem inženirskem pristopu se življenjski cikel vrtine obravnava kot integriran proces, pri katerem so vse faze medsebojno povezane, pri čemer se že v začetnih fazah načrtujejo tudi zaključne aktivnosti, kot sta zapiranje in sanacija.

Začetna faza življenjskega cikla naftno-plinskega ležišča je raziskovanje, katerega namen je identifikacija potencialnih ležišč ogljikovodikov ter ocena njihovega gospodarskega potenciala. Ta faza vključuje uporabo različnih metod, kot so geološko kartiranje, seizmične raziskave in vrtanje raziskovalnih vrtin. Poseben poudarek je na interpretaciji geofizikalnih podatkov, ki omogočajo vpogled v strukturo podzemnih plasti. Na podlagi pridobljenih rezultatov se sprejme odločitve o nadaljnjem razvoju nahajališča, pri čemer ima pomembno vlogo tudi analiza tveganj, saj so raziskovalne aktivnosti povezane z visoko stopnjo negotovosti.

V fazi razvoja nahajališča se oblikuje celostna strategija izkoriščanja, ki vključuje načrtovanje razporeditve vrtin, izbiro tehnologije vrtanja ter določitev potrebne površinske infrastrukture. Ključni elementi te faze so optimizacija števila in lokacije vrtin, ocena proizvodnega potenciala ter upoštevanje okoljskih omejitev. Pomemben del razvoja predstavlja tudi priprava projektne dokumentacije, ki vključuje tudi presojo vplivov na okolje ter opredelitev ukrepov za zmanjševanje negativnih vplivov.

Sledi faza vrtanja in dokončanja vrtine, ki predstavlja tehnično najzahtevnejši del življenjskega cikla. Vrtanje se izvaja z rotacijskimi metodami, pri čemer je treba zagotavljati stabilnost vrtine in nadzor nad tlakom. Ključno vlogo ima vrtalna tekočina, ki omogoča hlajenje orodja, transport izrezanega materiala ter uravnavanje tlaka v vrtini. Po doseženi ciljni globini se v vrtino vgradijo zaščitne cevi (ohišje), ki se cementirajo, kar zagotavlja mehansko stabilnost in izolacijo posameznih geoloških plasti. Dokončanje vrtine vključuje namestitev proizvodne opreme ter pripravo vrtine na obratovanje, pri čemer se posebna pozornost namenja zagotavljanju varnosti in dolgoročne integritete vrtine.

Faza proizvodnje predstavlja osrednji in časovno najdaljši del življenjskega cikla vrtine. V tej fazi se ogljikovodiki črpajo iz rezervoarja na površje, pri čemer je dinamika proizvodnje odvisna od lastnosti rezervoarja, tlaka in fizikalnih značilnosti fluida. Na začetku je proizvodnja pogosto visoka zaradi naravnega rezervoarskega tlaka, sčasoma pa se ta zmanjšuje, kar vodi do upadanja proizvodnje. Za ohranjanje ali povečanje proizvodnje se uporabljajo različne metode, kot so sekundarne in terciarne metode pridobivanja, vključno z vbrizgavanjem vode, plina ali kemikalij. V tej fazi je ključnega pomena stalno spremljanje delovanja vrtine, saj omogoča optimizacijo proizvodnje in preprečevanje tehničnih težav.

Ko proizvodnja postane ekonomsko neupravičena ali tehnično neizvedljiva, sledi faza opustitve in likvidacije vrtine. Ta faza vključuje trajno zaprtje vrtine z uporabo cementnih in mehanskih zapornih elementov, katerih namen je preprečiti migracijo fluidov med geološkimi plastmi in proti površju. Likvidacija vrtine je ključnega pomena za varstvo okolja, saj neustrezno zaprte vrtine lahko predstavljajo dolgoročno tveganje za podzemne vode, tla in atmosfero. Postopek vključuje tudi odstranitev nadzemne infrastrukture ter rekultivacijo površine, s čimer se območje vrne v prvotno stanje ali prilagodi novi rabi.

V sodobnem kontekstu se življenjski cikel vrtine vse pogostejše razširja tudi na fazo ponovne uporabe. Opuščene vrtine lahko predstavljajo pomemben vir za nove energetske ali okoljske namene, kot so geotermalna raba, skladiščenje plinov ali monitoring podzemnih procesov.

Takšen pristop omogoča učinkovitejšo izrabo obstoječe infrastrukture ter zmanjšuje potrebo po novih posegih v prostor.

Celoten življenjski cikel naftno-plinske vrtine zahteva interdisciplinaren pristop, ki vključuje znanja iz geologije, rudarstva, strojništva, kemije in okoljskih ved. Učinkovito upravljanje vseh faz je ključno za zagotavljanje varne oskrbe z energijo, ekonomske uspešnosti projektov ter dolgoročne zaščite okolja. Prav zaradi tega se sodobni pristopi vse bolj usmerjajo v celostno načrtovanje, kjer se tehnični in okoljski vidiki obravnavajo enakovredno skozi celoten življenjski cikel.

4.2. Tehnične značilnosti naftnih in plinskih vrtin

4.2.1. Migracija plina po anulusih

Migracija plina po anulusih (angl. *annular gas migration*) predstavlja enega ključnih problemov pri zagotavljanju dolgoročne integritete naftno-plinskih vrtin. Gre za pojav nenadzorovanega premikanja plina vzdolž obročnega prostora med različnimi konstrukcijskimi elementi vrtine ali med ohišjem vrtine in okoliško kamnino. Ta obročni prostor, imenovan anulus, je praviloma zapolnjen s cementnim plaščem, katerega osnovna funkcija je zagotavljanje mehanske stabilnosti vrtine ter hidravlične izolacije med posameznimi geološkimi plastmi. V primeru, da ta izolacija ni popolna ali se sčasoma poslabša, lahko plin migrira skozi anulus proti površju ali v druge geološke horizonte, kar predstavlja resno tveganje za okolje in varnost.

Nastanek in mehanizmi migracije plina

Migracija plina po anulusih je kompleksni pojav, ki je posledica kombinacije geoloških, fizikalnih in tehničnih dejavnikov. Najpogostejši vzrok za nastanek migracijskih poti je nepopolno cementiranje vrtine. Med procesom cementiranja se lahko pojavijo nepravilnosti, kot so mikrokanali, razpoke ali nepopolna zapolnitev prostora med ohišjem in steno vrtine. Posebej kritičen je pojav t. i. mikroanulusa (*micro-annulus*), ki nastane zaradi krčenja cementa med strjevanjem ali zaradi slabega oprijema med cementom in kovinskim ohišjem. Takšne mikroskopske reže lahko omogočajo prehajanje plina, zlasti pod vplivom razlik tlakov.

Pomemben dejavnik pri nastanku migracije plina so tudi spremembe tlaka in temperature, ki delujejo na vrtino skozi njen življenjski cikel. Med proizvodnjo, ustavitvijo ali zapiranjem vrtine lahko pride do dinamičnih sprememb, ki povzročajo raztezanje ali krčenje materialov, kar dodatno prispeva k nastanku razpok v cementnem plašču. Poleg tega lahko mehanske obremenitve, kot so posedanje tal ali napetosti v geoloških plasteh, vplivajo na integriteto vrtine.

Migracija plina se običajno odvija po poti najmanjšega upora. To pomeni, da plin iz rezervoarja ali iz plinske kape vstopi v anularni prostor in se premika navzgor proti površju ali lateralno v druge prepustne plasti. Pri tem lahko plin prehaja skozi cement, ob robu ohišja ali skozi razpoke v okoliški kamnini. Hitrost in obseg migracije sta odvisna od tlaka v rezervoarju, lastnosti plina ter geometrije in stanja vrtine.

Vpliv na okolje in varnost

Migracija plina po anulusih predstavlja pomembno tveganje z vidika varstva okolja in varnosti. Eden izmed najpomembnejših vidikov je uhajanje metana v atmosfero. Metan je močan toplogredni plin, katerega vpliv na globalno segrevanje je bistveno večji kot pri ogljikovem dioksidu v krajšem časovnem obdobju. Nenadzorovane emisije metana iz vrtin lahko zato pomembno prispevajo k podnebnim spremembam.

Poleg vpliva na podnebje obstaja tudi neposredno tveganje za varnost ljudi in infrastrukture. V primeru, da plin migrira do površja in se kopiči v zaprtih prostorih, lahko pride do eksplozije ali

požara. Takšni primeri so bili zabeleženi v različnih delih sveta, zlasti na območjih z gosto poseljenostjo ali v bližini industrijskih objektov.

Migracija plina lahko vpliva tudi na podzemne vode. Če plin ali spremljajoče snovi prodrejo v vodonosnike, lahko pride do spremembe kemijske sestave vode ali do fizičnih sprememb, kot je pojav mehurčkov plina. To lahko vpliva na kakovost pitne vode in predstavlja dodatno okoljsko tveganje.

Pomen cementiranja in večbariernega sistema

Za preprečevanje migracije plina je ključnega pomena kakovostno izvedeno cementiranje. Cementni plašč mora zagotoviti popolno zapolnitev anularnega prostora ter dobro vezavo na ohišje vrtine in okoliško kamnino. V sodobni praksi se uporabljajo posebne cementne mešanice, ki morajo preprečevati krčenje, ali celo povečevati volumen cementa po njegovi strditvi. Klasično se povečanje volumna doseže z dodatkom bentonita, a ob tem upade trdnost in se poveča čas vezave. Novejši, vendar že desetletja stari dodatki premoščajo te pomanjkljivosti.

Poleg cementiranja je pomembna tudi uporaba več zapornih barier. Načelo večbariernega sistema temelji na tem, da mora biti vsak potencialni tokovni kanal zaprt z več neodvisnimi zaporami. To pomeni, da tudi v primeru odpovedi ene bariere druge še vedno zagotavljajo zaščito. Takšen pristop je danes standard v industriji in je predpisan v številnih tehničnih smernicah.

Kakovost cementnega plašča se preverja z različnimi metodami, kot so geofizikalne meritve (npr. cementni logi) in tlačni testi. Te metode omogočajo oceno tesnosti in homogenosti cementa ter odkrivanje morebitnih napak, ki bi lahko povzročile migracijo plina.

Migracija plina v fazi opustitve in likvidacije vrtin

Posebno pozornost je treba nameniti migraciji plina v fazi opustitve in likvidacije vrtin. V tej fazi se vrtina trajno zapre, vendar lahko neustrezno izvedeni postopki povečajo tveganje za dolgoročno uhajanje plina. Če cementni čepi niso pravilno nameščeni ali ne zagotavljajo popolne izolacije, lahko plin še naprej migrira po anulusih.

V starejših vrtinah, kjer so bile uporabljene manj napredne tehnologije, je tveganje za migracijo še posebej veliko. Sčasoma lahko pride do degradacije materialov, kar dodatno poslabša stanje vrtine. Zato sodobni standardi zahtevajo, da se pri likvidaciji zagotovi več zapornih barier, ki trajno izolirajo vse produktivne in potencialno nevarne plasti.

V kontekstu Slovenije, zlasti na območju Lendave, kjer obstaja večje število starejših vrtin, je ta problematika še posebej pomembna. Neustrezno sanirane vrtine lahko predstavljajo dolgoročno tveganje za okolje, zato je kakovost izvedbe likvidacije ključnega pomena.

Preventivni ukrepi in nadzor

Za zmanjšanje tveganja migracije plina je treba izvajati celovit pristop, ki vključuje tako preventivne kot nadzorne ukrepe. Med ključne preventivne ukrepe sodijo kakovostno načrtovanje vrtine, uporaba ustreznih materialov ter natančna izvedba cementiranja. Pomembno je tudi stalno spremljanje stanja vrtine skozi celoten življenjski cikel.

Nadzor vključuje redne preglede, meritve tlaka in uporabo naprednih diagnostičnih metod. V primeru zaznanih nepravilnosti je potrebno pravočasno ukrepanje, ki lahko vključuje dodatno cementiranje ali druge sanacijske posege.

Migracija plina po anulusih (angl. *annular gas migration*) predstavlja pojav nenadzorovanega premikanja plina vzdolž obročnega prostora med različnimi cevmi vrtine ali med ohišjem vrtine in okoliško kamnino. Anulus je prostor med dvema cevema (npr. med proizvodno cevjo in ohišjem) ali med ohišjem in steno vrtine, ki je običajno zapolnjen s cementom, katerega naloga je zagotavljanje hidravlične izolacije med geološkimi plastmi. V primeru, da cementni plašč ni popolnoma tesen ali pride do njegove degradacije, lahko plin migrira skozi ta prostor proti površju ali v druge geološke plasti.

Glavni vzrok za migracijo plina po anulusih je nepopolno ali nekakovostno cementiranje. Med procesom cementiranja lahko pride do nastanka mikrokanalov, razpok ali t. i. mikroanulusa (*micro-annulus*), ki omogočajo pretok plina. Takšne nepravilnosti lahko nastanejo zaradi krčenja cementa med strjevanjem, slabe adhezije med cementom in ohišjem ali zaradi mehanskih obremenitev, ki delujejo na vrtino med njenim obratovanjem. Poleg tega lahko na pojav vplivajo tudi spremembe tlaka in temperature, ki povzročajo raztezanje in krčenje materialov ter s tem nastanek poti za migracijo plina.

Migracija plina predstavlja resno tveganje z vidika varnosti in varstva okolja. Če plin doseže površje, lahko povzroči emisije metana, ki je močan toplogredni plin, ali pa celo eksplozijsko nevarnost v primeru akumulacije v zaprtih prostorih. Prav tako lahko plin migrira v vodonosne plasti, kar lahko vpliva na kakovost podzemne vode. Posebej problematične so stare ali opuščene vrtine, kjer je integriteta cementnega plašča pogosto slabša, kar povečuje verjetnost uhajanja plina.

Z vidika inženirskega načrtovanja je zato ključnega pomena zagotavljanje kakovostnega cementiranja ter uporaba več zapornih barier, ki zmanjšujejo tveganje za nastanek migracijskih poti. V sodobni praksi se uporabljajo napredne cementne mešanice, ki zmanjšujejo krčenje in izboljšujejo oprijem, ter metode nadzora, kot so tlačni testi in geofizikalne meritve (npr. *cement bond log* – CBL), s katerimi se preverja kakovost cementnega plašča. Poleg tega je pomemben tudi dolgoročni monitoring vrtin, zlasti po njihovem zaprtju, saj se migracija plina lahko pojavi tudi več let po prenehanju proizvodnje.

Migracija plina po anulusih je tesno povezana s problematiko likvidacije vrtin, saj neustrezno izvedena likvidacija lahko poveča tveganje za pojav tega procesa. Prav zato sodobni standardi zahtevajo, da se pri zapiranju vrtin zagotovi popolna in trajna izolacija vseh potencialno produktivnih plasti. Ustrezno izvedeni cementni čepi in večbariarni sistemi predstavljajo ključno zaščito pred migracijo plina ter zagotavljajo dolgoročno varnost vrtine.

4.3. Možnosti ponovne uporabe vrtin

Ponovna uporaba opuščenih naftno-plinskih vrtin predstavlja pomemben vidik trajnostnega upravljanja prostora in energetskih virov, saj omogoča izkoriščanje obstoječe infrastrukture za nove namene ter hkrati zmanjšuje potrebo po novih posegih v okolje. V sodobnem pristopu k zapiranju vrtin se vse bolj uveljavlja koncept *repurposing*, pri katerem se vrtine ne obravnavajo zgolj kot okoljsko breme, temveč kot potencialen vir za nadaljnjo rabo (Interreg Central Europe, 2026).

Ena najpomembnejših možnosti ponovne uporabe vrtin je njihova vključitev v geotermalne sisteme. Opuščene vrtine lahko služijo kot dostop do globljih geoloških plasti, kjer je prisotna toplotna energija, ki jo je mogoče izkoristiti za ogrevanje ali proizvodnjo električne energije. Takšna raba je še posebej relevantna v severovzhodni Sloveniji, kjer geološke razmere omogočajo izkoriščanje geotermalne energije. V tem kontekstu so nekdanje vrtine na območju Lendave in Petišovcev potencialno primerne za preusmeritev v geotermalne vrtine, saj že zagotavljajo dostop do globokih sedimentnih bazenov (Interreg Central Europe, 2026).

Poleg geotermije se vrtine lahko uporabljajo tudi za namene spremljanja stanja okolja. Tako imenovane opazovalne vrtine omogočajo monitoring podzemnih voda, tlakovnih razmer ali morebitnega uhajanja plinov. Takšen pristop je pomemben predvsem na območjih, kjer obstaja tveganje za dolgoročne vplive nekdanjih rudarskih dejavnosti, saj omogoča zgodnje odkrivanje morebitnih nepravilnosti in pravočasno ukrepanje (Andersen, 2024).

V zadnjih letih se raziskujejo tudi druge možnosti uporabe, kot so skladiščenje plinov, vključno z ogljikovim dioksidom v okviru tehnologij zajemanja in shranjevanja ogljika (CCS – *Carbon Capture and Storage*), ter uporaba vrtin v energetskih sistemih prihodnosti. V takšnih primerih je ključnega pomena, da vrtina ohranja ustrezno mehansko stabilnost in tesnost, saj lahko v nasprotnem primeru predstavlja tveganje za okolje (American Petroleum Institute, 2018).

Kljub številnim prednostim ponovne uporabe vrtin pa takšen pristop ni vedno mogoč. Uporabnost posamezne vrtine je odvisna od njenega tehničnega stanja, geoloških pogojev ter ekonomskih dejavnikov. V mnogih primerih je likvidacija še vedno najprimernejša rešitev, zlasti kadar vrtina ne izpolnjuje varnostnih ali tehničnih zahtev za nadaljnjo uporabo. Zato je pred odločitvijo o likvidaciji poleg podrobne analize tveganj.

Na splošno ponovna uporaba vrtin predstavlja pomembno priložnost za prehod k trajnostnejšemu upravljanju energetskih virov, saj omogoča učinkovitejšo rabo obstoječe infrastrukture in zmanjšuje okoljski odtis novih projektov. Hkrati pa zahteva visoko raven strokovnosti in ustrezno zakonodajno podporo, ki zagotavlja varno in okoljsko sprejemljivo izvedbo.

4.4. Proces opuščanja in likvidacije vrtin

Proces opuščanja in likvidacije vrtin (Plug and Abandonment – P&A) predstavlja inženirski postopek trajnega zapiranja naftnih, plinskih ali geotermalnih vrtin po koncu njihovega življenjskega cikla. Namen postopka je zagotoviti dolgoročno stabilnost vrtine, preprečiti migracijo formacijskih fluidov med različnimi geološkimi plastmi ter zaščititi okolje, predvsem podzemne vodne vire. Postopek temelji na vzpostavitvi trajnih mehanskih in hidravličnih barier v vrtini, ki zagotavljajo popolno izolacijo rezervoarjev od površja in drugih geoloških plasti. V praksi se uporablja načelo večbariernega sistema, kar pomeni, da se med rezervoarjem in površjem vzpostavi več neodvisnih zapornih elementov.

Prva faza postopka je analiza stanja vrtine in priprava načrta opuščanja. Inženirji v tej fazi pregledajo vse razpoložljive podatke o vrtini, vključno z geološkimi podatki, konstrukcijo vrtine, podatki o cementaciji, zgodovino vrtanja in proizvodnje ter morebitnimi tehničnimi težavami, ki so se pojavile med obratovanjem. Posebna pozornost je namenjena integriteti ohišja vrtine in kakovosti cementnega plašča med ohišjem in kamnino. Za oceno stanja vrtine se pogosto uporabljajo geofizikalne meritve, kot so cementni karotažni zapisi (*Cement Bond Log*), ki omogočajo oceno kakovosti vezave cementa na ohišje in kamnino. Navsezadnje morajo preveriti tudi možnosti za ponovno uporabo vrtine v druge namene. Na podlagi zbranih podatkov se pripravi tehnični program opuščanja vrtine, v katerem so določeni položaji cementnih čepov, njihova dolžina, uporabljeni materiali ter metode preverjanja njihove učinkovitosti.

Naslednja faza vključuje pripravo vrtine na zapiranje. Najprej se ustavi proizvodnja in stabilizira tlak v vrtini. Nato se iz vrtine odstrani vsa proizvodna oprema, kot so proizvodne cevi, pakirniki, podzemne črpalke in varnostni ventili. Po odstranitvi opreme se vrtina očisti z uporabo vrtalne tekočine ali slanice, s čimer se odstranijo ostanki nafte, plina, peska, parafina in drugih usedlin. Ta postopek omogoča, da so stene vrtine čiste in primerne za namestitev trajnih zapor. Vrtina se nato napolni s tekočino ustrezne gostote, ki zagotavlja dovolj velik hidrostatski tlak za nadzor nad tlakom v rezervoarju in preprečuje nenadzorovan dotok plinov ali tekočin.

Ko je vrtina pripravljena, sledi namestitev mehanskih zapornih elementov. Mehanski čepi ali mostni čepi (*bridge plugs*) se namestijo na določene globine v vrtini in služijo kot podpora cementnim čepom. Njihova naloga je preprečiti premikanje cementa med procesom strjevanja ter zagotoviti stabilno osnovo za oblikovanje trajnih zapor. Ti elementi so običajno nameščeni nad produktivnimi plastmi ali na mestih, kjer je treba zagotoviti dodatno mehansko podporo cementnim zaporam.

Osrednji del postopka predstavlja cementiranje vrtine. Cement se s pomočjo črpalnega sistema vbrizga v vrtino, kjer zapolni določene intervale in se po določenem času strdi. Nastali cementni čepi ustvarijo trajne zapore, ki preprečujejo pretok tekočin ali plinov med različnimi geološkimi plastmi. Cementni čepi se običajno namestijo nad produktivnimi plastmi oziroma rezervoarji, iz katerih so se pridobivali ogljikovodiki ali geotermalna energija. Dodatni čepi se pogosto namestijo tudi v območjih vodonosnikov, da se zaščitijo podzemne vode pred morebitnim onesnaženjem. Eden izmed čepov se namesti tudi v bližini površine, kjer zagotavlja popolno izolacijo vrtine od okolja. Dolžina cementnih čepov je odvisna od regulativnih zahtev in geoloških pogojev, vendar običajno znaša več deset metrov.

Po namestitvi cementnih čepov se izvede preverjanje njihove integritete. Ta faza je ključna za zagotovitev dolgoročne varnosti zaprtja vrtine. Najpogosteje se izvajajo tlačni testi, s katerimi se preveri, ali cementni čep prenese določen tlak brez puščanja. Poleg tega se lahko uporabijo tudi geofizikalne meritve, ki omogočajo preverjanje kakovosti cementacije in pravilne namestitve zapornih elementov. Če testi pokažejo, da zapora ni dovolj učinkovita, se lahko cementni čep ponovno namesti ali dodatno utrdi.

Ko so vse podzemne zapore potrjene kot ustrezne, se začne zadnja faza postopka, ki vključuje odstranitev nadzemne infrastrukture in sanacijo lokacije. V tej fazi se odstrani vrtinska glava in druga površinska oprema. Ohišje vrtine se odreže nekaj metrov pod površjem tal ali pod morskim dnom, kar preprečuje kakršno koli prihodnje mehansko ali okoljsko tveganje. Nastala odprtina se zapolni s cementom ali drugim trajnim materialom. Površina območja se nato sanira, kar lahko vključuje ponovno oblikovanje terena, odstranitev industrijskih objektov in obnovo vegetacije.

Po zaključku vseh operacij se pripravi podrobna tehnična dokumentacija o izvedenem postopku opuščanja vrtine. Dokumentacija vsebuje podatke o vseh izvedenih delih, lokacijah cementnih čepov, rezultatih testiranj in končnem stanju vrtine. Ta dokumentacija se predloži pristojnim regulatornim organom, ki potrdijo, da je vrtina trajno in varno zaprta.

