



Nahajališča zemeljskega plina na naftno-plinskem polju Petišovci

Natural gas reservoirs on the oil-gas field Petišovci

Jernej KERČMAR

Petrol Geo, proizvodnja ogljikovodikov d.o.o., Mlinska ulica 5D, SI-9220 Lendava, Slovenija;
e-mail: jernej.kercmar@petrol.si

Prejeto / Received 11. 7. 2018; Sprejeto / Accepted 22. 10. 2018; Objavljeno na spletu / Published online 20. 12. 2018

Ključne besede: ogljikovodiki, naftno-plinsko polje Petišovci, razvoj nahajališča

Key words: hydrocarbons, oil-gas field Petišovci, reservoir development

Izvešček

Za nastanek nahajališč z ogljikovodiki so potrebni trije pogoji in sicer; matična kamnina, v kateri ogljikovodiki nastanejo (podlaga ali talnina), kolektorska porozna kamnina, v katero se ogljikovodiki ujamejo in zgornja neprepustna kamnina (krovnina). Poleg geološke strukture so potrebni še primerna temperatura, tlak in čas, da organska snov pri redukcijskih pogojih preide faze diageneze in generira ogljikovodike, kot jih poznamo danes. Vsako nahajališče ogljikovodikov, ki se odkrije in ima ekonomsko pomembne zaloge za proizvodnjo, gre skozi pet stopenj razvoja polja. Najprej se izvedejo geološke, geofizikalne, petrofizikalne, rezervoarske raziskave, katerih rezultati se nato razložijo in ovrednotijo z 2-D in predvsem s sodobnimi 3-D geološkimi modeli. Sledi razvoj celotnega polja, v okviru katerega se ovrednotijo geološke in bilančne zaloge vseh nahajališč. Sledi faza proizvodnje in na koncu faza sanacije polja. V Sloveniji smo največ zemeljskega plina proizvedli iz nahajališč »Petišovci globoko« in sicer od leta 1963 do leta 2017 skupaj več kot 341 milijonov Sm³. V zadnjih letih se polje dodatno razvija z obdelavo perspektivnih nahajališč zemeljskega plina v tako imenovani seriji 'K' (»Petišovci globoko«). Od leta 2017 poteka proizvodnja plina iz vrtin Pg-10 in Pg-11A.

Abstract

Three conditions are required for the existence of hydrocarbon reservoirs: source rock (usually basement or footwall), collector (porous rock in which the hydrocarbons are caught), and upper impermeable rock (hanging wall). In addition to a geological structure, temperature, pressure and time are needed for the organic matter to pass through the diagenesis phase into hydrocarbons, as we know them today. Every hydrocarbon deposit found and having economical reserves for production passes five stages of the life cycle of the reservoir. First, geological, geophysical, petrophysical and reservoir exploration is carried out, and then results of these explorations are evaluated by 2D and 3D geological models. Next stage is evaluation of entire field potential (in-place) and proved reserves of all hydrocarbons-bearing reservoir strata (reservoirs). Afterwards, the most important stage is production and the end phase with the remediation of the field. In Slovenia, most of the natural gas was produced from the "Petišovci globoko" reservoirs in the years between 1963 and 2017, totaling to more than 341 million Sm³. In recent years, the field has been further developed by processing prospective natural gas reservoirs in so-called 'K' series ("Petišovci globoko"). Since 2017, the production of gas from two new wells, Pg-10 and Pg-11A, takes place.

Uvod

Eden izmed kriterijev stabilnega gospodarstva vsake države je čim manjša energetska odvisnost. Kljub temu, da se svet vse bolj usmerja v iskanje in razvoj alternativnih in obnovljivih virov energije, je trenutno še vedno najcenejša in najčistejša fosilna energija zemeljski plin. V preskrbi s primarno energijo razvitih dežel zavzema zemeljski plin okoli 25 odstotni delež (za nafto in pred premogom), pri nas pa razmeroma nizkega, le okoli 12 % (Nerad, 2012).