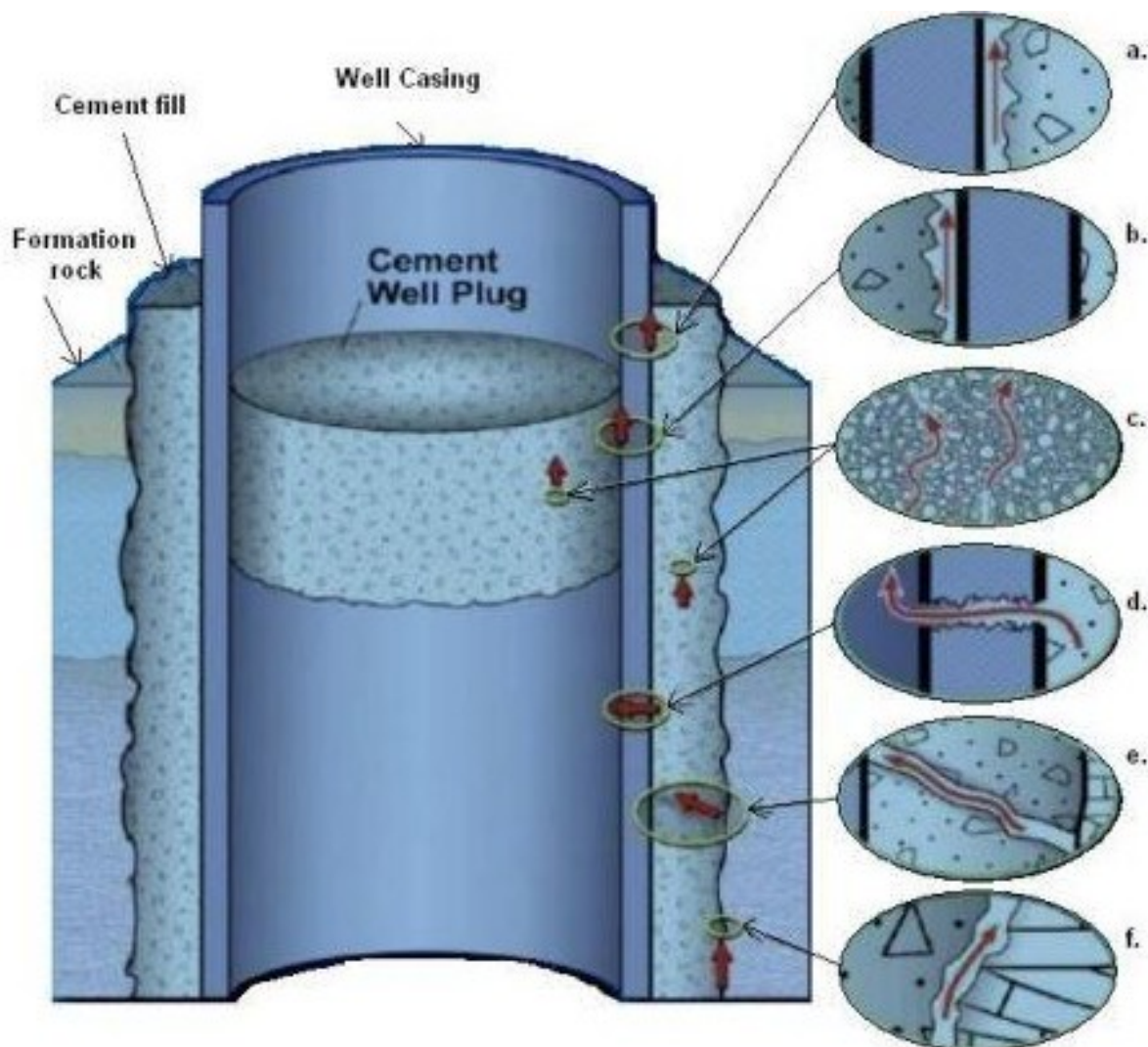
Postopek opuščanja vrtin je izjemno pomemben z vidika varstva okolja in dolgoročne varnosti. Nepravilno zaprte vrtine lahko predstavljajo potencialno pot za migracijo metana ali drugih plinov, kar lahko povzroči onesnaženje podzemnih voda ali emisije toplogrednih plinov v ozračje. Zaradi tega so postopki P&A podrobno opredeljeni v industrijskih standardih in regulativnih smernicah.

4.5. Tveganja za okolje in podzemne vode pri zapiranju vrtin

Zapiranje naftno-plinskih vrtin predstavlja pomembno okoljsko tveganje, predvsem zaradi možnih vplivov na podzemne vode in dolgoročne stabilnosti podzemnega okolja. Vrtine segajo skozi več geoloških plasti in pogosto povezujejo različne vodonosnike, zato lahko ob neustreznem zapiranju delujejo kot poti za migracijo plinov in tekočin. Ključno tveganje predstavlja puščanje ogljikovodikov, vključno z metanom in tekočimi frakcijami nafte, ki lahko migrirajo proti površju ali v plitvejšje vodonosnike, kar povzroča tako okoljske kot tudi varnostne posledice. Poleg tega lahko formacijska voda (slanica), ki vsebuje visoke koncentracije soli, težkih kovin in potencialno tudi naravno prisotnih radioaktivnih snovi, prodre v vodonosnike s pitno vodo in povzroči njihovo dolgotrajno degradacijo.

Dodatno tveganje predstavlja navzkrižno povezovanje geoloških plasti, kar lahko vodi v mešanje voda različne kakovosti ter spremembe hidroloških in geokemičnih razmer v podzemlju. Dolgoročno stabilnost vrtin ogroža tudi degradacija materialov, saj lahko korozija jeklenega ohišja in razpoke v cementu ustvarijo dodatne poti za migracijo onesnaževal. Posledice teh procesov se lahko pokažejo z zamikom več desetletij po zaprtju vrtine, kar otežuje njihovo zaznavanje in sanacijo.

V širšem okoljskem kontekstu imajo nepravilno zaprte vrtine pomembno vlogo tudi pri emisijah toplogrednih plinov, saj lahko predstavljajo difuzne vire metana, ki pomembno prispeva k podnebnim spremembam. Poleg vplivov na podzemne vode lahko pride tudi do onesnaženja tal in površinskih voda ter do degradacije habitatov, zlasti v občutljivih ekosistemih. Prostorsko razpršena narava opuščениh vrtin dodatno otežuje njihovo evidentiranje, nadzor in upravljanje, kar predstavlja izziv za okoljsko politiko in regulativo. Učinkovito zapiranje vrtin zato zahteva celovit pristop, ki vključuje ustrezne tehnične standarde, dolgoročno spremljanje stanja ter integracijo okoljskih tveganj v širše upravljanje naravnih virov.



Slika 6: Poškodba na sanirani vrtini (vir: medmrežje)

Rodovitnost tal po zaprtju naftno-plinskih vrtin ni samoumevna, temveč je v veliki meri odvisna od kakovosti izvedenih zapiralnih in sanacijskih ukrepov. V primeru pravilnega tehničnega zapiranja vrtine, ki vključuje učinkovito tesnjenje, odstranitev opreme in ustrezno rekultivacijo

površine (npr. ponovno vzpostavitev zgornje rodovitne plasti tal), se lahko tla postopoma obnovijo ter ponovno postanejo primerna za kmetijsko ali naravno rabo. Nasprotno pa lahko v primeru neustreznega zapiranja ali prisotnosti onesnaženja pride do trajnejše degradacije tal. Puščanje ogljikovodikov ter iztekanje slanic lahko povzročita povečano slanost, toksičnost in spremembe v kemijski sestavi tal, kar negativno vpliva na rast rastlin in biološko aktivnost v tleh. Poleg tega lahko mehanski posegi med gradnjo in opustitvijo vrtine povzročijo zbitost tal in izgubo humusnega sloja, kar dodatno zmanjšuje njihovo rodovitnost. V nekaterih primerih se lahko negativni vplivi pojavijo z zamikom, zaradi česar je dolgoročno spremljanje stanja tal ključnega pomena. Zato je za ponovno vzpostavitev rodovitnosti nujen celovit pristop, ki vključuje sanacijo onesnaženja, obnovo strukture tal ter ustrezno upravljanje prostora po zaprtju vrtine.

V Pomurju se zemljišča po sanaciji naftno-plinskih vrtin praviloma vrnejo v prvotno rabo, ki je v tej regiji pretežno kmetijska. Če je sanacija izvedena ustrezno, zlasti z obnovo zgornje rodovitne plasti tal in odstranitvijo morebitnih onesnaževal, se parcele ponovno uporabljajo za poljedelstvo, travnike ali pašnike. V primerih, kjer popolna obnova tal ni dosežena ali kjer so prisotne omejitve zaradi varstva narave, se zemljišča pogosto ohranjajo kot travniške površine ali se prepustijo naravni sukcesiji, kar lahko vodi v razvoj grmišč ali gozdnih združb. Takšne prakse so značilne tudi za območja v bližini pomembnih naravovarstvenih lokacij, kot je Krajinski park Goričko, kjer ima ohranjanje ekosistemov prednost pred drugimi oblikami rabe prostora. V manjšem obsegu se lahko sanirane površine uporabijo tudi za infrastrukturne ali energetske namene, vendar je to odvisno od prostorskega načrtovanja. Na splošno je končna raba zemljišča po zaprtju vrtine odvisna od uspešnosti sanacije, stopnje ohranjenosti tal ter lokalnih okoljskih in prostorskih pogojev.



Slika 7: Nahajališče vrtine po sanaciji (Vir: osebni arhiv)

5. ANALIZA STANJA VRTIN NA OBMOČJU LENDAVE (1999–2008)

5.1. Pregled izbrane vrtine

Naključno izbrana vrtina bo poimenovana V1. V1 je v severovzhodni Sloveniji, v občini Lendava, na območju Petišovcev, na nadmorski višini približno 158,10 m. Vrtina je bila izvrtana v relativno kratkem časovnem obdobju, in sicer med 27. julijem 2004 in 7. avgustom 2004, pri čemer je bila prvotno namenjena proizvodnji ogljikovodikov, danes pa ima status opuščene vrtine. Njena končna globina znaša 2080,00 m, kar jo uvršča med tipične globinske vrtine na območju Panonskega bazena.

Vrsta zaščitnih cevi	Premjer (in)	Globina vgradnje	Linearna masa	Kakovost jekla	Vrh cementa izza kolone
Uvodna kolona	9 ⁵ / ₈ " (244,5 mm)	0,00–310,00 m	36 lb/ft (53,7 kg/m)	L-80	0,00 m
Proizvodna kolona	5 ¹ / ₂ " (139,7 mm)	0,00–1379,49 m	14 lb/ft (20,83 kg/m)	K-55	1325,00 m
Proizvodna kolona	5 ¹ / ₂ " (139,7 mm)	1379,49–1907,19 m	15,5 lb/ft (23,07 kg/m)	K-55	

Tabela 1: Zacevitev in cementiranje V1

Vrtina vsebuje več nastreljenih intervalov v globinskem območju med približno 1537 m in 1751 m, kjer so bile izvedene raziskave različnih ležišč, med drugim Petišovci. Rezultati teh raziskav kažejo, da so bile v večini primerov zaznane vode s sledmi ogljikovodikov, medtem ko je bil v enem primeru zaznan zemeljski plin. Takšni rezultati kažejo na omejeno produktivnost vrtine, kar je najverjetneje vplivalo na odločitev o njeni opustitvi.

Globina nastreljenega intervala (m)	Vrsta nastreljevanja	Število nabojev (kom/m)
1537,50–1540,00 (3 m)	puška	20
1554,00–1556,00 (2 m)	puška	20
1591,50–1594,00 (2,5 m)	puška	20
1650,50–1653,00 (2,5 m)	puška	20
1665,50–168,50 (3 m)	puška	20
1707,50–1710,00 (2,5 m)	puška	20
1748,70–1751,00 (1,3 m)	puška	20

Tabela 2: Nastreljeni intervali izbrane vrtine V1

V vrtini so bili že vgrajeni različni zaporni elementi, ki vključujejo cementne in mehanske čepe. Cementni čepi so bili nameščeni v več intervalih med približno 1543 m in 1744 m, medtem ko so mehanski čepi nameščeni na več globinah, vključno z 1548,5 m, 1583 m, 1640 m, 1664 m, 1697 m in 1744 m. Ti elementi so bili namenjeni izolaciji posameznih plasti in preprečevanju komunikacije med njimi, vendar očitno niso zagotovili zadostne dolgoročne funkcionalnosti vrtine.

V proizvodni fazi je bila v vrtini vgrajena tudi proizvodna oprema, vključno s *tubingom* premera 2 ⁷/₈" z lijakastim vodom in *XN nipple*, ki je segal do globine približno 1542,6 m. Meritve, izvedene leta 2006, kažejo, da je tlak na ustju vrtine znašal 4,5 bara na *tubingu* in 71 barov na *casingu*, medtem ko je tlak na globini 1543,5 m dosegal 82,14 bara. Temperatura na tej globini je znašala 93 °C, pri čemer je bil izračunan temperaturni gradient 5,41 °C/100 m. Medtem ko

je gradient tlaka znašal 0,99 bar/10 m. V vrtini je bila prisotna slojna voda v količini približno 9500 l, pri čemer je bil njen nivo na globini približno 720 m.

Stanje vrtine je bilo ob zadnjem pregledu opredeljeno kot opuščeno, pri čemer zadnja sprememba stanja sega v april 2006. Dodatno je bila ugotovljena omejena prehodnost vrtine, saj je kaliber nasedel na globini 1548 m, kar kaže na morebitne mehanske ovire ali usedline v vrtini.

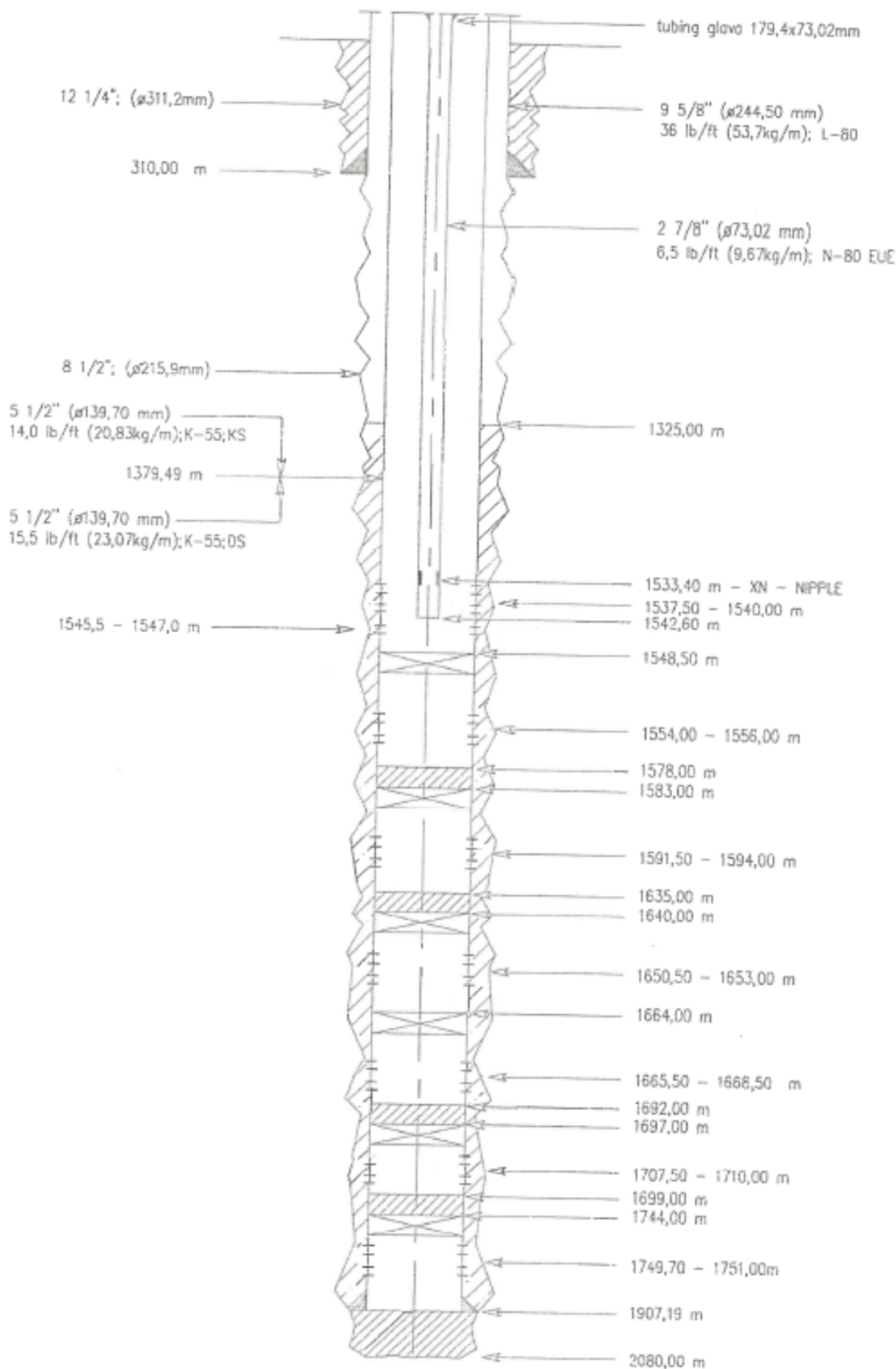
Okolica vrtine je delno urejena, saj je območje neposredno ob vrtini utrjeno z gramozom v velikosti približno 45 × 45 m, medtem ko sov bližini kmetijske površine, predvsem njive. Ta okoliščina dodatno poudarja pomen pravilne izvedbe zapiranja vrtine, saj bi morebitno uhajanje fluidov lahko vplivalo na kakovost tal in podzemnih voda.



Slika 8: Lokacija sanirane vrtine V1, ki je predana v ponovno uporabo zemljišča za kmetijske namene (Vir: osebni arhiv)

Geološko vrtina dosega spodnji panon, natančneje murskosoboško formacijo, kar je značilno za območje Panonskega bazena. Takšne geološke razmere so običajno povezane s prisotnostjo poroznih peščenjakov in neprepustnih prekrivnih plasti, ki omogočajo akumulacijo ogljikovodikov, vendar hkrati zahtevajo ustrezno tehnično izvedbo vrtine za preprečevanje neželenih migracij fluidov.

Na podlagi vseh tehničnih podatkov je mogoče zaključiti, da vrtina V1 predstavlja tipičen primer globinske naftno-plinske vrtine z omejeno produktivnostjo, kjer so geološki pogoji sicer omogočali prisotnost ogljikovodikov, vendar ne v zadostni količini za dolgoročno izkoriščanje. Zaradi tega je bila vrtina opuščena, pri čemer njena konstrukcija, stanje in okoljska občutljivost zahtevajo strokovno izvedbo postopka likvidacije, ki bo zagotovil dolgoročno stabilnost in zaščito okolja.



Slika 9: Tehnično stanje v vrtini V1 (vir: projekt)

5.2. Ocena integritete vrtine

Na podlagi razpoložljivih podatkov je mogoče oceniti, da je integriteta vrtine V1 delno zagotovljena, vendar zahteva izvedbo dodatnih sanacijskih oziroma likvidacijskih ukrepov. Vrtina je opuščena, pri čemer so v njej že nameščeni cementni in mehanski čepi, ki služijo izolaciji posameznih nastreljenih intervalov. Kljub temu podatki o tlaku kažejo, da je na *casingu* prisoten tlak 71 barov, medtem ko je na *tubingu* izmerjen tlak 4,5 bara, kar pomeni, da je treba pred dokončnim zapiranjem preveriti hermetičnost vrtine in medprostora.

Pomemben kazalnik stanja vrtine je tudi omejena prehodnost, saj je bilo nasedanje kalibra ugotovljeno na globini 1548 m. To lahko kaže na mehansko oviro, usedline, ostanke opreme ali spremembe v notranjem stanju vrtine. Takšno stanje lahko oteži izvedbo sanacijskih del, predvsem čiščenje vrtine, polaganje cementnih čepov in preverjanje njihove kakovosti. Najverjetneje pa kaže na mehanski čep, ki je bil skladno z na sliki 9 podano tehnično skico te vrtine nameščen v globini 1548,5 m. Naslednje v tej globini bi moralo biti torej pričakovano.

Z vidika geološke in okoljske varnosti je ključnega pomena, da se prepreči komunikacija med nastreljenimi intervali, kjer so bile zaznane vode s sledmi ogljikovodikov in zemeljski plin, ter višje ležečimi plastmi. Ker je vrtina v bližini kmetijskih površin, je treba posebno pozornost nameniti zaščiti podzemnih voda in tal. Neustrezna integriteta vrtine bi lahko omogočila migracijo fluidov po vrtini ali medprostoru, kar bi predstavljalo okoljsko tveganje.

Predvideni program del zato vključuje čiščenje vrtine, polaganje dodatnih cementnih čepov, preizkus hermetičnosti pri tlaku 60 barov ter preverjanje sprejemanja medprostora med uvodno in proizvodno kolono. Ti postopki so pomembni za potrditev, da so zaporne bariere učinkovite in da vrtina po zaprtju ne bo predstavljala poti za migracijo plinov ali tekočin.

Na podlagi navedenega je mogoče zaključiti, da vrtina V1 pred sanacijo ne izkazuje popolnoma potrjene dolgoročne integritete. Njeno stanje zahteva tehnično preverjanje, dodatno cementiranje in kontrolo tesnosti. Šele po uspešni izvedbi teh ukrepov je mogoče oceniti, da bo vrtina trajno izolirana in varna z vidika okolja ter podzemnih vod.

Pri oceni integritete vrtine je treba upoštevati stanje ohišja, kakovost cementacije, morebitno prisotnost korozijskih poškodb ter tveganje za migracijo fluidov med geološkimi plastmi. Posebej pomembna je analiza tesnosti vrtine, saj poškodbe cementnih barier ali ohišja lahko povzročijo dolgoročno uhajanje plinov ali tekočin.

Na podlagi razpoložljive dokumentacije in pregleda izvedenih sanacijskih postopkov je mogoče ugotoviti, da starejše vrtine predstavljajo večje tveganje zaradi uporabe starejših materialov in tehnoloških postopkov. Zaradi tega je pri likvidaciji takšnih vrtin treba izvajati dodatne varnostne ukrepe in podrobnejši nadzor.

5.3. Centralna plinska postaja in njen tehnološki proces

Centralna plinska postaja (CPP) predstavlja ključen element v sistemu zbiranja, obdelave in distribucije zemeljskega plina ter tekočih ogljikovodikov. Njena osnovna naloga je sprejem plina iz več proizvodnih vrtin ter njegova nadaljnja tehnološka obdelava, ki omogoča varno in učinkovito uporabo ali transport. Kot izhaja iz tehničnega opisa, se plin iz vrtin po cevovodih dovaja v redukcijsko-separatorsko-merni sistem, kjer se najprej izvede znižanje tlaka, nato pa ločevanje posameznih faz. V tem procesu se iz plinskega toka odstranijo plinski kondenzat in slojna voda, medtem ko se iz nafte prav tako izloči voda. Po odstranitvi tekočinskih komponent se plin vodi na dehidracijo, kjer se dodatno osuši in pripravi za nadaljnjo uporabo oziroma distribucijo končnim porabnikom.

Tehnološki procesi, ki potekajo na centralni plinski postaji, vključujejo večstopenjsko separacijo (visokotlačno, drugostopenjsko in nizkotlačno), merjenje pretokov plina in kapljev in ter začasno skladiščenje ločenih frakcij. Kondenzat in nafta se zbirata v posebnih rezervoarjih, od koder se nato transportirata, pogosto s cisternami, v nadaljnjo predelavo. Sistem tako omogoča učinkovito upravljanje različnih faz ogljikovodikov ter optimizacijo proizvodnje. Ključni tehnološki sklopi vključujejo toplotne izmenjevalce, separatorje različnih tlačnih stopenj ter skladiščne rezervoarje, ki skupaj tvorijo celovit procesni sistem.



Slika 10: CPP Lendava (vir: osebni arhiv)

Pomemben vidik delovanja CPP je tudi stalno spremljanje in nadzor procesnih parametrov. Meritve pretokov, tlakov in temperatur omogočajo učinkovito upravljanje proizvodnje ter pravočasno zaznavanje morebitnih odstopanj. S tem se zagotavlja ne le optimizacija delovanja, temveč tudi višja raven varnosti in zmanjšanje tveganj za okolje. Posebno pozornost je treba nameniti tesnosti sistema, saj lahko morebitna puščanja ogljikovodikov predstavljajo resno nevarnost za podzemne vode, tla in ozračje.

Opisana je tudi rekonstrukcija in nadgradnja obstoječe infrastrukture, ki vključuje vgradnjo novih rezervoarjev, posodobitev cevovodov ter izboljšanje tehnoloških procesov. Med ključnimi posegi so rekonstrukcija bazenov za slojno vodo, vgradnja novih separatorjev, dodatne regulacijske linije za stabilizacijo tlaka ter prilagoditev sistema bakle za varno odvajanje presežnih plinov. Prav tako je predvidena izgradnja nakladalnih postaj za polnjenje avtocistern ter izboljšanje logistične infrastrukture.

Z vidika tehnične zanesljivosti in trajnosti je pomembna tudi uporaba ustreznih materialov ter zaščitnih ukrepov. Dokumentacija poudarja protikorozijsko zaščito cevovodov, nadzor kakovosti varjenih spojev ter izvajanje tlačnih preizkusov v skladu z veljavnimi standardi (npr.

ANSI/ASME). Dodatno se izvajajo pregledi izolacije in testiranja tesnosti, kar zmanjšuje možnost uhajanja plinov in tekočin. Takšni ukrepi so ključni za dolgoročno stabilnost sistema in preprečevanje okoljskih tveganj.

Pomembni segment CPP predstavlja tudi področje varnosti in zaščite pred nesrečami. Sistem vključuje naprave za odkrivanje in javljanje požara, samodejne in ročne javljalnike ter zvočno in optično signalizacijo. Vsa oprema, nameščena v potencialno eksplozijsko ogroženih območjih, ustreza zahtevam standardov ATEX, kar zmanjšuje tveganje za eksplozije. Poleg tega je zagotovljena ustrezna ozemljitev opreme in izvedba električnih instalacij, kar dodatno prispeva k varnemu obratovanju postaje.

Celostno gledano centralna plinska postaja predstavlja kompleksno tehnološko enoto, ki omogoča učinkovito obdelavo zemeljskega plina ter upravljanje s stranskimi produkti. Njena pravilna zasnova, izvedba in vzdrževanje so ključni za zagotavljanje varnega obratovanja ter zmanjševanje vplivov na okolje. Ob tem ima pomembno vlogo tudi pri preprečevanju emisij toplogrednih plinov in zaščiti podzemnih vodnih virov, saj ustrezno upravljanje in nadzor nad procesi bistveno zmanjšujeta tveganje za nenadzorovane izpuste ogljikovodikov v okolje.

5.4. Analiza postopka likvidacije in okoljski vidik izvedene sanacije

5.4.1. Polaganje cementnega čepa po fazah

POLAGANJE 1. CEMENTNEGA ČEPA V PROIZVODNI KOLONI ZAŠČITNIH CEVI

V proizvodno kolono 5 1/2" spustiti *tubing* cevi 2 7/8" do globine 1548,0 m, vrtino precirkulirati s 15 m³ vode in položiti cementni čep v intervalu od 1548,5–1440,0 m (108,5 m).

Cementacijo opraviti z 1,5 m³ cementne kaše gostote $P_{ck} = 1,8 \text{ kg/l}$ (1790 kg cementa 895 l vode) z dodatkom 1,5 kg sladkorja. Cement iz *tubinga* iztisniti s 4,6 m³ vode.

Po končani cementaciji *tubing* dvigniti na globino 1300,0 m in vrtino precirkulirati s 15 m³ čiste vode. Po cirkulaciji zapreti vrtino in vse zasune na tlačnih vodih ter počakati na strjevanje cementa 12 ur. Po strjevanju cementa izmeriti in evidentirati globino vrha cementnega čepa.

POLAGANJE 2. CEMENTNEGA ČEPA V PROIZVODNI KOLONI ZAŠČITNIH CEVI

Tubing cevi 2 7/8" izvleči do globine 1100,0 m, vrtino precirkulirati z 12 m³ vode in položiti cementni čep v intervalu od 1100,0–1000,0 m (100 m). Cementacijo opraviti z 1,5 m³ cementne kaše gostote $P_{ck} = 1,8 \text{ kg/l}$ (1790 kg cementa 895 l vode). Cementni kaši se doda ekspanzijski aditiv v skladu s proizvajalčevimi navodili, ki zagotavlja kompenzacijo volumenskega krčenja cementa med hidratacijo in izboljšuje dolgoročno integriteto cementnega čepa. Cement iz *tubinga* se iztisne s 3,3 m³ vode.

Po končani cementaciji *tubing* dvigniti na globino 900,0 m in vrtino precirkulirati z 10 m³ čiste vode. Po cirkulaciji zapreti vrtino in vse zasune na tlačnih vodih ter počakati na strjevanje cementa 12 ur. Po strjevanju cementa izmeriti in evidentirati globino vrha cementnega čepa.

PREIZKUS HERMETIČNOSTI VRTINE

Hermetičnost cementnega čepa (vrtine) preizkusiti na tlak $P = 60$ barov v času 30 min. Vrtina je hermetična v primeru, da tlak ne pade več kot 6 barov oziroma 10 % tlaka preizkusa. O ugotovitvi hermetičnosti vrtine izdelati poročilo in priložiti opisani diagram poteka preizkusa.

UGOTAVLJANJE SPREJEMANJA MEDPROSTORA MED UVODNO IN PROIZVODNO KOLONO

Preizkusiti sprejemanje medprostora med uvodno kolono 9 5/8" in proizvodno kolono 5 1/2" do tlaka Pt 60 barov zaradi ugotavljanja sprejemanja. O opravljenem preizkusu izdelati poročilo s priloženim opisanim diagramom poteka preizkusa.

POLAGANJE KONČNEGA CEMENTNEGA ČEPA V PROIZVODNI KOLONI OD 150–0 M

Cementacijo končnega cementnega čepa v koloni 5 1/2" v intervalu od 150,0 do 0,0 m opraviti z 2 m³ cementne kaše gostote $P_{ck} = 1,8$ k/l (2380 kg cementa in 1190 l vode) z uporabo *tubing* cevi 2 7/8" vgrajenimi do globine 150 m. Cementno mleko potisniti s 455 l čiste vode, nato iz vrtine izvleči ves vgrajeni *tubing*. Vrtino zapreti in počakati na strjevanje cementa 12 ur.

CEMENTACIJA MEDPROSTORA MED UVODNO IN PROIZVODNO KOLONO

Po ugotovljenem sprejemanju medprostora med uvodno kolono 9 5/8" in proizvodno kolono 5 1/2", izvesti cementacijo medprostora z 8 m³ cementnega mleka gostote Pt 1,8 kg/l (9530 kg cementna in 4765 l vode, vodocementni faktor W/C = 0,5) do približne globine 340,00 m. Po končani cementaciji zapreti zasun na medprostoru.

DEMONTAŽA USTJA VRTINE IN ODSTRANJEVANJE OPREME Z LOKACIJE VRTINE

Po končanih sanacijskih delih v vrtini demontirati opremo z ustja vrtine do prirobnice 11", 3000 PSI ter montirati pokrovno prirobnico 11", 3000 PSI, in pokriti jašek vrtine z armirano betonskimi ploščami ali jeklenim pokrovom.

Odstraniti z lokacije vrtine remontni postroj s pripadajočo opremo in očistiti delovišče.

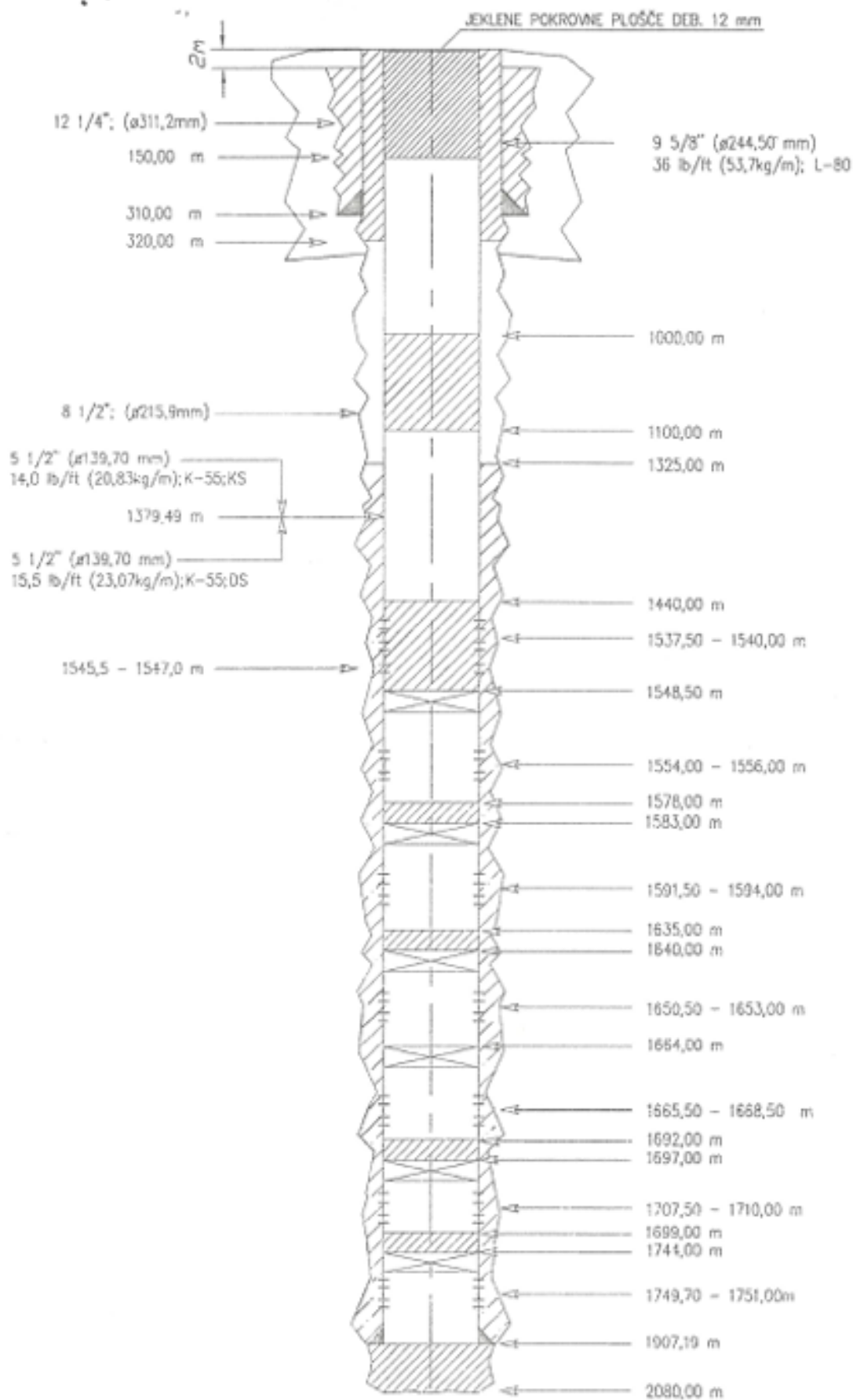
ZAKLJUČNA SANACIJSKA DELA NA USTJU VRTINE

Razbiti je treba betonski jašek vrtine (tri stranice in dno jaška) ter okoli ustja vrtine izkopati jašek velikosti 2 × 2 m in globine 2 m. Pred rezanjem tehnične kolone zaščitnih cevi premera 11" in proizvodne kolone premera 5 1/2" je treba preveriti hermetičnost vrtine in medprostora. Če medprostor ni hermetičen, ga je treba dodatno zacementirati ter dopolniti z vodo. Nato je treba pristopiti k rezanju uvedne, tehnične in proizvodne kolone na globini 2,0 m pod površino terena. Na odrezane konce uvedne, tehnične in proizvodne kolone je treba privariti jeklene plošče debeline 12 mm. Na koncu je treba razbiti preostale betonske temelje in jašek okoli vrtine ter območje v celoti zasuti z zemljo.

ZAKLJUČNA GRADBENA DELA NA LOKACIJI VRTINE

Po opravljenih sanacijskih rudarskih delih na lokaciji vrtine izvesti zaključna gradbena dela kot sledi:

- odstraniti vse AB-plošče z delovišča;
- razbiti vse betonske temelje in bloke (približno skupno 200 m³) in jih deponirati na ustrezno deponijo;
- navoziti zemljo (humus) po celotni površini degradiranega zemljišča okrog vrtine in poravnati teren;
- fino planiranje terena in sejanje trave na površini 1000 m².



Slika 11: Predvideno stanje v vrtni in na ustju vrtnine V1 po izvedbi sanacijskih del (Vir: projekt)

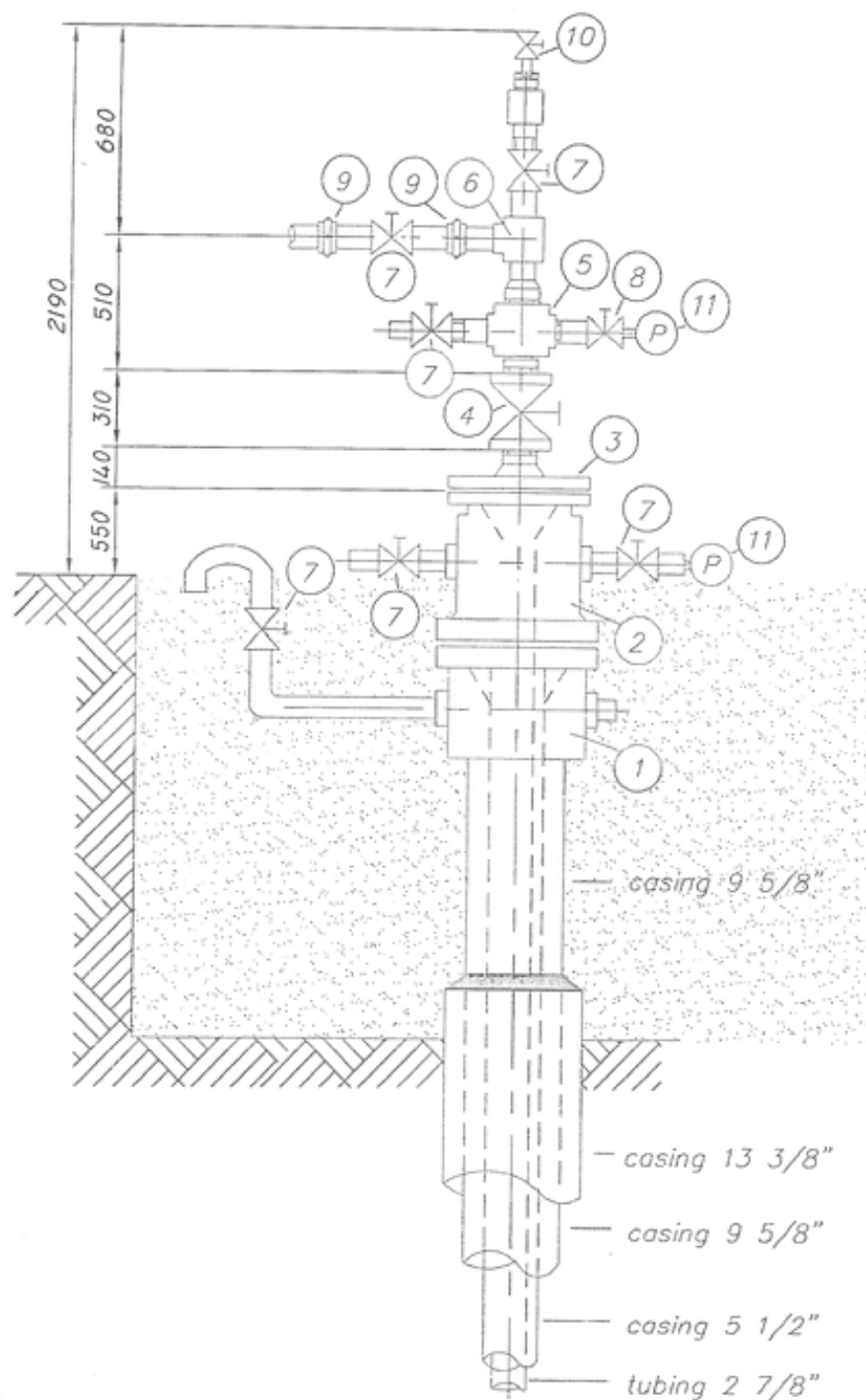
Po izvedbi cementiranja in vgradnji vseh zapornih elementov je predvidena tudi odstranitev ustja vrtine in pripadajoče površinske opreme. V okviru sanacijskih del se najprej demontira vrtinska armatura oziroma eruptivni križ, ki je bil med obratovanjem namenjen nadzoru tlaka in regulaciji pretoka fluidov. Odstranijo se tudi vsi ventili, zasuni, cevni priključki in druga površinska oprema, ki po zaključku obratovanja ni več potrebna.

Nato se uvodna in tehnična kolona odrežeta približno 1,5 do 2,0 m pod površino terena, kar omogoča trajno odstranitev vidnega dela vrtine s površja. Po rezanju kolon se odprtina trajno zapre z zavarjeno jekleno pokrovno ploščo, ki preprečuje dostop do vrtine ter zmanjšuje možnost izhajanja plinov ali tekočin na površje. Takšna izvedba predstavlja dodatno varnostno in zaščitno bariero po zaključeni likvidaciji.

Po odstranitvi ustja vrtine se izvede še sanacija delovišča, ki vključuje odstranitev betonskih temeljev, gramoza in ostalih objektov ter zasipanje jaškov. Na koncu se območje rekultivira in prilagodi prvotnemu stanju okolice, s čimer se zmanjšajo dolgoročni vplivi na prostor in omogoči nadaljnja uporaba zemljišča.



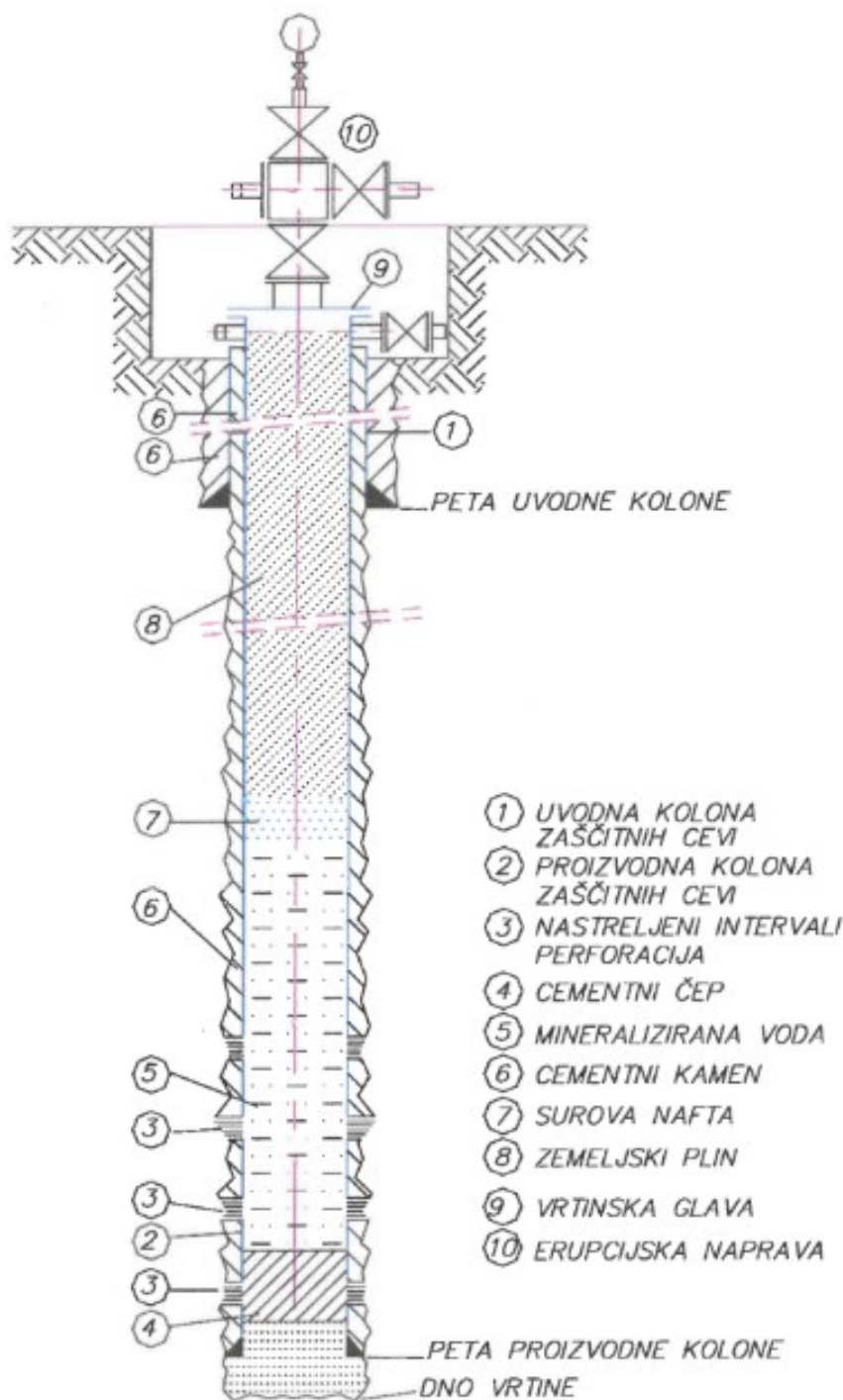
Slika 12: Eruptijska naprava oziroma ustje zaprte vrtine (Vir: osebni arhiv)



1. Prirobnica 9 5/8" x 11"; 3000 PSI
2. Prirobnica 11" x 7 1/16"; 3000 PSI
3. Prirobnica 7 1/16" x 2 9/16"; 3000 PSI
4. Zasun 2 9/16"; 3000 PSI
5. Razdelilni križ 2 9/16" x 2 1/16"; 3000 PSI
6. T kos 2 1/16"
7. Zasun 2 1/16"; 3000 PSI
8. Zasun 1"; 3000 PSI
9. Holenderski spoj 2"
10. Manometerski ventil 1/2"
11. Manometer 0-60 bar

Slika 13: Proizvodna oprema na ustju vrtnice (Vir: projekt)

5.5. Sanacija naključne vrtine skozi projekt



Slika 14: Prvotno stanje vrtine (Vir: projekt)

(B) Sanacija ustja vrtine in delovišča

Po polaganju cementnih čepov demontirati ustje vrtine in odrezati uvodno in tehnično kolono 1,5–2,00 m pod površino terena in zavariti slepice. Odstraniti vso opremo z delovišča vrtine, razbiti in odstraniti vse betonske bloke, temelje ter gramoz. Zasuti vse jaške in poravnati teren na celotni površini delovišča in celotno površino delovišča vrtine vrniti v prejšnje stanje.

Ustje vrtine ni bilo demontirano, ker se je načrtovala proizvodnja plina.

Ustje vrtine je opremljeno z anularnim preventerjem dimenzije 7 1/16" in delovnega tlaka 5.000 PSI, dvojnimi čeljustnim preventerjem dimenzije 7 1/16" in delovnega tlaka 5.000 PSI, prirobnim prehodom 7 1/16" 10.000 PSI × 7 1/16" 5.000 PSI, zasunom 2 1/16" LP 3.000 PSI, holenderskimi spojkami 2" LP 3.000 PSI ter cevni prehodi 2" LP 3.000 PSI/2" 3.000 PSI. Situacija je prikazana v Prilogi 3. Ker v citirani projektni dokumentaciji stroški sanacije niso obdelani, se je investitor odločil za izdelavo rudarskega projekta za izvedbo sanacije vrtine XY Petišovci. S projektom bodo opredeljeni ekonomski stroški izvedbe končne sanacije vrtine XY na navedeni parceli. Po končani sanaciji bo do vrtine vodila dostopna pot, manipulativni prostor za vzdrževalna, servisna in nadzorna dela pa bo ograjen z ustrezno varovalno ograjo, s čimer bo preprečen dostop nepooblaščenim osebam. Preostali del območja bo urejen in saniran tako, da bo povrnjen v prvotno stanje, namenjeno kmetijski rabi.

SANACIJA IN REKULTIVACIJA

Skladno z omilitvenimi ukrepi za varovanje okolja in ohranjanja narave, se mora prostor okoli vrtine sanirati tako, da omogoča kmetijsko obdelavo s traktorji ipd. Po opravljenih delih bo na tem mestu njiva.

Sanacija sestoji iz tehnične sanacije in biološke sanacije – rekultivacije. Ločitev je zgolj tehnične narave, postopki se izvajajo sukcesivno in so povezani. Izvajanje sanacije je predvideno izvesti v roku do enega meseca v odvisnosti od izvajalca del. V okviru tehnične sanacije se predvidi poravnava z zemljo in humusom, ki je bil pred začetkom del vrtanja premeščen v varovalni nasip okoli vrtine.

V okviru biološke sanacije je predvidena kmetijska obdelava.

OBMOČJE SANACIJE

Območje sanacije je dostopna pot do vrtine in območje vrtine XY Petišovci. Vsa oprema in postrojenja so bili odstranjeni v novembru 2010. Preseljeni so bili na vrtino XY. Teren je raven in je to kmetijska površina. Ob vznožju lendavskih goric vodi cesta od Lendave do Pinc.