S pojmom ogljikovodiki opredeljujemo fosilne energetske vire, kot so surova nafta, zemeljski plin in plinski kondenzat. V nadaljevanju jih skrajšano imenujemo nafta, plin in kondenzat. Prvotno so nastali v matični kamnini, v kateri je bila organska snov rastlinskega in živalskega porekla odložena v redukcijskih pogojih, ohranjena v sedimentih, šla skozi procese diagenese in zorenja ter nastanka naftnih in/ali plinastih snovi. Tem procesom je sledila manjša ali večja migracija ogljikovodikov v zbirne ali kolektorske plasti.

V Sloveniji imamo v Panonskem bazenu znano le eno gospodarsko pomembno območje nahajališč nafte in zemeljskega plina. To je območje Doline in Petišovcev nekoliko jugovzhodno od Lendave, znano tudi kot naftno-plinsko polje Dolina-Petišovci, obratujejo od leta 1943 dalje. Nahajališča omenjenega polja, ki so neogenske starosti, delimo na plitka nahajališča v globinah od 1000 m do 2000 m in na globoka nahajališča v globinah od 2000 m navzdol do predterciarne podlage. Slednja so danes ekonomsko bolj perspektivna kot plitka.

Nosilec rudarske pravice za izkoriščanje mineralnih surovin – ogljikovodikov na področju Murske depresije je družba Geoenergo d.o.o. Angleška družba z registrirano podružnico v Sloveniji Ascent Slovenia Limited, je glavna investitorica na področju pridobivanja zemeljskega plina na naftno-plinskem polju Petišovci-Dolina, upravljavec rudarske infrastrukture za pridobivanje ogljikovodikov je Petrol Geo, proizvodnja ogljikovodikov d.o.o. Ker je proizvodnja nafte danes praktično zanemarljiva, bo tematika tega članka poudarjeno obravnavala le plinska nahajališča.

Razvoj nahajališča in proizvodnja zemeljskega plina

Ko zaslišimo besedi nafta ali pa zemeljski plin, pogosto pomislimo na pokrajino, posejano z vrtnimi stolpi in prepredeno z naftovodi in plinovodi. Kot na vseh področjih je tudi na naftnem področju tehnologija zelo napredovala, saj

nam ta omogoča manjšo degradacijo okolja tako v času vrtanja kot tudi v času proizvodnje. Po končani proizvodnji je treba vrtine sanirati, urediti okolje v primerno stanje, čim bolj podobno prvotnemu, in vzpostaviti državni monitoring naftno-plinskega polja (opazovalne vrtine).

Osnovni pojmi

Za lažje razumevanje spodnjega besedila bomo na kratko opisali nekaj osnovnih pojmov, ki se nanašajo na naftno in plinsko industrijo (Čikeš, 2013):

- Ogljikovodik (angl. *hydrocarbon*) je organska spojina, ki jo sestavljata izključno ogljik in vodik. Večino ogljikovodikov na Zemlji najdemo v surovi nafti in zemeljskem plinu.
- Surova nafta (angl. *crude oil*) je tekočina, ki jo najdemo v Zemlji in je sestavljena iz ogljikovodikov, organskih spojin in majhnih (slednih) količin kovinskih elementov.
- Plin v plinski kapi (angl. *gas cap*) je plin v strukturni pasti in se nahaja nad nafto.
- Naftni plin (angl. *associated gas*) je zemeljski plin, ki je v zgornjem delu nahajališča in je v kontaktu z nafto (plin v plinski kapi) imenovan kot prosti zemeljski plin (angl. *gas cap*) ali raztopljen zemeljski plin (angl. *solution gas*) v nafti.
- Zemeljski plin (angl. *natural gas*) je plin, sestavljen predvsem iz metana, ki pa lahko vsebuje tudi majhne količine drugih ogljikovodikov: etana, propana, butana, pentana in heksana, ki jih imenujemo s kratico "C₁-C₆" plini.
- Plinski kondenzat (angl. *condensate*) je zemeljski plin, ki je v nahajališčnih pogojih v plinastem agregatnem stanju, pri proizvodnji pa se plin kondenzira in se ga pridobi v tekočem stanju.
- Nahajališče (angl. *reservoir*), imenovano tudi kolektor, kolektorska plast ali kolektorski sloj je kamnina, v kateri so v porah (medzrnskih ali razpoklinskih) ujeti akumulirani ogljikovodiki. Najpogostejša nahajališča so v klastičnih in karbonatnih kamninah, lahko pa tudi v magmatskih in metamorfnih. Ime za nahajališče je tudi ležišče, ki pa se v novem času opušča (Pavšič, 2013).
- Naftno in/ali plinsko polje (angl. *oil and/or gas field*) je določeno območje na površini, kjer poteka pridobivanje ogljikovodikov in je po naši rudarski zakonodaji omejeno kot pridobivalni prostor.

- Naftna geologija (angl. *oil geology*) je veja geologije, ki temeljno in uporabno raziskuje nahajališča ogljikovodikov in ocenjuje ter vrednoti njihove vire in zaloge. Pri tem upošteva izsledke sorodnih in dopolnjujočih ved: stratigrafije, geofizike, petrologije in petrofizike, rezervoarskega inženirstva, kemije in fizike ogljikovodikov itd.

Proces od raziskovanja do proizvodnje ogljikovodikov zajema pet razvojnih stopenj, od odkrivanja ogljikovodikov do sanacije naftnega in/ali plinskega polja ter monitoringa. V nadaljevanju je opisana vsaka stopnja glede na dejavnosti, delovna mesta, stroške in časovne okvire.

Stopnje razvoja polja

Raziskovanje

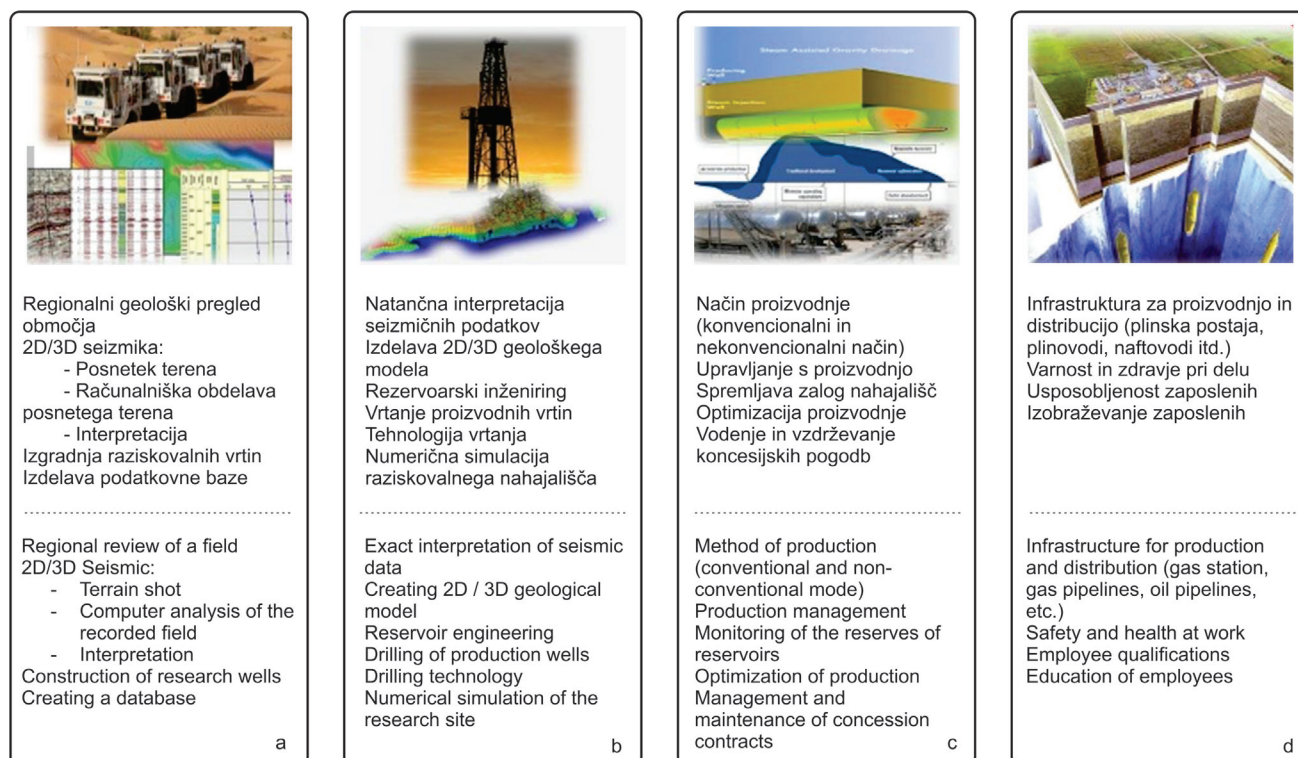
Raziskovanje nafte in plina je metoda, ki jo uporabljajo naftni geologi in geofiziki za iskanje ogljikovodikov na območjih celin (angl. *on-shore*), ali izven njih (angl. *off-shore*) – v morjih. Sestavljena je iz iskanja virov in zalog nafte in/ali plina z uporabo primarnih tehnologij, zlasti geofizikalnih globokih seizmičnih raziskav in raziskovalnih vrtin (sl. 1a). Raziskovanje je draga in tvegana operacija, ker se z njim povezani