SANACIJA IN REKULTIVACIJA OBMOČJA DELOVNEGA PLATOJA VRTINE

ZRud-1 zavezuje nosilca rudarske pravice k dokončni sanaciji okolja in odpravi posledic izkoriščanja. Obveznost sprotne in končne sanacije izhaja tudi iz določil koncesijske pogodbe oziroma dovoljenja za izkoriščanje. Sprotna sanacija je tako del tehnološkega procesa pridobivanja in tudi sproti strošek, ki bremeni tekočo proizvodnjo.

NAČRT KONČNE SANACIJE

Sprotna sanacija je del tehnološkega procesa izkoriščanja, ki obsega ureditev delovnega platoja vrtine z naslednjimi deli in se izvede vzporedno s pridobivanjem. Določila ZRud-1 zavezujejo nosilca rudarske pravice izvesti dokončno sanacijo okolja in odpraviti posledice, ki so nastale pri izvajanju rudarskih del.

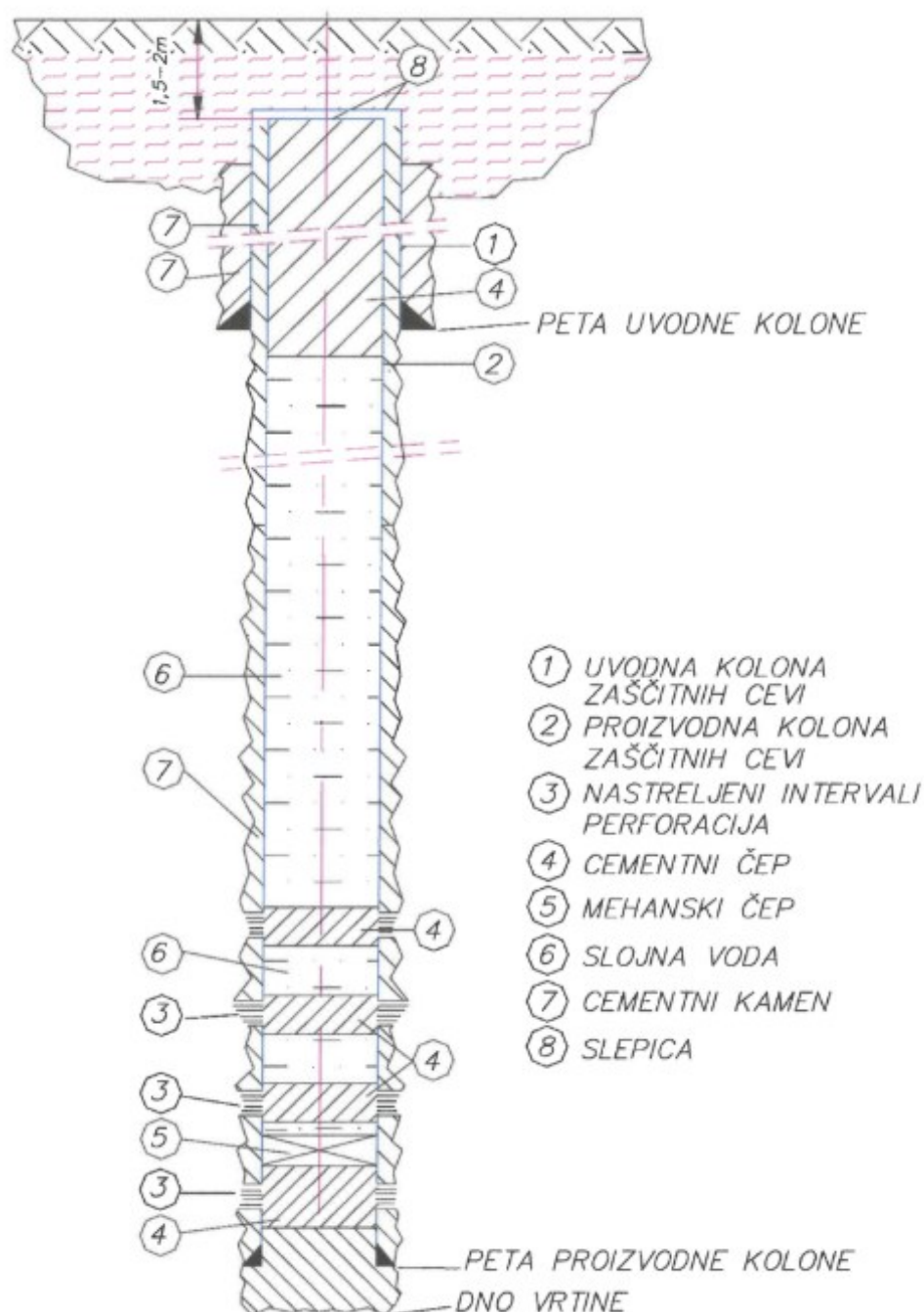
Sanacija lokacije bo izvedena v predvidenem roku enega meseca. Dela bodo obsegala odstranitev betonskih plošč na delovnem platoju, rušitev armiranobetonskih sten, odstranitev obodnega nasipa okoli lagune ter zasutje lagune. Predvidena je tudi odstranitev gramoznega nasutja na delovnem platoju, zasutje in ureditev površine platoja z namenom vzpostavitve prvotnega stanja za nadaljnjo kmetijsko rabo zemljišča, zasutje odvodnega jarka za odvajanje meteornih voda ter izdelava zaščitne ograje okoli ustja vrtine in postavitve opozorilnih tabel.

ZRud-1 predvideva tudi postopke ugotavljanja ali je sanacija izvedena v skladu s projektom in ali izvedeni ukrepi zadoščajo, da se izključita nevarnost za zdravje ter življenje ljudi in živali.

OBSEG DEL SANACIJE

Predvidena končna sanacija se izvede po popisu del za sanacijska dela na delovnem platoju vrtine XY. Ker je celotno območje horizontalno, pomeni, da je tehnična sanacija poravnava zemlje in humusa.

Prva faza biološke obnove je zatravitev pripravljenih površin s travnimi mešanicami, v kateri naj bodo tudi primarne rastline in rastline, ki izboljšujejo tla. Naslednja faza je obdelava kmetijskega zemljišča.



Slika 15: Vrtina v projektu po sanaciji (Vir: projekt)

6. ZAKONODAJNI IN NORMATIVNI OKVIR

6.1. Industrijski standardi in dobre prakse (API, ISO)

Zagotavljanje varnosti, zanesljivosti in dolgoročne integritete naftno-plinskih vrtin temelji na dosledni uporabi mednarodno priznanih industrijskih standardov, ki določajo tehnične zahteve, postopke in merila za načrtovanje, gradnjo, obratovanje ter likvidacijo vrtin. Med najpomembnejšimi organizacijami na tem področju sta American Petroleum Institute (API) in International Organization for Standardization (ISO), katerih standardi predstavljajo temelj sodobne prakse v naftno-plinski industriji.

Standardi API so primarno tehnično usmerjeni in temeljijo na dolgoletnih izkušnjah industrije. Njihov namen je zagotavljanje varnega in učinkovitega izvajanja posameznih operacij ter zanesljivega delovanja konstrukcijskih elementov vrtnice. Na področju zapiranja vrtin ima ključno vlogo standard *API Recommended Practice 65-3 (Wellbore Plugging and Abandonment)*, ki določa načela načrtovanja in izvedbe zapornih sistemov. Osrednji koncept tega standarda je večbariarni pristop, ki zahteva, da so vsi potencialni tokovni kanali, kot so anularni prostor, stiki med cementom in ohišjem ter morebitne razpoke v cementnem plašču, zaprti z več neodvisnimi zaporami. Standard natančno opredeljuje lokacijo in dimenzioniranje cementnih čepov, postopke preverjanja njihove učinkovitosti ter zahteve za dolgoročno stabilnost zapornih elementov. S tem zagotavlja, da je tveganje za migracijo fluidov, vključno s plinom, minimalno čez celotno življenjsko dobo vrtnice in ostaja minimalno tudi po njeni opustitvi.

Pomembno dopolnilo predstavlja standard *API Specification 10A (Specification for Cements and Materials for Well Cementing)*, ki določa tehnične zahteve za cementne materiale, uporabljene pri gradnji in zapiranju vrtin. Standard uvaja klasifikacijo cementov glede na pogoje uporabe (globina, tlak, temperatura) ter določa njihove fizikalne in kemijske lastnosti, kot so gostota, viskoznost, čas vezanja in tlačna trdnost. Poseben poudarek je na laboratorijskem testiranju cementnih mešanic in uporabi dodatkov, ki izboljšujejo lastnosti cementa, kot so odpornost na krčenje, stabilnost pri visokih temperaturah in odpornost na kemične vplive. Ustrezna izbira in uporaba cementa sta ključna za zagotavljanje neprepustnosti cementnega plašča, ki predstavlja osnovno bariero proti migraciji fluidov.

Dodatno pomemben standard je *API Recommended Practice 90 (Annular Casing Pressure Management)*, ki obravnava upravljanje tlakov v anularnem prostoru. Ta standard določa postopke za spremljanje anularnega tlaka, kriterije za njegovo oceno ter ukrepe v primeru odstopanj od normalnih vrednosti. Poudarek je na zgodnjem odkrivanju nepravilnosti, ki lahko kažejo na izgubo integritete vrtnice ali na pojav migracije plina. Standard s tem prispeva k preventivnemu obvladovanju tveganj in omogoča pravočasno izvajanje korektivnih ukrepov.

Za razliko od standardov API, ki so osredotočeni predvsem na tehnične vidike posameznih postopkov, standardi ISO uvajajo celovit in sistemski pristop k upravljanju integritete vrtin. Ključni standard na tem področju je *ISO 16530 (Well Integrity – Lifecycle Governance)*, ki določa okvir za upravljanje integritete vrtnice skozi celoten življenjski cikel. Standard temelji na identifikaciji in obvladovanju tveganj ter na vzpostavitvi sistema zapornih barier, ki preprečujejo nenadzorovan pretok fluidov. Opredeljuje zahteve za načrtovanje vrtnice, nadzor njenega stanja med obratovanjem, upravljanje sprememb ter dokumentiranje vseh posegov. Posebnost tega standarda je obravnava integritete kot dinamičnega procesa, ki zahteva stalno spremljanje in prilagajanje glede na dejansko stanje vrtnice.

Standard *ISO 10426 (Cements and Materials for Well Cementing)* dopolnjuje tehnične zahteve za cementiranje in določa metode testiranja ter kriterije za ocenjevanje kakovosti cementnih mešanic. Standard omogoča enotno ocenjevanje cementnih materialov na mednarodni ravni

in zagotavlja primerljivost rezultatov med različnimi projekti. Poleg tega standardi iz družine ISO 13628 obravnavajo širše tehnične vidike opreme in sistemov, ki vplivajo na delovanje in varnost vrtine.

Skupna uporaba standardov API in ISO omogoča vzpostavitev celovitega sistema upravljanja vrtin, ki združuje tehnično natančnost in sistemsko obvladovanje tveganj. Med ključne dobre prakse sodijo uporaba večbariernih sistemov zaščite, dosledno preverjanje tesnosti zapornih elementov, stalno spremljanje stanja vrtine ter uporaba certificiranih materialov in postopkov. Poseben poudarek je na preventivnem pristopu, saj pravočasno odkrivanje in odpravljanje nepravilnosti bistveno zmanjšuje tveganje za resne okvare in okoljske posledice.

Na splošno lahko ugotovimo, da standardi API in ISO predstavljajo temelj sodobnega upravljanja naftno-plinskih vrtin. Njihova dosledna uporaba omogoča zmanjševanje tehničnih in okoljskih tveganj, izboljšanje kakovosti izvedbe ter zagotavljanje dolgoročne varnosti in trajnosti energetskih projektov.

6.2. Slovenska zakonodaja na področju rudarstva in varstva okolja

Raziskovanje, izkoriščanje in zapiranje naftnih ter plinskih vrtin v Sloveniji je urejeno s kombinacijo rudarske, okoljske in vodne zakonodaje. Ta zakonodajni okvir določa pogoje za pridobivanje energetskih mineralnih surovin, tehnične zahteve za izvajanje rudarskih del ter obveznosti nosilcev rudarskih pravic pri sanaciji in zapiranju rudarskih objektov. V kontekstu naftno-plinskih vrtin zakonodaja ureja celoten življenjski cikel vrtine – od raziskovalnega vrtanja do trajne likvidacije vrtine ter sanacije okolja.

Temeljni pravni akt na področju izkoriščanja mineralnih surovin v Sloveniji je ZRud-1, ki določa pogoje za raziskovanje in izkoriščanje mineralnih surovin ter ureja upravljanje rudarskih objektov (ZRud-1, 2010). Zakon opredeljuje nafto, zemeljski plin in druge ogljikovodike kot energetske mineralne surovine, ki so v lasti Republike Slovenije. Pravico do njihovega raziskovanja ali izkoriščanja lahko pridobijo pravne ali fizične osebe le na podlagi podeljene rudarske pravice oziroma koncesije države (ZRud-1, 4. člen).

Poleg lastništva mineralnih surovin zakon določa tudi pogoje za izvajanje rudarskih del. Nosilec rudarske pravice mora za izvajanje raziskovalnih ali proizvodnih del pripraviti ustrezno rudarsko tehnično dokumentacijo, ki vključuje projekt vrtanja, opis tehničnih rešitev ter oceno vplivov na okolje. Rudarsko projektiranje, tehnično vodenje rudarskih del in nadzor nad njihovim izvajanjem lahko izvajajo le strokovno usposobljene osebe z ustreznimi licencami (ZRud-1, 2010). Namen teh določb je zagotoviti strokovno načrtovanje rudarskih objektov in zmanjšati tveganja za varnost ljudi ter okolje.

Pomemben del rudarske zakonodaje predstavlja tudi regulacija opustitve rudarskih del. Ko vrtina ni več primerna za nadaljnjo uporabo ali ko se izkoriščanje nahajališča zaključi, mora nosilec rudarske pravice izvesti postopek trajne opustitve rudarskega objekta. Ta postopek vključuje zapiranje vrtine, odstranitev površinske opreme in izvedbo sanacijskih ukrepov na prizadetem območju. V skladu z določbami zakona mora nosilec rudarske pravice pred začetkom zapiralnih del pridobiti dovoljenje za opustitev rudarskih del, ki ga izda pristojni državni organ (ZRud-1, 97. člen). Po izvedbi zapiralnih del se opravi tehnični pregled, s katerim se preveri ustreznost izvedenih sanacijskih ukrepov.

Postopek opuščanja vrtin je v naftno-plinski industriji znan kot Plug and Abandonment (P&A). Namen tega postopka je trajno zapreti vrtino in preprečiti migracijo plinov ali tekočin med geološkimi plastmi ali proti površju. V tehničnem smislu postopek običajno vključuje vgradnjo cementnih zapor na ključnih globinah vrtine, odstranitev ali zapolnitev vrtinske opreme ter

trajno zaprtje vrtinske glave. Zakonodaja zahteva, da so ti postopki izvedeni na način, ki zagotavlja dolgoročno stabilnost vrtine ter preprečuje negativne vplive na okolje.

Poleg rudarske zakonodaje imajo pomembno vlogo tudi predpisi s področja varstva okolja. Okoljski vidik rudarskih dejavnosti ureja predvsem Zakon o varstvu okolja (ZVO-2), ki določa splošne obveznosti za preprečevanje in zmanjševanje vplivov gospodarskih dejavnosti na okolje (ZVO-2, 2022). Ta zakon uvaja obveznost presoje vplivov na okolje za projekte, ki lahko pomembno vplivajo na okolje. Med takšne projekte sodijo tudi dejavnosti vrtanja globokih vrtin in izkoriščanja ogljikovodikov. Presoja vplivov na okolje vključuje analizo možnih vplivov na tla, zrak, vode in ekosisteme ter opredelitev ukrepov za njihovo zmanjšanje.

Poseben pomen ima tudi varstvo vodnih virov, ki je v Sloveniji urejeno z Zakonom o vodah (ZV-1). Ta zakon določa pravila za varstvo vodnih virov in preprečevanje onesnaževanja podzemnih voda (ZV-1, 2002). V primeru naftno-plinskih vrtin so te določbe ključne predvsem zaradi potencialnega tveganja migracije ogljikovodikov ali drugih snovi v vodonosnike. Zato zakonodaja zahteva ustrezno načrtovanje vrtinske konstrukcije, pravilno cementiranje vrtinskih cevi ter ustrezno izvedbo zapiranja vrtin, da se prepreči komunikacija med geološkimi plastmi.

Poleg teh zakonov igra pomembno vlogo tudi nadzor nad izvajanjem rudarskih dejavnosti. Inšpekcijski nadzor nad rudarskimi deli izvajajo rudarski inšpektorji, ki preverjajo skladnost izvajanja rudarskih del z zakonodajo, tehničnimi predpisi in varnostnimi standardi (ZRud-1, 127. člen). Njihova naloga je nadzor nad fazami vrtanja, proizvodnje in zapiranja vrtin ter preverjanje ustreznosti izvedenih sanacijskih ukrepov.

Celovit zakonodajni okvir, ki vključuje rudarsko, okoljsko in vodno zakonodajo, predstavlja temelj za varno upravljanje naftno-plinskih vrtin v Sloveniji. Posebej pomembna je faza zapiranja vrtin, saj lahko nepravilno izvedeni postopki likvidacije predstavljajo dolgoročno tveganje za okolje, predvsem za podzemne vode in tla. Zaradi tega zakonodaja zahteva natančno načrtovanje postopkov opustitve rudarskih del ter nadzor nad njihovo izvedbo.

Razumevanje zakonodajnega okvira je pomembno tudi pri analizi stanja vrtin na območju Lendave, kjer se je raziskovanje in izkoriščanje ogljikovodikov izvajalo več desetletij. Pri ocenjevanju teh vrtin je treba upoštevati tako tehnične značilnosti vrtin kot tudi zakonodajne zahteve glede njihovega zapiranja in sanacije. Le kombinacija tehničnega in pravnega pristopa omogoča celovito oceno integritete vrtin ter morebitnih tveganj za okolje.

Zakonodajni okvir življenjskega cikla naftno-plinske vrtine v Sloveniji



Slika 16: Zakonodajni okvir življenjskega cikla vrtin v SLO (vir: lasten vir)

6.3. Industrijski standardi zapiranja vrtin

Čeprav zakonodajni okvir na evropski in nacionalni ravni določa temeljne zahteve glede varstva okolja, varnosti in odgovornosti upravljavcev, sam po sebi ne opredeljuje natančnih tehničnih postopkov zapiranja vrtin. Prav zaradi tega imajo pomembno vlogo industrijski standardi in tehnične smernice, ki predstavljajo strokovno podlago za praktično izvedbo teh zahtev. Ti standardi dopolnjujejo zakonodajo, saj določajo konkretne metode, materiale in postopke, s katerimi je mogoče zagotoviti dolgoročno stabilnost vrtin ter preprečiti negativne vplive na okolje. Na ta način industrijski standardi delujejo kot ključna vez med regulatornimi cilji in njihovo dejansko implementacijo v praksi. Poleg zakonodajnega okvira imajo pri zapiranju naftno-plinskih vrtin ključno vlogo tudi industrijski standardi in tehnične smernice, ki določajo konkretne postopke ter metode izvedbe. Medtem ko zakonodaja opredeljuje splošne zahteve glede varstva okolja, varnosti in odgovornosti upravljavcev, industrijski standardi podrobneje določajo, kako je te zahteve mogoče doseči v praksi. Tako predstavljajo pomemben povezovalni element med regulatornimi cilji in tehnično izvedbo zapiranja vrtin.

Industrijski standardi niso pravno zavezujoči v enaki meri kot zakonodaja, vendar imajo v praksi velik pomen, saj jih regulatorni organi pogosto vključujejo v pogoje dovoljenj ali jih uporabljajo kot referenco pri nadzoru. Njihova uporaba omogoča enotnejšo in bolj predvidljivo izvedbo postopkov, hkrati pa zmanjšuje tveganje za tehnične napake, ki bi lahko vodile do

okoljskih posledic. Med najpomembnejše organizacije na področju razvoja standardov sodi American Petroleum Institute (API), ki je razvil številne smernice za zapiranje vrtin. Ena ključnih je priporočena praksa API RP 1004, ki določa osnovna načela zapiranja in poudarja pomen uporabe več zapornih barier. Ta pristop temelji na zagotavljanju redundance sistema, kjer posamezna odpoved ne vodi nujno do izgube celotne zapore. Standardi API podrobno opredeljujejo tudi zahteve glede cementiranja, izbire materialov ter preverjanja tesnosti zapornih elementov (API, 2018). Pomembno vlogo imajo tudi mednarodni standardi ISO, zlasti ISO 16530, ki obravnava celovit življenjski cikel vrtine, vključno z njenim zapiranjem. Ti standardi poudarjajo pomen integritete vrtine skozi celotno obdobje njenega obratovanja in po zaprtju, pri čemer izpostavljajo potrebo po sistematičnem načrtovanju, dokumentiranju in spremljanju. Poseben poudarek je namenjen upravljanju tveganj, kar vključuje identifikacijo potencialnih poti za migracijo fluidov ter uvedbo ustreznih zapornih rešitev.

V evropskem prostoru so pomembne tudi smernice NORSOK, ki izvirajo iz norveške naftne industrije. Te smernice veljajo za ene najstrožjih in najnaprednejših, saj poleg tehničnih zahtev vključujejo tudi vidike varstva okolja in dolgoročne stabilnosti vrtin. Standardi NORSOK poudarjajo obveznost dokazovanja trajne integritete zapornih sistemov ter zahtevajo uporabo visokokakovostnih materialov in naprednih metod testiranja. Industrijski standardi podrobno določajo tudi konkretne tehnične postopke, kot so cementiranje vrtin, uporaba mehanskih zapor, testiranje tesnosti ter nadzor nad stanjem vrtine po zaprtju. Cementiranje mora zagotoviti popolno zapolnitev prostora med ohišjem vrtine in okoliško kamnino, pri čemer se pogosto uporabljajo posebne cementne mešanice z izboljšanimi lastnostmi. Mehanski zaporni elementi, kot so mostni čepi, se uporabljajo kot dodatna varnostna komponenta, ki povečuje stabilnost sistema. Pomemben del standardov je tudi preverjanje kakovosti izvedbe. To vključuje tlačne teste, geofizikalno logiranje ter druge metode, s katerimi se ugotavlja, ali so zaporni elementi pravilno nameščeni in učinkoviti. Takšni postopki so ključni za zagotavljanje, da vrtina ne predstavlja tveganja za okolje.

Kljub številnim prednostim pa uporaba industrijskih standardov odpira tudi določene izzive. Ker standardi niso vedno pravno zavezujoči, je njihova uporaba odvisna od zahtev regulatorjev in odgovornosti upravljavcev. To lahko vodi do razlik v praksi med posameznimi državami ali projekti. Poleg tega naprednejši standardi pogosto zahtevajo višje finančne vložke, kar lahko vpliva na izbiro tehničnih rešitev, zlasti pri manjših ali starejših vrtinah. Pomembna problematika je tudi dolgoročna učinkovitost zapornih sistemov. Čeprav standardi določajo visoke zahteve glede izvedbe, raziskave kažejo, da lahko materiali, kot sta cement in jeklo, sčasoma degradirajo, kar lahko vodi do ponovne vzpostavitve poti za migracijo fluidov (Davies idr., 2014). Zaradi tega sodobni standardi vse bolj poudarjajo pomen dolgoročnega spremljanja in upravljanja zaprtih vrtin. Na podlagi navedenega je mogoče zaključiti, da industrijski standardi predstavljajo ključen element zagotavljanja varnega in učinkovitega zapiranja vrtin. Njihova glavna prednost je v tem, da zagotavljajo konkretne tehnične rešitve za doseganje ciljev, ki jih določa zakonodaja. Hkrati pa njihova učinkovitost ni odvisna le od njihove vsebine, temveč predvsem od dosledne uporabe v praksi in ustreznega nadzora.

6.4. Evropska zakonodaja in okoljske smernice

Evropska zakonodaja in okoljske smernice na področju naftno-plinskih vrtin

Evropska zakonodaja na področju naftno-plinske dejavnosti temelji na celostnem pristopu varstva okolja, pri čemer posamezne direktive pokrivajo različne vidike vplivov na okolje. Čeprav ni enotnega predpisa, ki bi urejal izključno zapiranje vrtin, kombinacija več direktiv ustvarja sistem, ki določa zahteve glede zaščite podzemnih voda, tal, zraka ter odgovornosti upravljavcev. V nadaljevanju so predstavljene ključne direktive skupaj z njihovimi omejitvami in izzivi v praksi.

Okvirna vodna direktiva (2000/60/ES)

Okvirna vodna direktiva predstavlja temelj evropske politike upravljanja voda. Njen glavni cilj je doseganje dobrega kemijskega in ekološkega stanja vseh voda ter preprečevanje njihovega poslabšanja. V kontekstu naftno-plinskih vrtin to pomeni, da morajo biti vsi posegi, vključno z zapiranjem vrtin, izvedeni tako, da ne pride do onesnaženja vodonosnikov ali spremembe njihove naravne sestave.

Direktiva zahteva stalno spremljanje kakovosti voda ter izvajanje ukrepov za preprečevanje onesnaženja. To vključuje tudi nadzor nad morebitnim uhajanjem fluidov iz vrtin, ki bi lahko vplivalo na podzemne vode.

V praksi pa se pojavljajo določene problematike. Ena izmed ključnih težav je, da direktiva določa cilje (npr. »dobro stanje voda«), ne pa konkretnih tehničnih ukrepov za njihovo doseganje. To pomeni, da so države članice odgovorne za interpretacijo in izvajanje ukrepov, kar lahko vodi do razlik v praksi. Poleg tega je zaznavanje onesnaženja podzemnih voda pogosto časovno zamaknjeno, saj se vplivi lahko pokažejo šele po več letih ali desetletjih, kar otežuje pravočasno ukrepanje.

- **Člen 4 – Okoljski cilji**
 - Ta člen določa, da morajo države članice preprečiti poslabšanje stanja podzemnih voda.
 - Na kratko: Če zaradi slabo zaprte vrtine pride do kontaminacije vodonosnika, je to neposredna kršitev tega člena.
- **Člen 11 – Programi ukrepov**
 - Države morajo vzpostaviti ukrepe za zaščito voda, vključno z nadzorom onesnaževanja.
 - Na kratko: Sem spadajo zahteve za pravilno cementiranje in nadzor vrtin.
- **Člen 8 – Spremljanje stanja voda**
 - Zahteva redno spremljanje kakovosti voda.
 - Na kratko: Omogoča zaznavanje vplivov zaprtih vrtin na podzemne vode.

Direktiva o industrijskih emisijah (2010/75/EU)

Direktiva o industrijskih emisijah določa okvir za preprečevanje in nadzor onesnaževanja iz industrijskih dejavnosti. Njeno osrednje načelo je uporaba najboljših razpoložljivih tehnik (BAT), ki naj bi zagotavljale najmanjši možni vpliv na okolje.

V kontekstu zapiranja vrtin to pomeni uporabo tehničnih rešitev, ki zagotavljajo visoko stopnjo tesnjenja in preprečujejo emisije v zrak, vodo in tla. Direktiva spodbuja uporabo naprednih materialov in tehnologij ter optimizacijo postopkov.

Glavna problematika te direktive je povezana z dejstvom, da so BAT smernice pogosto splošne in ne zajemajo vseh specifičnih primerov, kot so opuščene vrtine. Poleg tega implementacija BAT zahteva visoke finančne vložke, kar lahko predstavlja omejitev, zlasti pri manjših projektih ali starejših vrtinah. Posledično se lahko v praksi uporabljajo kompromisne rešitve, ki ne dosežajo najvišjih standardov.

- **Člen 11 – Splošne obveznosti upravljavca**
 - Zahteva uporabo najboljših razpoložljivih tehnik (BAT).
 - Na kratko: Zapiranje vrtin mora biti izvedeno z najboljšimi razpoložljivimi materiali in metodami.
- **Člen 14 – Pogoji dovoljenja**
 - Določa okoljske pogoje, ki jih mora upravljavec izpolnjevati.

- Na kratko: Lahko vključuje zahteve glede tesnjenja vrtine in preprečevanja emisij.
- **Člen 16 – Spremljanje emisij**
 - Zahteva nadzor nad emisijami.
 - Na kratko: Uporablja se za nadzor uhajanja plinov (npr. metana) iz vrtin.

Direktiva o presoji vplivov na okolje (2011/92/EU)

Direktiva o presoji vplivov na okolje (EIA) določa obveznost ocenjevanja vplivov projektov na okolje pred njihovo izvedbo. Namen te direktive je preprečiti negativne vplive z zgodnjim načrtovanjem in uvedbo zaščitnih ukrepov.

Pri naftno-plinskih vrtinah se EIA običajno uporablja v fazi načrtovanja, redkeje pa pri zapiranju vrtin, razen v primerih večjih sanacijskih projektov. To pomeni, da so potencialni vplivi zapiranja pogosto manj podrobno analizirani kot vplivi vrtanja ali proizvodnje.

Ena izmed ključnih omejitev direktive je, da se osredotoča predvsem na kratkoročne in neposredne vplive, medtem ko dolgoročni vplivi, kot sta postopna degradacija zapornih sistemov ali poznejša migracija fluidov, pogosto niso dovolj upoštevani. To predstavlja pomembno vrzel v kontekstu zapiranja vrtin, kjer so prav dolgoročni vplivi ključni.

- **Člen 3 – Vsebina presoje vplivov**
 - Zahteva oceno vplivov na: vodo, tla, zrak.
 - Na kratko: Vplivi vrtin (tudi zapiranja) morajo biti analizirani celostno.
- **Priloga I in II**
 - Določa projekte, za katere je EIA obvezna ali potrebna presoja.
 - Na kratko: Naftno-plinski projekti (vključno z večjimi sanacijami) sodijo sem.

Direktiva o odgovornosti za okoljsko škodo (2004/35/ES)

Ta direktiva uvaja načelo »onesnaževalec plača« in določa odgovornost upravljavcev za preprečevanje in sanacijo okoljske škode. V primeru naftno-plinskih vrtin to pomeni, da je upravljavec odgovoren za morebitno onesnaženje podzemnih voda, tal ali zraka, tudi po zaprtju vrtine.

Direktiva spodbuja preventivne ukrepe ter določa, da mora upravljavec v primeru škode zagotoviti njeno sanacijo. To je posebej pomembno pri zapiranju vrtin, saj se lahko posledice nepravilne izvedbe pokažejo šele po daljšem času.

V praksi pa se pojavljajo težave pri določanju odgovornosti, zlasti pri starejših vrtinah, ali v primerih, ko upravljavec ne obstaja več. Takšne vrtine pogosto postanejo breme države, kar pomeni, da se stroški sanacije prenesejo na javna sredstva. Poleg tega je dokazovanje vzročno-posledične povezave med vrtino in onesnaženjem pogosto kompleksno in dolgotrajno.

- **Člen 5 – Preventivni ukrepi**
 - Upravljavec mora ukrepati, če obstaja nevarnost škode.
 - Na kratko: Če obstaja tveganje uhajanja iz vrtine, mora upravljavec ukrepati še pred škodo.
- **Člen 6 – Sanacijski ukrepi**
 - Če pride do škode, jo mora upravljavec sanirati.
 - Na kratko: Sanacija onesnaženih voda ali tal zaradi vrtine.
- **Člen 8 – Stroški**
 - Uveljavlja načelo »onesnaževalec plača«.
 - Na kratko: Upravljavec nosi stroške sanacije vrtine.

Regulativa na področju emisij metana

V zadnjih letih Evropska unija vse več pozornosti namenja emisijam metana, ki predstavljajo pomemben toplogredni plin. Novi zakonodajni okvirji uvajajo zahteve za spremljanje, poročanje in zmanjševanje emisij metana, tudi iz opuščениh vrtin.

To vključuje obveznosti zaznavanja uhajanj, izvajanja popravil ter dolgoročnega monitoringa. Takšni ukrepi so posebej pomembni, saj so opuščene vrtime prepoznane kot pomemben vir emisij na globalni ravni (IEA, 2020).

Glavna problematika na tem področju je, da so sistemi zaznavanja in spremljanja emisij tehnično zahtevni in finančno obremenjujoči. Poleg tega so metode merjenja pogosto kompleksne, kar lahko vodi do podcenjevanja dejanskih emisij. V praksi to pomeni, da kljub obstoju regulative dejanski vplivi niso vedno v celoti zaznani.

Sklepna kritična ocena

Razširjena analiza evropske zakonodaje kaže, da ta zagotavlja trdne temelje za varstvo okolja, vendar se ključne pomanjkljivosti pojavljajo predvsem v implementaciji, nadzoru in obravnavi dolgoročnih vplivov. Direktive so med seboj dobro povezane, vendar pogosto ne zagotavljajo dovolj konkretnih tehničnih smernic, kar vodi do razlik v praksi med državami.

Posebej izstopa problem dolgoročnega spremljanja, ki je pri zapiranju vrtin ključnega pomena, vendar ni vedno sistematično urejen. Prav tako ostaja izziv obravnavo starejših vrtin, kjer odgovornost in standardi pogosto niso jasno določeni.

Na podlagi tega je mogoče zaključiti, da evropska zakonodaja učinkovito postavlja okvir, vendar je njena dejanska uspešnost odvisna predvsem od dosledne implementacije na nacionalni ravni, tehnološke razvitosti in razpoložljivih sredstev.

Evropska zakonodaja področja zapiranja naftno-plinskih vrtin ne ureja z enotnim pravnim aktom, temveč ga obravnava posredno prek več direktiv, ki skupaj zagotavljajo celovit okvir varstva okolja. Ključno vlogo pri zaščiti podzemnih voda ima Direktiva 2000/60/ES (Okvirna vodna direktiva), pri čemer člen 4 določa obveznost preprečevanja poslabšanja stanja voda, kar pomeni, da mora biti zapiranje vrtin izvedeno na način, ki onemogoča kakršno koli onesnaženje vodonosnikov. Dodatno člen 11 iste direktive zahteva izvajanje programov ukrepov za nadzor onesnaževanja, medtem ko člen 8 uvaja obveznost spremljanja stanja voda, kar omogoča zaznavanje morebitnih vplivov zaprtih vrtin na okolje. Področje emisij in tehničnih rešitev ureja Direktiva 2010/75/EU o industrijskih emisijah, kjer člen 11 določa uporabo najboljših razpoložljivih tehnik (BAT), kar v praksi pomeni uporabo naprednih metod cementiranja in tesnjenja vrtin, člen 14 pa opredeljuje pogoje dovoljenj, ki lahko vključujejo zahteve glede preprečevanja emisij in zaščite okolja. Pomemben vidik preventivnega delovanja zagotavlja Direktiva 2011/92/EU o presoji vplivov na okolje, kjer člen 3 zahteva celovito oceno vplivov na vodo, tla in zrak, kar omogoča pravočasno prepoznavanje tveganj že v fazi načrtovanja projektov. V primeru nastanka okoljske škode se uporablja Direktiva 2004/35/ES o okoljski odgovornosti, pri čemer člen 5 določa obveznost izvajanja preventivnih ukrepov ob tveganju za škodo, člen 6 pa nalaga izvedbo sanacijskih ukrepov, medtem ko člen 8 uveljavlja načelo »onesnaževalec plača«. Posebno pomembna za zaščito podzemnih voda je tudi Direktiva 2006/118/ES, kjer člen 6 prepoveduje neposreden vnos nevarnih snovi v podzemne vode, kar vključuje tudi migracijo ogljikovodikov skozi neustrezno zaprte vrtime. V zadnjem obdobju pa se regulativni okvir dopolnjuje še z evropsko zakonodajo na področju emisij metana, ki uvaja obveznosti zaznavanja in odpravljanja uhajanj, kar dodatno krepi zahteve glede dolgoročne integritete zaprtih vrtin. Na podlagi navedenega je mogoče ugotoviti, da evropska zakonodaja kljub odsotnosti enotnega predpisa učinkovito pokriva ključne vidike

zapiranja vrtin, saj združuje zahteve glede zaščite voda, preprečevanja emisij, ocene vplivov in odgovornosti upravljavcev v enoten sistem varstva okolja.

Slovenska zakonodaja na področju zapiranja naftno-plinskih vrtin je v veliki meri usklajena z evropskimi direktivami, saj povzema njihove ključne zahteve in jih prilagaja nacionalnemu prostoru. Načela iz Okvirne vodne direktive (2000/60/ES), ki zahtevajo preprečevanje poslabšanja stanja voda, so prenesena v ZVO-2, ki določa obveznost zaščite podzemnih in površinskih voda. Podobno se zahteve Direktive o industrijskih emisijah (2010/75/EU), zlasti glede uporabe najboljših razpoložljivih tehnik, odražajo v tehničnih zahtevah ZRud-1, ki predpisuje varno in ustrezno zapiranje vrtin. Direktiva o presoji vplivov na okolje (2011/92/EU) je v slovenski pravni red vključena prek postopkov presoje vplivov na okolje, ki se izvajajo pri načrtovanju večjih projektov, vključno z rudarskimi posegi.

Kljub visoki stopnji formalne usklajenosti pa se razlike med evropskim in slovenskim sistemom kažejo predvsem v implementaciji in nadzoru. Evropska zakonodaja poudarja dolgoročno spremljanje in sistematičen nadzor, medtem ko je v Sloveniji ta vidik pogosto manj razvit ali manj dosledno izveden. Prav tako evropski okvir vse bolj izpostavlja problem emisij metana iz opuščenih vrtin, kar postopoma vpliva tudi na slovensko zakonodajo in prakso. Na podlagi tega je mogoče zaključiti, da Slovenija sledi evropskim smernicam, vendar obstaja prostor za izboljšave predvsem na področju dolgoročnega monitoringa, standardizacije postopkov in doslednega izvajanja nadzora, kar bi prispevalo k večji varnosti in boljšemu varstvu okolja.

7. PRIMERJALNA ANALIZA S TUJO PRAKSO

7.1. Izbrani primer naftno-plinskega polja v tujini

Naftno-plinske vrtine v Sloveniji so večinoma skoncentrirane v severovzhodnem delu države, predvsem na območju Murske depresije, ki predstavlja del širšega Panonskega bazenskega sistema. Ta geološki prostor je značilen po debelih zaporedjih neogenskih sedimentov, predvsem miocenskih plasti, kjer se ogljikovodiki akumulirajo v poroznih peščenjaki, ki so prekriti z neprepustnimi plastmi laporjev ali glin. Takšna geološka zgradba omogoča nastanek rezervoarjev, vendar so ti pogosto manjšega obsega, razdrobljeni in geološko kompleksni, kar otežuje njihovo učinkovito izkoriščanje.

Globine vrtin v Sloveniji se najpogosteje gibljejo med približno 1000 in 3000 m. Ta razpon globin odraža raznolikost geoloških struktur in različne tipe nahajališč. Zaradi relativno majhnih zalog ogljikovodikov ter kompleksne zgradbe rezervoarjev se Slovenija uvršča med države z manjšimi kopenskimi naftno-plinskimi polji, kjer so ključnega pomena učinkovito upravljanje vrtin, optimizacijo izrabe rezervoarjev ter celovito načrtovanje življenjskega cikla vrtine – od raziskovanja do zapiranja (Bourgoyne idr., 1991).

Pri primerjavi slovenskih razmer je zato smiselno izhajati iz držav, ki imajo podobne geološke značilnosti, zlasti znotraj Panonskega bazena. Ena izmed najprimerljivejših držav je Madžarska, kjer večina kopenskih naftnih in plinskih polj prav tako je v tem bazenskem sistemu. Geološka zgradba rezervoarjev je zelo podobna slovenski, saj gre večinoma za miocenske peščenjake s primerljivo poroznostjo in prepustnostjo, kar pomeni, da so pogoji akumulacije ogljikovodikov skoraj identični.

Globine vrtin na Madžarskem se običajno gibljejo med 1500 in 3500 m, kar je zelo primerljivo s slovenskimi vrtinami. Madžarska predstavlja primer dobre prakse predvsem zaradi učinkovitega upravljanja zrelih naftno-plinskih polj. Uporablja različne metode za izboljšano pridobivanje ogljikovodikov (angl. *enhanced oil recovery* – EOR), kot so injektiranje vode, plinov ali kemikalij, kar omogoča večji izkoristek rezervoarjev. Poleg tega je razvit digitalni nadzor proizvodnje, ki omogoča spremljanje delovanja vrtin v realnem času ter optimizacijo njihovega obratovanja.

Pomemben vidik madžarske prakse je tudi postopno preusmerjanje opuščenih vrtin v geotermalne energetske sisteme. Takšen pristop omogoča ponovno uporabo obstoječe infrastrukture in predstavlja trajnostno rešitev za izrabo podzemnih virov. V kontekstu energetskega prehoda ima takšna praksa velik potencial tudi za Slovenijo, kjer so geotermalni viri prav tako prisotni.

Podobno geološko okolje ima tudi Hrvaška, zlasti v severnem delu države, kjer so naftna in plinska polja so Dravsko-savski depresiji. Tudi ta je del Panonskega bazenskega sistema, zato so geološke razmere zelo primerljive s slovenskimi. Hrvaška nahajališča so večinoma manjša kopenska polja z globinami vrtin med približno 1000 in 3000 m.

Dobre prakse v hrvaški naftni industriji vključujejo optimizacijo proizvodnje v starejših vrtinah, uporabo horizontalnega vrtanja ter izboljšano upravljanje rezervoarjev. Takšni pristopi omogočajo povečanje učinkovitosti izkoriščanja obstoječih virov. Poleg tega se tudi na Hrvaškem vse bolj razvijajo projekti, ki vključujejo ponovno uporabo starih vrtin za geotermalne namene, kar kaže na podobno usmeritev kot na Madžarskem.

Za primerjavo je relevantna tudi Avstrija, predvsem območje Dunajskega bazena, kjer so pomembna kopenska naftno-plinska polja. Čeprav so nekatera nahajališča večja kot v Sloveniji, so globine vrtin pogosto podobne, običajno med 2000 in 4000 m. Avstrija izstopa po zelo naprednih okoljskih standardih ter uporabi sodobnih tehnologij.

Med ključne prakse sodijo digitalni sistemi za spremljanje proizvodnje, reinjekcija ogljikovega dioksida za izboljšano pridobivanje nafte ter dolgoročno upravljanje zrelih polj. Poseben poudarek je na integraciji okoljskih vidikov v vse faze upravljanja vrtin, vključno z zapiranjem in rekultivacijo površin.

Kot dodatno primerjavo lahko navedemo tudi Nemčijo, zlasti Bavarski molasni bazen, kjer so prav tako prisotna kopenska nahajališča ogljikovodikov z globinami vrtin, primerljivimi s tistimi v Sloveniji. Posebnost nemškega pristopa je predvsem sistematična preusmeritev opuščenih naftnih in plinskih vrtin v geotermalne energetske projekte. Takšna praksa omogoča dolgoročno izrabo obstoječe infrastrukture ter predstavlja pomemben primer trajnostnega upravljanja virov. Na podlagi teh primerjav je mogoče ugotoviti, da so slovenske naftno-plinske vrtine po geoloških značilnostih in globinah najprimerljivejše z vrtinami v državah Panonskega bazena, predvsem na Madžarskem in Hrvaškem. Madžarska pri tem predstavlja najprimernejši referenčni primer dobre prakse, saj združuje podobne geološke razmere, primerljive globine vrtin ter napredne tehnologije upravljanja zrelih naftno-plinskih polj. Analiza teh praks lahko pomembno prispeva k izboljšanju upravljanja slovenskih vrtin ter k razvoju novih načinov izrabe podzemnih energetskih virov, zlasti geotermalne energije.

7.2. Prakse iz tujine

Izkušnje iz tujine kažejo, da je uspešnost likvidacije naftno-plinskih vrtin v veliki meri odvisna od kombinacije ustrezne zakonodaje, tehničnih standardov in učinkovitega nadzora nad izvedbo del (API, 2018). V državah z dolgo tradicijo naftne industrije, kot so Norveška, Združeno kraljestvo, Kanada in Združene države Amerike, so se razvile napredne prakse zapiranja vrtin, ki temeljijo na načelu večbariernega sistema, dolgoročnega spremljanja in strogega regulativnega nadzora.

Med dobre prakse sodijo predvsem uporaba več neodvisnih zapornih barier, ki vključujejo kombinacijo cementnih in mehanskih zapor, ter natančno načrtovanje postopkov zapiranja glede na geološke značilnosti posamezne vrtine. V Norveški, kjer področje ureja Norwegian Petroleum Directorate, je poudarek na dolgoročni integriteti vrtin, pri čemer so upravljavci dolžni dokazati, da so zaporne bariere trajne in zanesljive. Podobno v Združenem kraljestvu North Sea Transition Authority zahteva strogo dokumentiranje postopkov ter preverjanje tesnosti zapor tudi po zaključku likvidacije.

V Kanadi in ZDA so pomemben element dobrih praks tudi programi za sistematično evidentiranje in sanacijo opuščenih vrtin. Organizacije, kot je U.S. Environmental Protection Agency, poudarjajo pomen zmanjševanja emisij metana iz opuščenih vrtin ter uvajajo programe za njihovo identifikacijo in zapiranje. Pomemben vidik predstavlja tudi finančna odgovornost upravljavcev, saj so v številnih državah uvedeni sistemi finančnih jamstev, ki zagotavljajo sredstva za likvidacijo vrtin tudi v primeru prenehanja delovanja podjetja (International Energy Agency, 2020).

Kljub napredku pa praksa v tujini razkriva tudi številne pomanjkljivosti. Med najpogostejše slabe prakse sodi neustrezno zapiranje starejših vrtin, ki pogosto niso bile izvedene po sodobnih standardih. V Združenih državah Amerike je velik problem t. i. »orphan wells« (opuščene vrtine brez znanega upravljavca), ki predstavljajo pomemben vir emisij metana in potencialno tveganje za onesnaženje podzemnih voda (U.S. Environmental Protection Agency, 2021). Podobni problemi se pojavljajo tudi v Kanadi, kjer je število opuščenih vrtin v zadnjih desetletjih naraslo, kar predstavlja finančni in okoljski izziv za državo.

Dodatna slabost je povezana z dolgoročno degradacijo materialov. Raziskave so pokazale, da lahko cement in jekleno ohišje sčasoma izgubi svoje zaščitne lastnosti, kar omogoča ponovno vzpostavitev poti za migracijo plinov in tekočin (Davies idr., 2014). To pomeni, da tudi

pravilno izvedena likvidacija ne zagotavlja popolne varnosti brez ustreznega dolgoročnega spremljanja.

Problematiko predstavlja tudi neenotnost regulative med državami ter v nekaterih primerih pomanjkljiv nadzor nad izvedbo postopkov. V državah z manj razvitim regulativnim okvirom so postopki zapiranja pogosto slabše nadzorovani, kar povečuje tveganje za okoljske vplive. Poleg tega visoki stroški likvidacije lahko vodijo do odlašanja z zapiranjem vrtin ali do iskanja cenejših, manj učinkovitih rešitev.

Kljub navedenim pomanjkljivostim dobre prakse v razvitejših državah jasno kažejo, da je mogoče z ustrezno kombinacijo zakonodaje, tehničnih standardov in nadzora bistveno zmanjšati tveganja, povezana z opuščenimi vrtinami. Ključni elementi uspešnega pristopa so večbariarni sistemi zapiranja, obvezno spremljanje stanja po zaprtju, finančna odgovornost upravljavcev ter sistematično evidentiranje vrtin. Ti pristopi predstavljajo pomembno izhodišče tudi za nadaljnji razvoj praks v drugih državah, vključno s Slovenijo

7.3. Primerjava zapiranja naftno – plinskih vrtin med Slovenijo in sosednjimi državami (Avstrija, Madžarska in Hrvaška)

Zapiranje naftno-plinskih vrtin predstavlja eno ključnih faz v življenjskem ciklu vrtine, ki ima dolgoročne posledice za okolje, varnost in rabo prostora. Čeprav so osnovna načela zapiranja vrtin na mednarodni ravni precej enotna in temeljijo na preprečevanju migracije fluidov ter zagotavljanju stabilnosti podzemnih struktur, se prakse med državami razlikujejo glede na regulativni okvir, obseg industrije in zgodovinske okoliščine razvoja naftno-plinskega sektorja. Primerjava Slovenije z Avstrijo, Hrvaško in Madžarsko tako omogoča vpogled v različne pristope ter identifikacijo dobrih in slabih praks, ki lahko služijo kot izhodišče za nadaljnji razvoj.

Avstrija kot primer dobre prakse: Avstrija velja za eno izmed držav z najbolj sistematično urejenim pristopom k zapiranju vrtin. Kljub relativno majhnemu obsegu proizvodnje je vzpostavila strogo reguliran sistem, ki temelji na jasnih tehničnih standardih in doslednem nadzoru. Ključna značilnost avstrijskega pristopa je uporaba večbarierne sistema zapiranja, pri katerem se kombinirajo cementni čepi in mehanske zapore. Vsaka potencialno problematična plast je izolirana z ločeno zaporno bariero, kar bistveno zmanjšuje tveganje za migracijo plinov ali tekočin.

Posebno pozornost Avstrija namenja preverjanju kakovosti izvedbe. Testiranje tesnosti ni enkratni postopek, temveč se izvaja v več fazah, tako med samim zapiranjem kot tudi po njegovem zaključku. Dodatno se zahteva podrobna dokumentacija vseh izvedenih del, kar omogoča sledljivost in nadzor nad kakovostjo izvedbe. Pomemben element sistema je tudi dolgoročno spremljanje stanja zaprtih vrtin, ki vključuje periodične preglede in meritve.

Kljub visoki učinkovitosti ima avstrijski sistem tudi določene slabosti. Predvsem gre za visoke stroške, povezane z zahtevnimi tehničnimi postopki in obsežnim nadzorom. Ti stroški lahko predstavljajo breme za upravljavce, vendar se upravičujejo z dolgoročno zmanjšanimi tveganji za okolje in družbo.

Slovenska praksa – med standardi in omejitvami: Slovenija ima vzpostavljen ustrezen zakonodajni okvir, ki temelji na evropskih smernicah in vključuje zahteve glede varnega zapiranja vrtin ter sanacije okolja. Tehnični postopki so primerljivi z mednarodnimi standardi in vključujejo cementiranje, uporabo mehanskih zapor ter rekultivacijo površine.

V praksi pa se kažejo določene omejitve. Ena izmed ključnih težav je manjša stopnja standardizacije postopkov, saj se izvedba pogosto prilagaja posameznim projektom. To lahko vodi do razlik v kakovosti izvedbe in otežuje primerljivost med posameznimi vrtinami. Poleg tega je dolgoročno spremljanje stanja zaprtih vrtin v Sloveniji manj razvito, kar predstavlja

potencialno tveganje, saj se lahko nekatere napake pokažejo šele po daljšem časovnem obdobju.

Prednost slovenskega sistema je v tem, da zaradi manjšega obsega industrije omogoča bolj individualen pristop k posameznim projektom. Slabost pa je omejena institucionalna in finančna podpora, ki lahko vpliva na obseg nadzora in spremljanja.

Hrvaška – operativna učinkovitost in izzivi stare infrastrukture: Hrvaška ima daljšo tradicijo naftno-plinske dejavnosti in večje število vrtin, kar vpliva na način upravljanja zapiranja. Pristop je bolj operativno usmerjen, s poudarkom na učinkoviti izvedbi večjega števila projektov. Tehnični postopki zapiranja so primerljivi s slovenskimi in vključujejo uporabo cementnih čepov ter mehanskih zapor.

Ena izmed glavnih slabosti hrvaške prakse je povezana z obstoječimi starejšimi vrtinami, ki niso bile zaprte po sodobnih standardih. Te vrtnice lahko predstavljajo vir emisij metana ali tveganje za onesnaženje podzemnih voda. Poleg tega dolgoročno spremljanje pogosto ni sistematično, kar otežuje pravočasno zaznavanje težav.

Prednost hrvaškega sistema je njegova organizacijska učinkovitost in sposobnost upravljanja večjega števila vrtin, vendar to pogosto pomeni manj poudarka na dolgoročni okoljski varnosti.

Madžarska – industrijski pristop in prilagajanje evropskim zahtevam: Madžarska ima razvito naftno-plinsko industrijo, ki temelji na dolgoletnih izkušnjah in tehničnem znanju. Postopki zapiranja vrtin vključujejo uporabo večbariernih sistemov, vendar so pogosto optimizirani z vidika stroškov in učinkovitosti. Takšen pristop omogoča hitro izvedbo projektov, vendar lahko vodi do kompromisov pri dolgoročni varnosti.

V zadnjih letih se zaradi vpliva evropske zakonodaje povečuje poudarek na varstvu okolja, kar se odraža v izboljšanih standardih in večjem nadzoru. Kljub temu ostaja izziv obvladovanje velikega števila vrtin ter zagotavljanje njihovega dolgoročnega spremljanja.

Primerjalna analiza jasno kaže, da ni enotnega optimalnega modela zapiranja vrtin, temveč je uspešnost odvisna od uravnoteženja med tehničnimi, ekonomskimi in okoljskimi dejavniki. Avstrijski pristop predstavlja najcelovitejši model, saj združuje visoko stopnjo tehnične zanesljivosti, strogo regulativo in učinkovito dolgoročno spremljanje. Vendar pa takšen sistem zahteva visoke finančne vložke, kar je v določenih okoljih težje implementirati.

Slovenski sistem ima dobre temelje, vendar bi ga bilo smiselno nadgraditi z večjo standardizacijo postopkov, izboljšanim nadzorom ter uvedbo sistematičnega dolgoročnega spremljanja. Posebej pomembno je tudi zagotavljanje finančnih mehanizmov, ki omogočajo izvajanje teh ukrepov.

Hrvaška in Madžarska ponujata pomembne izkušnje z vidika upravljanja večjega števila vrtin, vendar njuna praksa razkriva tveganja, povezana z manj sistematičnim pristopom k dolgoročnemu nadzoru. To poudarja pomen integracije okoljskih vidikov v vse faze zapiranja vrtin.

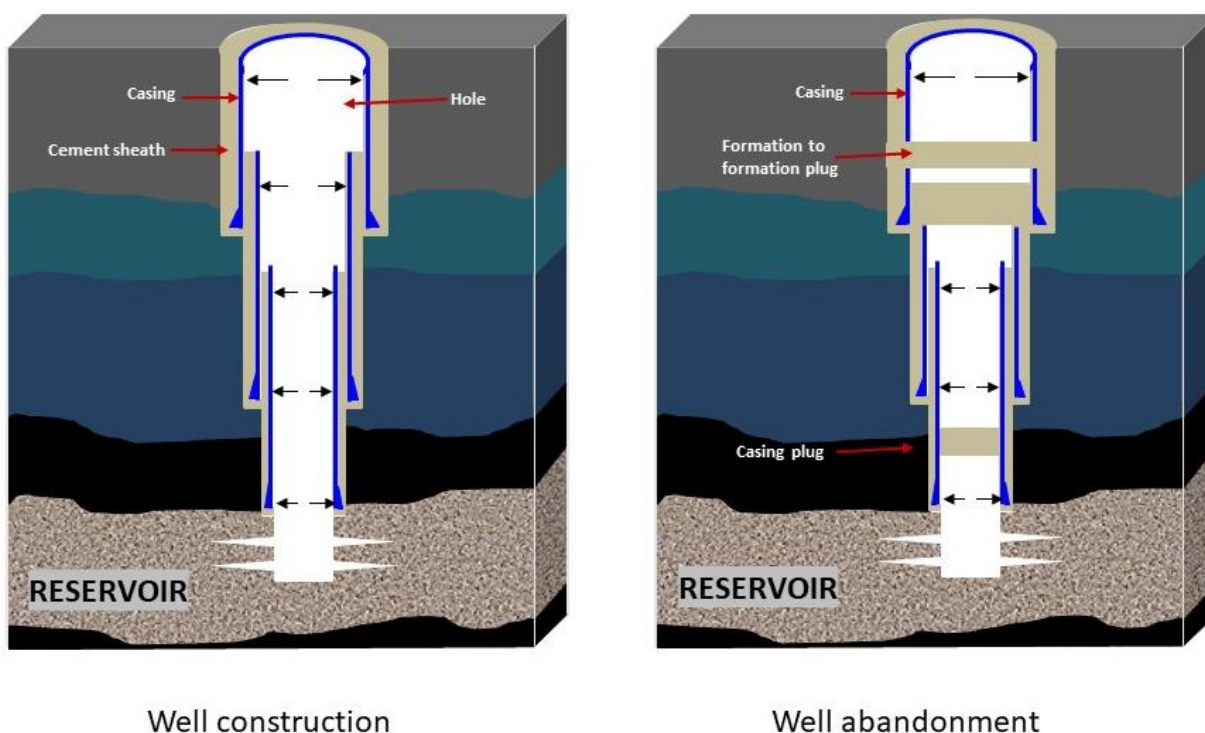
Na podlagi primerjave je mogoče zaključiti, da bi bila za Slovenijo najprimernejša kombinacija pristopov: prevzem strožjih standardov in nadzora iz avstrijskega sistema ter prilagoditev organizacijskih rešitev iz držav z večjim obsegom industrije. Takšen hibridni pristop bi omogočil izboljšanje učinkovitosti in varnosti zapiranja vrtin ter zmanjšanje dolgoročnih okoljskih tveganj.

Po mojem mnenju je največja pomanjkljivost večine obravnavanih sistemov podcenjevanje dolgoročnih vplivov zaprtih vrtin. Čeprav so tehnični postopki zapiranja pogosto izvedeni skladno s standardi, je nadzor po zaprtju pogosto omejen, kar predstavlja pomembno tveganje.

Posebej problematično je dejstvo, da se lahko degradacija materialov pokaže šele po desetletjih, ko je odgovornost upravljavcev že težje določiti.

Zato bi moral biti v prihodnje večji poudarek na razvoju sistemov dolgoročnega spremljanja ter na uporabi novih materialov in tehnologij, ki zagotavljajo večjo trajnost zapornih sistemov. Poleg tega bi bilo smiselno okrepiti finančne mehanizme, ki zagotavljajo sredstva za sanacijo tudi v primeru nepredvidenih okvar.

Celostno gledano zapiranje vrtin ne bi smelo biti obravnavano kot zaključek industrijskega procesa, temveč kot dolgoročna odgovornost do okolja. Le s takšnim pristopom je mogoče zagotoviti trajnostno upravljanje prostora in preprečiti prenos okoljskih bremen na prihodnje generacije.



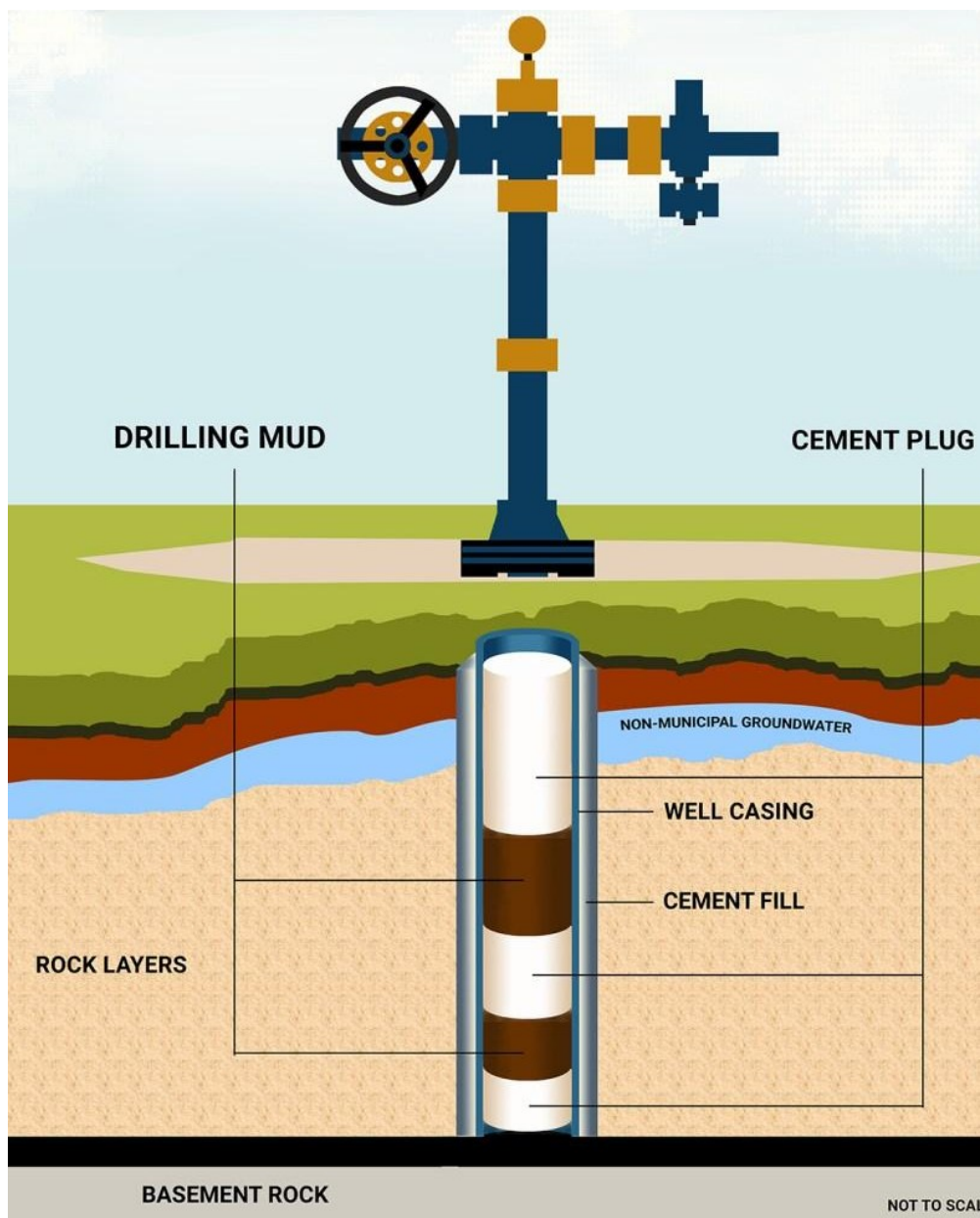
Slika 17: Postopek zapiranja vrtine (Vir: medmrežje)

Na sliki 17 je prikazan primer primerjave med konstrukcijo vrtine med obratovanjem in stanjem po izvedeni likvidaciji. V levem delu je prikazana običajna zgradba vrtine, sestavljena iz obložne kolone (*casing*) in cementnega plašča, ki zagotavljata mehansko stabilnost vrtine ter izolacijo geoloških plasti. Desni del prikazuje vrtino po izvedenem zapiranju, pri katerem so nameščeni različni tipi cementnih čepov, ki predstavljajo ključne zaporne bariere.

Prikazana sta dva osnovna tipa čepov. *Casing plug* je cementni čep, nameščen znotraj obložne kolone, katerega naloga je zagotoviti tesnjenje in preprečiti migracijo fluidov po notranjosti vrtine. Poleg njega je prikazan tudi formation-to-formation plug, ki predstavlja naprednejšo obliko zapore. Pri njegovi izvedbi se obložna kolona in cementni plašč lokalno prestrelita ali prevrtata, nato pa se cementni čep namesti neposredno med geološki plasti. Takšna izvedba omogoča zanesljivejšo izolacijo formacij ter preprečuje migracijo fluidov po zunanji strani obložne kolone v primeru slabo cementiranega ali degradiranega cementnega plašča.

Uporaba večbariernega sistema zapiranja bistveno povečuje dolgoročno varnost likvidirane vrtine, saj zmanjšuje možnost uhajanja plinov ali tekočin proti površju oziroma v višje ležeče geološke plasti. Po drugi strani pa izvedba takšnih zapor povečuje zahtevnost in stroške

likvidacije ter lahko oteži morebitno poznejšo ponovno uporabo vrtnine za druge namene, kot so geotermalna izraba, monitoring ali skladiščenje fluidov.



Slika 18: Prikaz ločenega dela pod in nad površjem (Vir: medmrežje)

Shema prikazuje tudi, da je vrtna po zaprtju odrezana pod površjem, kar preprečuje fizično izpostavljenost in dodatno zmanjšuje tveganje za okolje. Takšen večbariarni sistem zapiranja je danes standardna praksa, saj zagotavlja večjo zanesljivost in dolgoročno stabilnost vrtnine.

Pomembno je poudariti, da mora biti cementiranje izvedeno tako, da se prepreči gibanje fluidov »v ali med podzemnimi vodnimi viri«, kar je tudi ena ključnih zahtev regulative. Prav tako sodobni pristopi predvidevajo uporabo več cementnih čepov za izolacijo posameznih slojev

7.4. Primerjava uporabljenih tehnologij zapiranja vrtin

Tehnologije zapiranja naftno-plinskih vrtin predstavljajo ključni element zagotavljanja dolgoročne varnosti, zaščite okolja ter preprečevanja migracije fluidov med geološkimi plastmi. Osnovni cilj zapiranja vrtin je vzpostavitev trajne hidravlične izolacije med posameznimi plastmi ter preprečevanje uhajanja ogljikovodikov ali drugih tekočin v okolje. Čeprav so temeljna

načela zapiranja vrtin na globalni ravni razmeroma poenotena, obstajajo med državami pomembne razlike v stopnji tehnološke razvitosti, standardizacije postopkov in nadzora nad izvedbo (API, 2018).

V Sloveniji zapiranje vrtin temelji predvsem na klasičnih tehnologijah, pri katerih ima osrednjo vlogo cementiranje. Cementni čepi se vgrajujejo na ključnih globinah, zlasti v območjih vodonosnikov in produktivnih plasti, ter zagotavljajo preprečevanje vertikalne migracije fluidov. Poleg cementnih čepov se uporabljajo tudi mehanski zaporni elementi, kot so mostni čepi, ki služijo kot dodatna podpora in izboljšujejo stabilnost sistema zapiranja. V praksi se pogosto uporablja več zapornih barier, kar povečuje varnost in zmanjšuje tveganje za puščanje. Po izvedbi zapiranja se izvajajo tlačni testi in drugi postopki preverjanja tesnosti, s katerimi se potrjuje učinkovitost zapornih elementov.

Kljub ustrezni tehnični osnovi se v Sloveniji kažejo določene omejitve, predvsem na področju standardizacije postopkov in dolgoročnega spremljanja zaprtih vrtin. Postopki zapiranja so pogosto prilagojeni posameznim vrtinam, kar omogoča prilagodljivost glede na geološke razmere, vendar hkrati otežuje sistematično primerljivost in nadzor. Dodatno pomanjkljivost predstavlja dejstvo, da dolgoročno spremljanje stanja zaprtih vrtin ni vedno dosledno sistematično, kar lahko pomeni povečano tveganje za poznejše uhajanje fluidov ali degradacijo zapornih elementov.

V tujini, zlasti v državah z dolgo tradicijo naftne industrije, kot so Norveška, Združeno kraljestvo, Kanada in Združene države Amerike, so tehnologije zapiranja vrtin bolj standardizirane in tehnološko napredne. Ključni element teh pristopov je uporaba večbariernih sistemov, ki vključujejo kombinacijo cementnih čepov, mehanskih zapor in dodatnih tesnilnih rešitev. Takšen sistem temelji na načelu redundance, kjer odpoved ene bariere ne pomeni nujno izgube celotnega zapornega sistema.

Poleg klasičnega cementiranja se v tujini vse pogosteje uporabljajo napredni materiali, ki izboljšujejo tesnjenje in prilagodljivost zapornih sistemov glede na geološke razmere. Med njimi so ekspanzijski cementi, ki povečujejo volumen po strditvi in s tem izboljšujejo stik s kamnino, ter različni polimerni in smolni materiali, ki omogočajo zapolnjevanje mikro razpok in nepravilnosti v vrtini.

Madžarska, ki je geološko najbolj primerljiva s Slovenijo, uporablja podobne tehnološke pristope, vendar jih dopolnjuje z bolj sistematično organizacijo in vključevanjem okoljskih vidikov v dolgoročno upravljanje vrtin. Zapiranje vrtin je pogosto del širšega koncepta upravljanja podzemnih virov, kjer se upošteva tudi možnost ponovne uporabe vrtin, na primer za geotermalne namene. Takšen pristop ne zmanjšuje le okoljskih tveganj, temveč tudi povečuje trajnostno rabo prostora in infrastrukture (IEA, 2020). Okoljski standardi so tako neposredno povezani z odločitvami o nadaljnji rabi vrtin, kar predstavlja pomembno razliko v primerjavi s slovensko prakso.

Hrvaška uporablja podobne tehnologije zapiranja vrtin kot Slovenija, vendar se spopada z večjimi izzivi zaradi večjega števila starejših vrtin. Pri teh vrtinah okoljski standardi pogosto niso dosegali današnjih zahtev, kar danes pomeni povečano tveganje za okolje. To se kaže predvsem v večji verjetnosti uhajanja plinov in tekočin ter potrebi po dodatnih sanacijskih ukrepih. Takšni primeri poudarjajo pomen povezave med kakovostjo izvedbe zapiranja in dolgoročnim vplivom na okolje, zlasti na podzemne vode in emisije metana (EPA, 2021).

Avstrija predstavlja referenčni primer, kjer so tehnologije zapiranja vrtin tesno povezane z visokimi okoljskimi standardi. Njihov pristop temelji na strogi regulativi, visoki stopnji standardizacije ter obveznem dolgoročnem spremljanju zaprtih vrtin. Tehnološke rešitve so podprte z naprednimi metodami nadzora, kar omogoča zgodnje zaznavanje morebitnih

nepravilnosti. Takšen sistem bistveno zmanjšuje tveganje za okoljske vplive, zlasti na podzemne vode in emisije toplogrednih plinov (IEA, 2020). Pomembna značilnost avstrijskega pristopa je tudi dosledno povezovanje tehničnih postopkov z okoljskimi zahtevami, kar zagotavlja celovit nadzor nad življenjskim ciklom vrtine.

Pomemben napredek predstavlja tudi uporaba digitalnih tehnologij, ki omogočajo natančno spremljanje stanja vrtin v realnem času. Uporabljajo se sistemi za spremljanje tlaka, temperature in integritete vrtine, kar omogoča zgodnje zaznavanje morebitnih nepravilnosti. Razvite so tudi napredne metode za preverjanje kakovosti cementiranja, kot so ultrazvočne meritve in geofizikalno logiranje, ki omogočajo podrobno oceno stanja zapornih barier.

Poseben poudarek v tujini je namenjen dolgoročnemu spremljanju zaprtih vrtin. V številnih državah je takšno spremljanje zakonsko določeno in vključuje redne preglede ter meritve emisij plinov, zlasti metana, ki predstavlja pomemben toplogredni plin (IEA, 2020). Takšen pristop omogoča pravočasno zaznavanje morebitnih puščanj in zmanjšuje tveganje za okolje.

Primerjava med Slovenijo in tujino kaže, da so osnovni tehnološki principi zapiranja vrtin podobni, saj temeljijo na cementiranju in uporabi mehanskih zapor. Ključne razlike pa se pojavljajo v stopnji tehnološke naprednosti, standardizacije postopkov ter obsegu nadzora. V tujini je izrazit večji poudarek na uporabi naprednih materialov, digitalizaciji procesov ter dolgoročnem spremljanju, medtem ko slovenski sistem temelji predvsem na preverjenih, vendar nekoliko tradicionalnejših pristopih.

7.5. Primerjava okoljskih standardov in praks

Okoljski standardi na področju naftno-plinske dejavnosti predstavljajo ključen okvir za zagotavljanje varstva okolja, zlasti pri vrtanju, obratovanju in zapiranju vrtin. V državah Evropske unije, vključno s Slovenijo, Madžarsko, Avstrijo in Hrvaško, so osnovni okoljski standardi v veliki meri usklajeni z evropsko zakonodajo, kot so Direktiva o industrijskih emisijah, Okvirna vodna direktiva ter Direktiva o presoji vplivov na okolje. Kljub temu pa se med državami pojavljajo pomembne razlike v načinu implementacije teh zahtev, stopnji nadzora ter dejanski učinkovitosti izvajanja ukrepov.

Slovenija ima razmeroma dobro razvit zakonodajni okvir na področju varstva okolja, ki vključuje stroge zahteve glede zaščite podzemnih voda, ravnanja z odpadki in sanacije degradiranih območij. Postopki zapiranja vrtin morajo zagotavljati trajno izolacijo geoloških plasti ter preprečevati onesnaženje vodonosnikov, kar je skladno z zahtevami evropske zakonodaje (ZVO-2, 2022). Kljub temu pa se v praksi pojavljajo določene omejitve, predvsem na področju dolgoročnega spremljanja stanja zaprtih vrtin in sistematičnega evidentiranja morebitnih okoljskih vplivov. Pomanjkanje celovitega monitoringa lahko pomeni, da se morebitne emisije plinov ali uhajanje tekočin zaznajo šele z zamikom.

Madžarska, kot del istega geološkega sistema, ima podobne zakonodajne zahteve kot Slovenija, vendar se v praksi kaže večja usmerjenost v upravljanje zrelih naftno-plinskih polj in njihovo postopno preobrazbo. Okoljski standardi vključujejo nadzor nad emisijami, zaščito podzemnih voda ter obvezno sanacijo območij po zaprtju vrtin. Posebnost madžarskega pristopa je integracija okoljskih vidikov v dolgoročno upravljanje virov, kar vključuje tudi ponovno uporabo vrtin za geotermalne namene. Takšen pristop zmanjšuje potrebo po novih posegih v prostor in prispeva k trajnostni rabi podzemnih virov (IEA, 2020).

Hrvaška ima prav tako zakonodajni okvir, usklajen z evropskimi direktivami, vendar se v praksi pojavljajo večje razlike med starejšimi in novejšimi projekti. Pri starejših vrtinah okoljski standardi pogosto niso dosegali današnje ravni, kar danes predstavlja izziv pri sanaciji in upravljanju teh objektov. V zadnjih letih se standardi izboljšujejo, zlasti na področju presoje

vplivov na okolje, ravnanja z odpadki in nadzora nad emisijami. Kljub temu pa ostaja izziv predvsem pri dolgoročnem spremljanju opuščenih vrtin in zagotavljanju njihove okoljske varnosti (European Commission, 2019).

Avstrija izstopa kot država z najvišjo ravno okoljskih standardov med obravnavanimi. Njena zakonodaja ne le sledi evropskim smernicam, temveč jih pogosto presega z dodatnimi zahtevami glede nadzora, transparentnosti in odgovornosti upravljavcev. Poseben poudarek je na zaščiti podzemnih voda, ki vključuje stroge zahteve glede tesnjenja vrtin, nadzora kakovosti cementiranja ter obveznega spremljanja stanja tudi po zaprtju. Poleg tega Avstrija uvaja napredne pristope k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov, vključno z nadzorom uhajanja metana in uporabo tehnologij za njegovo zmanjševanje (IEA, 2020).

Pomembna razlika med državami se kaže tudi v učinkovitosti nadzora nad izvajanjem okoljskih standardov. V Avstriji je nadzor sistematičen in podprt z naprednimi tehnologijami ter jasno določenimi odgovornostmi upravljavcev. V Sloveniji in na Hrvaškem je nadzor pogosto manj centraliziran, kar lahko vpliva na njegovo učinkovitost. Madžarska predstavlja vmesni model, kjer so standardi dobro opredeljeni, vendar je njihova implementacija v praksi odvisna od posameznih projektov.

Dodatno pomemben vidik predstavlja obravnava emisij metana, ki so v zadnjih letih postale ena ključnih okoljskih tem na področju naftno-plinske industrije. Opuščene ali neustrezno zaprte vrtine lahko predstavljajo pomemben vir teh emisij, zato številne države uvajajo strožje zahteve glede njihovega zaznavanja in zmanjševanja (IEA, 2020; EPA, 2021). Na tem področju Avstrija in nekatere druge tehnološko naprednejše države že uvajajo sistematične programe monitoringa, medtem ko so v Sloveniji in na Hrvaškem takšni sistemi še v razvoju.

7.6. Identifikacija dobrih praks

Identifikacija dobrih praks pri zapiranju naftno-plinskih vrtin predstavlja pomemben del izboljševanja tehničnih postopkov, varnosti ter varstva okolja. Gre za sistematičen proces prepoznavanja rešitev, ki so se v praksi izkazale kot učinkovite, zanesljive in dolgoročno trajnostne. Dobre prakse niso nujno univerzalne, temveč so pogosto odvisne od specifičnih geoloških, tehničnih in regulativnih pogojev posamezne države ali območja. Kljub temu pa obstajajo določeni skupni kriteriji, na podlagi katerih je mogoče oceniti njihovo uspešnost.

Eden ključnih načinov identifikacije dobrih praks je analiza uspešnosti izvedenih projektov zapiranja vrtin. Pri tem se ocenjuje tehnična učinkovitost zapornih sistemov, zlasti njihova sposobnost preprečevanja migracije fluidov ter ohranjanja integritete vrtine skozi daljše časovno obdobje. Pomemben kazalnik predstavlja odsotnost uhajanja plinov, predvsem metana, ki je pogosto povezan z neustrezno zaprtimi vrtinami (IEA, 2020). Poleg tega se upošteva tudi stabilnost cementnih zapor in ohišja vrtine, kar je mogoče spremljati z različnimi merilnimi metodami (Davies idr., 2014).

Dobre prakse se zaznavajo tudi prek sistematičnega spremljanja stanja vrtin po njihovem zaprtju. Takšno spremljanje vključuje merjenje tlakov, emisij plinov in morebitnih sprememb v okolju, kot je kakovost podzemnih voda. V državah z razvitejšimi sistemi upravljanja je dolgoročni monitoring zakonsko predpisan, kar omogoča zbiranje podatkov skozi daljše časovno obdobje. Prav časovna dimenzija je ključna, saj se številne pomanjkljivosti zapornih sistemov pokažejo šele po več letih ali celo desetletjih od zaprtja vrtine.

Pomemben vir identifikacije dobrih praks predstavljajo tudi regulatorni organi in mednarodne organizacije, ki na podlagi analiz večjega števila projektov oblikujejo smernice in standarde. Organizacije, kot sta American Petroleum Institute (API) in International Energy Agency (IEA), pripravljajo priporočila, ki temeljijo na izkušnjah iz različnih držav in omogočajo prenos znanja

med različnimi okolji. Takšne smernice vključujejo tehnične zahteve, postopke nadzora ter kriterije za oceno uspešnosti zapiranja vrtin (API, 2018).

Dodatno pomembno vlogo imajo tudi primerjalne študije med državami, ki omogočajo prepoznavanje razlik v pristopih in njihovih rezultatih. Na podlagi takšnih analiz je mogoče ugotoviti, kateri sistemi zagotavljajo boljše rezultate v smislu varnosti in varstva okolja. Na primer, države z razvitejšim sistemom dolgoročnega spremljanja in strožjo regulativo običajno dosegajo boljše rezultate pri preprečevanju emisij in zaščiti podzemnih voda.

Časovni okvir identifikacije dobrih praks je razmeroma dolg, saj zahteva zbiranje podatkov skozi celoten življenjski cikel vrtine, vključno z obdobjem po njenem zaprtju. Kratkoročni rezultati sicer lahko pokažejo tehnično uspešnost izvedbe, vendar za celovito oceno zanesljivosti zapornih sistemov pogosto potrebujemo več let ali desetletij opazovanja. To pomeni, da se dobre prakse pogosto oblikujejo postopoma, na podlagi dolgoročnih izkušenj in analiz.

Kritično je treba poudariti, da identifikacija dobrih praks ni enkraten proces, temveč stalno razvijajoč se sistem. Tehnološki napredek, nove raziskave ter spremembe v zakonodaji vplivajo na to, katere prakse se štejejo za optimalne. Zato je pomembno, da se sistemi upravljanja vrtin redno posodablja in prilagajajo novim spoznanjem.

Na podlagi navedenega je mogoče zaključiti, da identifikacija dobrih praks temelji na kombinaciji tehničnih analiz, dolgoročnega spremljanja, regulativnih smernic in primerjalnih študij. Ključno vlogo pri tem ima časovni vidik, saj se zanesljivost zapornih sistemov lahko ustrezno oceni šele na dolgi rok. Takšen pristop omogoča postopno izboljševanje tehnologij in zmanjševanje okoljskih tveganj, kar je bistveno za trajnostno upravljanje naftno-plinskih vrtin.

V okviru raziskave so bili izvedeni intervjuji s strokovnjaki s področja naftno-plinske dejavnosti, sanacije vrtin in varstva okolja. Namen intervjujev je bil pridobiti dodatne informacije o praktičnih izkušnjah pri zapiranju vrtin, tehničnih težavah ter okoljskih tveganjih.

Intervjuji so bili izvedeni v obliki strukturiranih oziroma polstrukturiranih pogovorov. Vprašanja so bila usmerjena predvsem v postopke cementiranja, nadzor integritete vrtin, monitoring po zaprtju ter primerjavo starejših in sodobnih metod likvidacije.

7.7. Vpliv slabih praks zapiranja vrtin na podzemne vode ter tla in kmetijstvo

Slabe prakse pri zapiranju naftno-plinskih vrtin lahko predstavljajo pomembno tveganje za okolje, zlasti za podzemne vode in tla, ki so ključni naravni viri za oskrbo prebivalstva in kmetijsko dejavnost. Neustrezno izvedeno zapiranje vrtin lahko povzroči vzpostavitev poti za migracijo plinov in tekočin med geološkimi plastmi, kar lahko vodi do dolgoročnih okoljskih posledic (Davies idr., 2014).

Podzemne vode so eden najpomembnejših naravnih virov, saj predstavljajo glavni vir pitne vode v številnih regijah, vključno s Pomurjem. Slabo zaprte vrtine lahko delujejo kot umetni kanali, ki povezujejo različne geološke plasti, kar omogoča prehajanje onesnaženih fluidov v vodonosnike. Med najpogostejšimi onesnaževali so slanice, ogljikovodiki ter plini, kot je metan.

Prisotnost ogljikovodikov v podzemni vodi lahko bistveno poslabša njeno kakovost, saj so številne spojine toksične in težko razgradljive. Poleg tega lahko migracija slanice poveča mineralizacijo vode, kar zmanjša njeno uporabnost za pitje ali kmetijstvo. Poseben problem predstavlja metan, ki lahko prehaja v vodonosnike in povzroča spremembe v kemijski sestavi vode ter predstavlja potencialno varnostno tveganje (IEA, 2020).

Dodatno tveganje predstavlja dejstvo, da takšni procesi pogosto potekajo počasi in neopazno. Onesnaženje podzemnih voda se lahko pokaže šele po daljšem časovnem obdobju, ko je sanacija že zelo zahtevna ali celo nemogoča. Zaradi tega je dolgoročno spremljanje zaprtih vrtin ključnega pomena za zgodnje zaznavanje morebitnih težav.

Pomurje je izrazito kmetijska regija, kjer so tla pomemben vir za pridelavo hrane. Slabe prakse zapiranja vrtin lahko vplivajo tudi na kakovost tal, predvsem zaradi morebitnega uhajanja ogljikovodikov ali slanice na površje ali v plitve plasti tal.

Onesnaženje tal z ogljikovodiki lahko povzroči zmanjšanje rodovitnosti, saj vpliva na mikrobiološko aktivnost v tleh in zmanjšuje sposobnost rastlin za absorpcijo hranil. Takšna tla lahko postanejo manj primerna za kmetijsko rabo ali celo neuporabna brez obsežnih sanacijskih ukrepov. Poleg tega lahko prisotnost naftnih derivatov vpliva na kakovost pridelkov, kar predstavlja tveganje za prehransko varnost.

Slanice predstavljajo pomembno okoljsko tveganje, saj povečujejo koncentracijo soli v tleh in s tem povzročajo proces zaslanjevanja. Posledično se zmanjšata sposobnost tal za zadrževanje vode in dostopnost hranil za rastline, kar negativno vpliva na rast vegetacije ter dolgoročno zmanjšuje produktivnost kmetijskih površin. Zaslanjevanje tal je praviloma dolgotrajen proces, njegove posledice pa je pogosto težko oziroma le delno mogoče sanirati.

V Pomurju je tveganje še posebej pomembno zaradi kombinacije plitvih vodonosnikov in intenzivne kmetijske rabe tal. Vsak vpliv na kakovost tal ali vode se lahko neposredno odrazi v zmanjšanju kmetijske produktivnosti in ekonomskih posledicah za lokalno prebivalstvo.

Povezava med tehničnimi praksami in okoljskimi vplivi

Vplivi na podzemne vode in tla so neposredno povezani s kakovostjo izvedbe zapiranja vrtin. Neustrezno cementiranje, poškodbe ohišja vrtnice ali pomanjkanje dolgoročnega nadzora povečujejo verjetnost za nastanek poti, po katerih lahko fluidi migrirajo v okolje. To potrjuje dejstvo, da so slabo zaprte vrtnice pogosto identificirane kot pomemben vir emisij metana in potencialnega onesnaženja (EPA, 2021).

Zato je mogoče zaključiti, da slabe prakse zapiranja vrtin ne predstavljajo le tehničnega problema, temveč tudi pomembno okoljsko in družbeno vprašanje. Njihovi vplivi se lahko kažejo na dolgi rok in prizadenejo ključne naravne vire, kot sta voda in tla, ki so temelj trajnostnega razvoja.

8. IZVEDBA IN ANALIZA VPRAŠALNIKA

V okviru raziskave je bilo izvedenih več intervjujev s strokovnjaki, ki so v različnih obdobjih delovali na področju raziskovanja, pridobivanja, vzdrževanja in sanacije naftno-plinskih vrtin v Sloveniji. Namen intervjujev je bil pridobiti vpogled v tehnične, okoljske in organizacijske vidike likvidacije vrtin ter ovrednotiti stanje in izzive na obravnavanem območju.

Skupno je bilo k sodelovanju povabljenih deset strokovnjakov, vendar se vsi niso odzvali na prošnjo za sodelovanje oziroma niso želeli odgovarjati na zastavljena vprašanja. Kljub temu so izvedeni intervjuji zagotovili pomembne informacije o tehničnem stanju vrtin, postopkih sanacije, zakonodajnih zahtevah ter prihodnjih izzivih na področju upravljanja opuščenih naftno-plinskih objektov.

Iz odgovorov intervjuvancev izhaja, da so glavni izzivi povezani s staranjem infrastrukture, pomanjkljivo dokumentacijo, visokimi stroški sanacije ter zmanjševanjem števila strokovnjakov in tehničnih zmogljivosti v Sloveniji. Intervjuvanci poudarjajo tudi pomen dolgoročnega spremljanja stanja zaprtih vrtin, varovanja podzemnih voda ter možnosti ponovne uporabe posameznih vrtin za geotermalne in druge energetske namene. Ugotovitve intervjujev predstavljajo pomembno dopolnitev teoretičnega dela naloge in omogočajo boljše razumevanje praktičnih izzivov pri likvidaciji naftno-plinskih vrtin na območju Lendave.

INTERVJU A:

Na podlagi izvedenega intervjuja je bilo ugotovljeno, da je večina rudarskih objektov na območju Petišovskega polja danes že saniranih in da je njihovo stanje zadovoljivo. Sanacija ni zajemala le vrtin, temveč tudi zbirne podpostaje, podzemne cevovode ter drugo spremljajočo infrastrukturo. Po izvedenih delih so bile površine večinoma vrnjene v prvotno stanje, pri čemer po navedbah intervjuvanca niso zaznane večje nepravilnosti, kot so netesnosti ali uhajanje plina.

Kot največji izzivi pri izvajanju likvidacije vrtin so bili izpostavljeni tehnična zahtevnost postopkov, slabo stanje posameznih vrtin ter pomanjkljiva tehnična dokumentacija. Poseben poudarek je bil namenjen tudi varnostnemu vidiku, predvsem pri vrtinah, ki so bile ponovno testirane ali obravnavane za morebitno geotermalno uporabo.

Iz intervjuja izhaja, da na območju Petišovskega polja še vedno obstajajo pomembne zaloge zemeljskega plina in nafte, vendar gre za geološko zahtevna nahajališča, pri katerih bi bilo za učinkovito izkoriščanje treba uporabiti hidravlično lomljenje kamnin (fracking). Intervjuvanec ocenjuje, da bi bilo komercialno izkoriščanje možno predvsem ob visokih cenah energentov, ustrezni zakonodajni podpori in dovoljenju za uporabo teh postopkov, ki pa v Sloveniji trenutno niso dovoljeni zaradi okoljskih in družbenih pomislekov.

Pri stroških likvidacije vrtin je intervjuvanec izpostavil predvsem vpliv globine vrtine, stanja zaščitnih cevi, cementacije, geoloških razmer in okoljskih zahtev. Ocenjeni stroški likvidacije 1500 m globoke vrtine znašajo približno od 200.000 do 400.000 EUR.

Intervjuvanec je poudaril tudi pomemben vpliv naftno-plinske dejavnosti na razvoj Lendave in širše regije, saj je podjetje Nafta Lendava predstavljalo pomemben gospodarski subjekt in zagotavljalo številna delovna mesta. Glede vplivov na zdravje zaposlenih in prebivalcev večjih neposrednih vplivov ni izpostavil, omenil pa je posamezne nesreče pri delu in erupcije vrtin v začetnih obdobjih raziskovanja zaradi slabše opreme in manj izkušenj.

INTERVJU B:

Intervjuvanec meni, da problematika opuščениh naftno-plinskih vrtin v Sloveniji ni povezana le s tehničnimi izzivi, temveč predvsem s pomanjkanjem dolgoročne strategije, finančnih sredstev in politične podpore za dokončno izvedbo sanacijskih ukrepov. Po njegovem mnenju je Slovenija s sprejemom Zakona o rudarstvu leta 1999 med prvimi državami v regiji sistemsko pristopila k reševanju tega vprašanja, vendar program zaradi omejenega financiranja in kasnejših sprememb v industriji ni bil nikoli v celoti zaključen.

Poudarja, da tehnično stanje številnih vrtin otežujejo korozijske poškodbe, degradirana cementacija, možnost uhajanja plinov ter pomanjkljiva dokumentacija. Zato je treba vsako vrtino obravnavati individualno, saj se tveganja in zahtevnost sanacije med posameznimi objekti razlikujejo. Kljub temu ocenjuje, da opuščene vrtine v preteklosti niso povzročale večjih okoljskih obremenitev, vendar dolgoročno neurejeno stanje ni sprejemljivo z vidika varstva okolja in odgovornega upravljanja prostora.

Po njegovem mnenju vseh vrtin ni smiselno obravnavati zgolj kot objekte za likvidacijo, saj bi bilo nekatere mogoče uporabiti za geotermalne ali druge energetske namene. Hkrati opozarja na postopno izginjanje domače naftno-plinske stroke zaradi zmanjševanja dejavnosti, zastarele opreme in upokojevanja strokovnjakov. Zato meni, da bo pri zahtevnejših sanacijskih posegih v prihodnje verjetno potrebno sodelovanje s tujimi izvajalci, pri čemer je ključnega pomena ohranitev domačega strokovnega znanja za izvajanje neodvisnega strokovnega nadzora.

Intervjuvanec zaključuje, da največja vrednost nekdanje naftno-plinske dejavnosti v Sloveniji ni bila v količini pridobljenih ogljikovodikov, temveč v razvoju strokovnega znanja, infrastrukture in usposobljenih kadrov. Prav zato bi bilo treba pri prihodnjem upravljanju opuščениh vrtin upoštevati tako okoljske zahteve kot tudi njihov potencial za nadaljnjo uporabo.

INTERVJU C:

Intervjuvanec opozarja, da se pri obravnavi opuščениh naftno-plinskih vrtin pogosto preveč poudarja zgolj njihova likvidacija, premalo pa njihova morebitna prihodnja uporabnost. Po njegovem mnenju vseh vrtin ni smiselno obravnavati kot objekte, namenjene izključno trajnemu zapiranju, saj bi lahko nekatere predstavljale osnovo za razvoj geotermalnih projektov, monitoring podzemnega prostora ali druge energetske dejavnosti.

Posebej poudarja, da je bila domača proizvodnja nafte in zemeljskega plina po količinah sicer majhna, vendar je imela pomembno vlogo pri razvoju tehničnega znanja, raziskovalne dejavnosti in strokovnih kadrov. Največjo izgubo zato vidi v postopnem izginjanju domače predvsem plinske stroke, saj se skupaj z zmanjševanjem dejavnosti izgubljajo tudi praktične izkušnje, specializirana oprema in poznavanje lokalnih geoloških razmer.

Po mnenju anketirane osebe, so energetske razmere v Evropi v zadnjih letih ponovno odpirajo vprašanje strateškega pomena domačih energetske virov. Čeprav zaloge v Petišovskem polju same po sebi ne morejo bistveno vplivati na energetske bilanco države, lahko predstavljajo pomemben vir znanja, raziskovalnega potenciala in energetske rezerve za prihodnost. Zato meni, da bi bilo smiselno ohraniti najbolj perspektivne vrtine, digitalizirati obstoječo dokumentacijo ter zagotoviti pogoje za nadaljnje geološke in energetske raziskave.

Intervjuvanec zaključuje, da bi bilo treba vprašanje opuščениh vrtin obravnavati širše od same sanacije. Poleg okoljskih in tehničnih vidikov je treba upoštevati tudi dolgoročno energetske strategijo države, ohranjanje strokovnega znanja ter možnosti ponovne uporabe obstoječe infrastrukture za nove energetske namene.

ANALIZA:

Izvedeni intervjuji potrjujejo, da problematika likvidacije naftno-plinskih vrtin na območju Petišovskega polja predstavlja bistveno širši izziv od same tehnične izvedbe zapiralnih del. Čeprav sogovorniki izhajajo iz različnih strokovnih izkušenj in obdobj delovanja v naftno-plinski dejavnosti, se njihova mnenja v ključnih ugotovitvah večinoma ujemajo.

Kot eno najpomembnejših vprašanj intervjuvanci izpostavljajo tehnično stanje starejših vrtin. Zaradi starosti objektov, različnih načinov gradnje ter več desetletij trajajoče eksploatacije se pojavljajo težave, povezane s korozijo zaščitnih kolon, stanjem cementacije in pomanjkljivo dokumentacijo. Takšne okoliščine povečujejo zahtevnost načrtovanja sanacijskih posegov in otežujejo oceno dejanskega stanja posameznih vrtin. Sogovorniki poudarjajo, da je zato pri načrtovanju likvidacije nujen individualen pristop k vsaki vrtini.

Pomembna ugotovitev intervjujev je tudi, da je bil sprejem Zakona o rudarstvu leta 1999 prepoznan kot pomemben korak k sistemskemu reševanju problematike opuščenih vrtin. Kljub temu se sogovorniki strinjajo, da načrtovani program sanacije ni bil v celoti realiziran. Razloge pripisujejo predvsem omejenim finančnim sredstvom, organizacijskim spremembam v naftno-plinski dejavnosti ter kasnejšim razmislekom o možni ponovni uporabi posameznih vrtin.

V več intervjujih se pojavlja tudi vprašanje prihodnje rabe obstoječe infrastrukture. Del sogovornikov meni, da vseh vrtin ni smiselno obravnavati izključno kot objekte za trajno likvidacijo, saj bi lahko nekatere predstavljale potencial za geotermalno izrabo ali druge energetske projekte. Pri tem poudarjajo potrebo po strokovni presoji tehnične ustreznosti in ekonomske upravičenosti takšnih rešitev.

Intervjuji hkrati opozarjajo na postopno zmanjševanje domačega strokovnega znanja na področju naftno-plinske dejavnosti. Zaradi zmanjševanja obsega dejavnosti, staranja opreme in upokojevanja strokovnjakov obstaja nevarnost izgube pomembnih tehničnih kompetenc, ki so potrebne za izvajanje zahtevnih sanacijskih postopkov. Več sogovornikov zato poudarja pomen ohranjanja strokovnega znanja, tehnične dokumentacije in institucionalnih zmogljivosti za izvajanje neodvisnega strokovnega nadzora.

Na podlagi izvedenih intervjujev je mogoče ugotoviti, da vprašanje likvidacije naftno-plinskih vrtin ni zgolj tehničen problem, temveč vključuje tudi okoljske, gospodarske in razvojne razsežnosti. Ugotovitve intervjuvancev potrjujejo pomen celostnega pristopa, ki poleg zagotavljanja okoljske varnosti upošteva tudi dolgoročno upravljanje prostora, ohranjanje strokovnega znanja ter možnosti nadaljnje uporabe obstoječe infrastrukture.

9. SKLEP

Rezultati dela potrjujejo, da na učinkovitost postopkov likvidacije bistveno vplivajo tako geološki pogoji kot tudi tehnična izvedba vrtin v preteklosti. Težave, ki nastanejo med vrtanjem in obratovanjem, kot so nestabilnost vrtinske stene, izgube vrtalne tekočine, nenadzorovani dotoki fluidov ter korozijski procesi, pogosto niso ustrezno odpravljene in se lahko odražajo kot dolgoročne pomanjkljivosti integritete vrtine. To pomeni, da je uspešnost likvidacije v veliki meri odvisna od kakovosti celotnega življenjskega cikla vrtine, ne le od zaključnih postopkov zapiranja.

Čeprav sodobni tehnični postopki, kot sta cementiranje in uporaba večbariernih sistemov, omogočajo visoko stopnjo varnosti. Analiza kaže, da njihova učinkovitost v praksi ni vedno zagotovljena. Degradacija materialov, nepopolno cementiranje ter omejena možnost preverjanja stanja v globokih intervalih predstavljajo pomembne omejitve, ki lahko vodijo do ponovne vzpostavitve migracijskih poti za fluide. Takšna tveganja so še posebej problematična na območjih, kot je Pomurje, kjer so podzemne vode ključni naravni vir in kjer je prostor intenzivno kmetijsko izkoriščen.

Posebno kritičen vidik predstavlja razkorak med zakonodajnim okvirom in njegovo implementacijo v praksi. Čeprav je zakonodaja v Sloveniji formalno usklajena z evropskimi smernicami in industrijskimi standardi, se v praksi pojavljajo pomanjkljivosti na področju nadzora, standardizacije in predvsem dolgoročnega spremljanja zaprtih vrtin. Odsotnost sistematičnega monitoringa pomeni, da morebitne napake pogosto ostanejo neopažene do trenutka, ko že povzročijo okoljsko škodo, kar zmanjšuje učinkovitost preventivnega pristopa.

Primerjalna analiza s tujimi praksami je pokazala, da so v državah z razvitejšo naftno industrijo postopki zapiranja vrtin podprti z naprednejšimi tehnologijami, digitalnim nadzorom ter jasno opredeljenimi odgovornostmi upravljavcev tudi po zaprtju vrtine. To potrjuje, da dolgoročna varnost ni odvisna zgolj od tehnične izvedbe, temveč od celotnega sistema upravljanja, ki vključuje zakonodajo, nadzor in spremljanje.

Na podlagi ugotovitev je mogoče zaključiti, da trenutno stanje na področju likvidacije vrtin v Sloveniji sicer omogoča tehnično ustrezno izvedbo zapiranja, vendar ne zagotavlja vedno optimalne dolgoročne varnosti. Ključni izzivi ostajajo na področju zagotavljanja trajne integritete vrtin, izboljšanja nadzora ter uvedbe sistematičnega spremljanja stanja po zaprtju. Dodatno tveganje predstavlja postopno zmanjševanje obsega domače naftno-plinske dejavnosti, zaradi česar se zmanjšujeta tudi razpoložljivost specializirane opreme in število strokovnjakov z izkušnjami na področju vrtanja, vzdrževanja in likvidacije vrtin. Zaradi staranja obstoječe infrastrukture in kadrov je mogoče pričakovati, da bo pri izvedbi zahtevnejših sanacijskih in likvidacijskih posegov v prihodnje potrebno sodelovanje tujih specializiranih podjetij. Ob tem bo za zagotavljanje varnosti in kakovosti izvedenih del ključnega pomena ohranjanje ter razvoj domačega strokovnega znanja in institucionalnih zmogljivosti, ki bodo omogočale neodvisen strokovni nadzor nad načrtovanjem, izvedbo in spremljanjem postopkov likvidacije vrtin.

V prihodnje bi bilo smiselno razmisliti o uvedbi obveznega dolgoročnega monitoringa zaprtih vrtin, večji uporabi naprednih materialov in tehnologij ter jasnejši opredelitvi odgovornosti upravljavcev tudi po zaključku del. Poleg tega bi bilo treba okrepiti povezavo med zakonodajo in industrijsko prakso ter zagotoviti dosledno izvajanje predpisov.

Zaključno je mogoče poudariti, da likvidacija vrtin ne predstavlja zgolj tehničnega postopka, temveč dolgoročno okoljsko odgovornost, katere posledice lahko trajajo desetletja ali celo stoletja. Prav zato mora biti pristop k zapiranju vrtin usmerjen v preprečevanje tveganj, ne le v njihovo odpravljanje.

Magistrsko delo tako potrjuje, da je trajnostno upravljanje podzemnega prostora možno le ob dosledni integraciji znanja, tehnologije in nadzora, pri čemer predstavlja prav faza zapiranja vrtin ključno točko, kjer se odloča o dolgoročnem vplivu človekovih posegov v geološko okolje.

HIPOTEZA 1: Stanje infrastrukture in tehničnih elementov vrtin (cevi, cementacija, nadzemna oprema) neposredno vpliva na zahtevnost in trajanje postopkov likvidacije ter sanacije.

Na podlagi izvedene analize tehničnih značilnosti vrtin, postopkov sanacije ter pregledane strokovne dokumentacije je bilo ugotovljeno, da stanje tehnične infrastrukture vrtin pomembno vpliva na zahtevnost izvedbe likvidacijskih postopkov. Pri obravnavanih vrtinah na območju Lendave so bile zaznane različne stopnje degradacije ohišja vrtin, cementnih barier in nadzemne opreme, kar je neposredno vplivalo na izbiro postopkov sanacije in trajanje izvedenih del.

Analiza je pokazala, da so pri starejših vrtinah pogoste predvsem težave, povezane s korozijskimi vplivi, degradacijo cementacije ter mehanskimi poškodbami zaščitnih kolon. Takšne poškodbe zmanjšujejo integriteto vrtine in povečujejo možnost migracije plinov ali tekočin med geološkimi plastmi. Zaradi tega je pri likvidaciji treba izvajati dodatne tehnične ukrepe, kot so večstopenjsko cementiranje, uporaba mehanskih zapornih elementov ter dodatni tlačni preizkusi za preverjanje tesnosti vrtine.

V poglavju, ki obravnava korozijske vplive, je bilo ugotovljeno, da lahko dolgoročna degradacija materialov povzroči zmanjšanje mehanske stabilnosti ohišja in nastanek poti za migracijo fluidov. Prav tako je analiza zaščite vodonosnikov pokazala, da neustrezna cementacija predstavlja pomembno tveganje za podzemne vode. Pri vrtinah s slabšo integriteto so zato postopki likvidacije bistveno zahtevnejši, saj zahtevajo dodatno sanacijo poškodovanih intervalov in podrobnejši nadzor med izvedbo del.

Na podlagi rezultatov raziskave je mogoče ugotoviti, da stanje infrastrukture in tehničnih elementov vrtin neposredno vpliva na tehnično zahtevnost, trajanje in kompleksnost postopkov likvidacije ter sanacije. S tem je hipoteza 1 potrjena.

HIPOTEZA 2: Postopki likvidacije naftno-plinskih vrtin so se v obdobju od leta 1999 do danes bistveno spremenili z vidika uporabljenih tehničnih rešitev in delovnih postopkov.

Primerjalna analiza starejših in sodobnih postopkov likvidacije vrtin je pokazala pomemben tehnološki in organizacijski razvoj na področju zapiranja naftno-plinskih vrtin. V obdobju med letoma 1999 in 2005 so bili postopki likvidacije usmerjeni predvsem v osnovno izolacijo produktivnih plasti in preprečevanje neposrednega uhajanja fluidov proti površju. Takratni postopki so sicer vključevali cementiranje in mehansko zapiranje vrtin, vendar so bili manj standardizirani in pogosto prilagojeni posameznim terenskim razmeram.

Analiza je pokazala, da sodobni postopki vključujejo bistveno večji poudarek na dolgoročni integriteti vrtin, uporabi več zapornih barier ter izvajanju nadzora po zaključku sanacije. Uveljavile so se naprednejše metode cementiranja, kakovostnejši cementni materiali, izboljšani sistemi preverjanja tesnosti vrtin ter uporaba mehanskih čepov za dodatno stabilizacijo zapornih sistemov. Poleg tega sodobni pristopi vključujejo tudi monitoring po zaprtju vrtin, kar v starejših postopkih ni bilo običajna praksa.

Pomembne spremembe so vidne tudi na področju zakonodaje in industrijskih standardov. Sodobni postopki likvidacije danes potekajo v skladu z zahtevami ZRud-1, ZVO-2 ter mednarodnimi standardi API in ISO. Večji poudarek je namenjen preprečevanju okoljskih tveganj, zaščiti podzemnih voda in zagotavljanju dolgoročne stabilnosti vrtin.

Na podlagi primerjalne analize je mogoče ugotoviti, da so se postopki likvidacije vrtin po letu 1999 bistveno razvili tako z vidika tehničnih rešitev kot tudi organizacije del, zakonodajnih zahtev in okoljskih standardov. S tem je hipoteza 2 potrjena.

HIPOTEZA 3: Z uporabo sodobnih metod in tehnologij likvidacije vrtin bi bilo mogoče zmanjšati okoljska tveganja ter izboljšati dolgoročno varnost in trajnost zaprtih vrtin v primerjavi z nekaterimi obstoječimi postopki.

Rezultati raziskave kažejo, da sodobne metode likvidacije vrtin pomembno prispevajo k zmanjševanju okoljskih tveganj in izboljšanju dolgoročne stabilnosti zaprtih vrtin. V okviru analize tveganj za okolje in podzemne vode je bilo ugotovljeno, da neustrezno zaprte vrtine predstavljajo potencialno nevarnost za migracijo plinov, slanic in drugih fluidov med geološkimi plastmi. Posebej pomembna tveganja predstavljajo degradacija cementnih barier, korozija ohišja ter nastanek mikrokanalov, ki lahko povzročijo kontaminacijo vodonosnikov.

Sodobni postopki likvidacije vključujejo uporabo več neodvisnih zapornih barier, izboljšane cementne sisteme, mehanske zapore ter napredne metode preverjanja tesnosti vrtin. Takšen pristop bistveno zmanjšuje možnost uhajanja fluidov in izboljšuje hidravlično izolacijo posameznih geoloških plasti. Pomemben napredek predstavlja tudi uvedba dolgoročnega monitoringa, ki omogoča spremljanje stanja vrtin tudi po zaključku sanacije.

Analiza primerov iz območja Lendave je pokazala, da so starejše vrtine zaradi uporabe starejših materialov in tehnoloških rešitev pogosto bolj izpostavljene koroziji ter izgubi integritete. Pri sodobnih postopkih pa se uporabljajo kakovostnejši materiali, strožji nadzor izvedbe del ter podrobnejše testiranje zapornih sistemov, kar pomembno povečuje dolgoročno varnost zaprtih vrtin.

Na podlagi rezultatov raziskave je mogoče ugotoviti, da sodobne metode in tehnologije likvidacije pomembno zmanjšujejo okoljska tveganja ter izboljšujejo dolgoročno stabilnost, varnost in trajnost zaprtih vrtin. S tem je hipoteza 3 delno potrjena.

10. POVZETEK

Magistrsko delo obravnava problematiko likvidacije naftno-plinskih vrtin na pridobivalno-raziskovalnem območju Lendave, ki je del sistema Panonskega bazena in predstavlja edino pomembnejše območje pridobivanja ogljikovodikov v Sloveniji. Dolgotrajno raziskovanje in izkoriščanje nafte ter zemeljskega plina na tem območju sta povzročila nastanek velikega števila raziskovalnih in proizvodnih vrtin, ki po zaključku njihove obratovalne dobe predstavljajo pomemben tehnični, okoljski in prostorski izziv.

Glavni namen dela je celovita analiza, načrtovanje in vrednotenje postopkov trajne likvidacije vrtin z vidika tehnične izvedljivosti, zagotavljanja integritete vrtin in varstva okolja. Raziskava temelji na sistematični analizi razpoložljive geološke, geomehanske in tehnične dokumentacije ter pregledu zakonodajnega in regulativnega okvira. Poseben poudarek je namenjen oceni integritete vrtin, vključno z vrednotenjem stanja zaščitnih kolon, kakovosti cementnega plašča in potencialnih poti migracije fluidov.

V delu je podrobno analizirana geološka zgradba območja Lendave, kjer miocenski sedimenti predstavljajo ključne rezervoarske in tesnilne plasti. Obravnavan je razvoj vrtin in njihova tehnična zasnova, pri čemer so izpostavljene najpogostejše težave, povezane z vrtanjem, kot so nestabilnost vrtinske stene, izgube vrtalne tekočine, nenadzorovani dotoki formacijskih fluidov (kick) in izbruhi (blowout), korozijski vplivi ter neustrezna zaščita vodonosnikov. Ti pojavi neposredno vplivajo na dolgoročno integriteto vrtin in posledično na zahtevnost postopkov njihove likvidacije.

Tehnični del se osredotoča na analizo postopkov likvidacije vrtin, s posebnim poudarkom na cementiranju, vgradnji mehanskih zapornih elementov in uporabi večbarierne izolacijskega sistema. Takšen pristop zagotavlja trajno hidravlično izolacijo geoloških plasti ter preprečuje migracijo ogljikovodikov, slanice in drugih fluidov. Obravnavani so tudi odstranjevanje opreme, zapiranje ustja vrtine in rekultivacija površin kot zaključne faze postopka likvidacije.

Pomemben del raziskave predstavlja analiza zakonodajnega in regulativnega okvira, vključno s slovensko zakonodajo (ZRud-1, ZVO-2), evropskimi usmeritvami ter industrijskimi standardi API in ISO. Raziskava kaže, da se je pristop k likvidaciji vrtin v zadnjih desetletjih bistveno razvil, predvsem zaradi večje standardizacije, strožjega nadzora in večjega poudarka na dolgoročni okoljski varnosti.

Delo vključuje tudi primerjalno analizo tujih praks, zlasti v državah Panonskega bazena (Madžarska, Hrvaška in Avstrija), ki imajo podobne geološke razmere. Rezultati kažejo, da so osnovna tehnična načela primerljiva, vendar se v tujini pogosteje uporabljajo naprednejše tehnologije likvidacije, digitalni nadzor in sistematično dolgoročno upravljanje zaprtih vrtin. Na podlagi primerjave je bilo opredeljenih več dobrih praks, ki bi jih bilo mogoče prenesti tudi v slovenski prostor.

Rezultati raziskave potrjujejo, da stanje vrtin in kakovost izvedenih tehničnih postopkov pomembno vplivata na dolgoročno stabilnost zaprtih vrtin. Neustrezno izvedena likvidacija lahko povzroči migracijo fluidov, onesnaženje podzemnih voda in degradacijo tal, kar ima lahko dolgoročne okoljske in družbene posledice. Poseben poudarek je namenjen zaščiti vodonosnikov v Pomurju, kjer podzemna voda predstavlja pomemben naravni vir.

Delo ugotavlja, da je trajna likvidacija vrtin kompleksen proces, ki zahteva celovit pristop, ki združuje geološko znanje, tehnično izvedbo, zakonodajni nadzor in dolgoročno spremljanje stanja vrtin. Uporaba sodobnih tehnologij in dobrih praks lahko bistveno zmanjša okoljska tveganja ter prispeva k trajnostnemu upravljanju podzemnega prostora.

11. SUMMARY

This master's thesis addresses the issue of oil and gas well abandonment in the Lendava production and exploration area, which is part of the Pannonian Basin system and represents the only significant hydrocarbon production area in Slovenia. Long-term exploration and exploitation of oil and natural gas in this region have resulted in a large number of exploration and production wells, which, after the end of their operational life, represent an important technical, environmental, and spatial challenge.

The main objective of the thesis is a comprehensive analysis, planning, and evaluation of permanent well abandonment procedures from the perspective of technical feasibility, well integrity assurance, and environmental protection. The research is based on a systematic analysis of available geological, geomechanical, and technical documentation, as well as a review of the legislative and regulatory framework. Particular emphasis is placed on well integrity assessment, including the evaluation of casing condition, cement sheath quality, and potential pathways for fluid migration.

The thesis provides a detailed analysis of the geological characteristics of the Lendava area, where Miocene sediments represent key reservoir and sealing formations. The development of wells and their technical design are examined, highlighting the most common drilling-related issues, such as wellbore instability, loss of drilling fluid, uncontrolled inflow of formation fluids (kick) and blowout, corrosion effects, and inadequate protection of aquifers. These phenomena have a direct impact on long-term well integrity and consequently on the complexity of abandonment procedures.

The technical part of the thesis focuses on the analysis of well abandonment procedures, with particular emphasis on cementing, installation of mechanical barriers, and the implementation of a multi-barrier isolation system. This approach ensures permanent hydraulic isolation of geological formations and prevents the migration of hydrocarbons, formation water, and other fluids. The removal of equipment, wellhead abandonment, and surface reclamation are also addressed as final stages of the abandonment process.

An important part of the research is the analysis of the legislative and regulatory framework, including Slovenian legislation (ZRud-1, ZVO-2), European guidelines, and industry standards (API, ISO). The study shows that the approach to well abandonment has significantly evolved in recent decades, particularly in terms of increased standardization, stricter supervision, and a stronger emphasis on long-term environmental safety.

The thesis also includes a comparative analysis of foreign practices, especially in countries of the Pannonian Basin (Hungary, Croatia, Austria), which share similar geological conditions. The results indicate that basic technical principles are comparable; however, more advanced abandonment technologies, digital monitoring, and systematic long-term management are more commonly applied abroad. Based on this comparison, several good practices have been identified that could be implemented in the Slovenian context.

The results confirm that the condition of wells and the quality of applied technical procedures significantly influence the long-term stability of abandoned wells. Improperly executed abandonment may lead to fluid migration, groundwater contamination, and soil degradation, which can have long-term environmental and societal consequences. Particular emphasis is placed on the protection of aquifers in the Pomurje region, where groundwater represents a key natural resource.

The thesis concludes that permanent well abandonment is a complex process requiring an integrated approach that combines geological knowledge, technical execution, regulatory

Zmrzlikar Š., Likvidacija naftno-plinskih vrtin na širšem območju Lendave med leti 1999 in 2008, FVO, Velenje, 2026

oversight, and long-term monitoring. The application of modern technologies and good practices can significantly reduce environmental risks and ensure sustainable subsurface management.

12. VIRI IN LITERATURA

- Ahmed, T. (2019). *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed.). Gulf Professional Publishing.
- American Petroleum Institute (API). (2013). *API Recommended Practice 65-2: Isolating Potential Flow Zones During Well Construction* (2nd ed.). Washington, D.C.: API Publishing.
- American Petroleum Institute (API). (2018). *API Recommended Practice 1004: Well Abandonment and Inactive Well Practices*. Washington, D.C.: API Publishing.
- Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., Young, F. S. (1991). *Applied Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- Davies, R. J., Almond, S., Ward, R. S., Jackson, R. B., Adams, C., Worrall, F., Herringshaw, L. G., Gluyas, J. G. Whitehead, M. A. (2014). Oil and gas wells and their integrity: Implications for shale and unconventional resource exploitation. *Marine and Petroleum Geology*, 56, 239–254.
- Državni zbor Republike Slovenije. (2002). *Zakon o vodah (ZV-1)*. Uradni list RS.
- Državni zbor Republike Slovenije. (2010). *Zakon o rudarstvu (ZRud-1)*. Uradni list RS.
- Državni zbor Republike Slovenije. (2022). *Zakon o varstvu okolja (ZVO-2)*. Uradni list RS.
- European Commission. (2019). *Environmental Implementation Review*. Brussels: European Commission.
- Gluyas, J., Swarbrick, R. (2013). *Petroleum Geoscience*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Hyne, N. J. (2012). *The Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling, and Production* (3rd ed.). Tulsa: PennWell Corporation.
- International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). (2015). *Guidelines for the Abandonment of Wells* (Report No. 434). London: IOGP.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *Methane Emissions from Oil and Gas*. Paris: IEA.
- International Organization for Standardization (ISO). (2017). *ISO 16530-1: Well Integrity – Part 1: Life Cycle Governance*. Geneva: ISO.
- Kerčmar, J. (2018). Natural gas reservoirs on the oil-gas field Petišovci. *Geologija*, 61(2), 163–176.
- Markič, M., Turk, V., Kruk, B. Šolar, S. V. (2011). Coal in the Mura Formation (Pontian) between Lendava and Mursko Središče and in the wider area of northeastern Slovenia. *Geologija*, 54(1), 97–120.
- Markič, M., Lapanje, A., Rajver, D., & Sachsenhofer, R. (2025). Fossil fuels and potential for CO₂ storage in the Slovenian part of the Pannonian Superbasin. In *Geological Society, London, Special Publications*.
- Ministrstvo za naravne vire in prostor. (2023). *Rudarska pravica in upravljanje mineralnih surovin v Sloveniji*. Ljubljana: MNVP.
- Mitchell, R. F., Miska, S. Z. (2011). *Fundamentals of Drilling Engineering*. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- Nafta Geoterm d.o.o. (2007). *Program ekološke sanacije vrtnice XY*. Interni projektni dokument, Lendava.

Zmrzlikar Š., Likvidacija naftno-plinskih vrtin na širšem območju Lendave med leti 1999 in 2008, FVO, Velenje, 2026

Nafta Geoterm d.o.o. (2007). Predvideno stanje v vrtini in na ustju vrtine po izvedbi sanacijskih del. Tehnična projektna dokumentacija, Lendava.

Nafta Geoterm d.o.o. (2007). Tehnična dokumentacija vrtine XY. Interna dokumentacija družbe Nafta Geoterm d.o.o., Lendava.

NORSOK. (2013). NORSOK Standard D-010: Well Integrity in Drilling and Well Operations. Lysaker: Standards Norway.

North Sea Transition Authority. (2021). Well Decommissioning Guidelines. Aberdeen: NSTA.

Norwegian Petroleum Directorate. (2020). Guidelines for Plugging and Abandonment of Wells. Stavanger: NPD.

Pleničar, M., Ogorelec, B., Novak, M. (2009). Geologija Slovenije. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.

Society of Petroleum Engineers (SPE). (2018). Well Integrity and Abandonment Best Practices. Richardson, TX: SPE.

Speight, J. G. (2019). Introduction to Petroleum Engineering (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.

Statistični urad Republike Slovenije. (2023). Raba tal in kmetijska struktura v Sloveniji. Ljubljana: SURS.

Šram, D., Rman, N., Rižnar, I., Lapanje, A. (2015). Three-dimensional geological model of the Mura–Zala Basin in northeastern Slovenia. Geologija.

Ujma. (1999). Nesanirani naftno-rudarski objekti v severovzhodni Sloveniji. Ujma, 13, 246–251.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks. Washington, D.C.: EPA.

PRILOGA - INTERVJU

Spoštovani,

sem Špela Zmrzlikar in delam magistrsko delo z naslovom »Likvidacija naftno-plinskih vrtin na širšem območju Lendave med leti 1999 in 2008« na Fakulteti za varstvo okolja v Velenju. Na vas se obračam za pomoč pri oblikovanju odgovorov na vprašanja, ki vam jih pošiljam v nadaljevanju. Vprašanja sem naslovila na 10 oseb, ki so mi jih svetovali, mentorja doc. dr. Franc Žerdin in prof. dr. Miran Veselič ter Jožef Hozjan, nekdanji direktor gospodarske družbe Nafta Lendava. Prosim vas, če mi lahko pri posameznih odgovorih zapišete svoje mnenje.

Lepo se zahvaljujem za vašo pomoč in vas prav lepo pozdravljam,

Špela Zmrzlikar

Vprašanja:

1. Kakšno je stanje likvidiranih vrtin na nafto/zemeljski plin, se pojavljajo kakšne posebnosti?
2. Kateri so bili največji izzivi pri izvajanju likvidacije vrtin?
3. Ali so v Petišovskem polju zaloge nafte/zemeljskega plina komercialno zanimive za izkoriščanje? Pod kakšnimi pogoji bi jih bilo možno izkoriščati?
4. Kaj je fracking, kako se izvaja in zakaj ga v Sloveniji ni dovoljeno uporabljati?
5. Od česa so v največji meri odvisni stroški likvidacije naftnih/plinskih vrtin? Kakšni so okvirni stroški likvidacije ca. 1500 m dolge vrtine?
6. Ali bi po vašem mnenju, zaradi energetske krize, ki se lahko še zaostri in traja daljše časovno obdobje, bilo smiselno pridobivanje nafte/plina v Petišovskem polju ponovno vzpostaviti?
7. Zakaj likvidacija naftnih/plinskih vrtin v Petišovskem polju poteka tako počasi? So razlogi v pomanjkanju finančnih sredstev, pri izvajalcih ...?
8. Bi likvidacija vrtin potekala hitreje, če bi država v ta namen sprejela ustrezní zakon?
9. Kako je naftno/plinska dejavnost v preteklosti vplivala na razvoj in kakovost življenja v regiji?
10. Zakaj lokalna skupnost po prenehanju pridobivanja nafte/plina od države ni zahtevala zakona o prestrukturiranju regije? (Podobno, kot se je to zaradi prenehanja odkopavanja premoga zgodilo v šaleško-savinjski regiji).
11. Ali je pridobivanje nafte/plina imelo škodljiv vpliv na zdravje zaposlenih v podjetju Nafta Lendava ter na prebivalstvo v okolici naftnih/plinskih vrtin? Ali so v ta namen bile opravljene posebne raziskave?