odhodki običajno vrednotijo v milijonih evrov in pri tem v povprečju saka druga vrtina od treh (Čikeš, 2013) ne vsebuje sledi ogljikovodikov. Zato je na potencialnem območju potrebno izvrtati večje število vrtin, preden se lahko ugotovi pravo velikost naftnega in/ali plinskega nahajališča, kar pa lahko traja več let ali celo desetletij.

Med raziskovalnim vrtanjem se pridobivajo pomembni podatki na podlagi vzorcev kamnin (izpirkov navrtanega materiala), vzorcev fluidov (nafta in plinski kondenzat), vzorcev plina (zemeljski plin) in karotažnih meritev (določitev lastnosti kamnin – tip kamnine, poroznost, nasičenost z ogljikovodiki itd.) z namenom, da se lahko določijo (Jahn et al., 2003):

- perspektivnost nahajališča,
- tipi surove nafte in zemeljskega plina v nahajališču,
- prostornina nahajališča (korelacija več vrtin).

Za vsako delo, ki zahteva fizični napor (seizmične raziskave, vrtanje, vzorčenje itd.), se morajo upoštevati visoki standardi glede varnosti in zdravja ljudi pri delu, ki ga narekujejo zakonodaja in pravilniki.



Sl. 1. Stopnje razvoja naftno-plinskega polja (Tanoh, 2016), a - raziskovanje in pridobivanje podatkov, b - obdelava podatkov in izdelava 3D geoloških modelov, c - upravljanje proizvodnje naftno-plinskega polja, d - vzdrževanje proizvodnje na naftno-plinskem polju.

Fig. 1. Stages of oil and gas field development, a - Research and data acquisition, b - Data processing and preparation of 3D geological models, c - Oil and gas field production, d - Maintenance of production on oil and gas field.

Ocenjevanje

Ko podjetje uspešno opravi raziskovalno vrtnje in odkrije nafto ali plin, je naslednja stopnja ocenjevanje razvojnega cikla nahajališča. Glavni namen te faze je zmanjšati negotovost ali možnost izgube začetnih investicij glede perspektivnosti in velikosti naftnega in/ali plinskega polja. Med ocenjevanjem se poleg vrtin za raziskovanje izvrti tudi več vrtin za zbiranje informacij, kot so na primer jedra v določenih intervalih nahajališč in podrobnejše raziskave na njih (geomehanske značilnosti, struktura in tekstura kamnin, poroznost itd.). Druga seizmična raziskava se ponovi, če je potrebno, da bi z njo dobili boljšo podobo nahajališča. Te dejavnosti trajajo še nekaj let in stanejo desetine do stotine milijonov evrov, kar zavisi od velikosti polja (Jahn et al., 2003). Več seizmičnih raziskav in raziskovalnih vrtin pomaga naftnim geologom, geofizikom in rezervoarskim inženirjem razumeti nahajališča (sl. 1b). Na primer, kako se spreminjajo lastnosti kolektorskih kamnin in s tem posledično razporejenost nafte in plina v prostoru, koliko nafte ali plina je v nahajališču in kako hitro se bosta nafta in/ali plin gibala (migrirala) skozi nahajališče v času proizvodnje. Po uspešni stopnji ocenjevanja se podjetje odloči, ali se naftno ali plinsko polje lahko dejansko razvije ali ne.

Nastanek polja

Faza nastanka naftno-plinskega polja se pojavi ob uspešni oceni in pred začetno proizvodnjo. Glavne dejavnosti so (Saridja, 1985):

- Oblikovanje načrta za razvoj naftnega ali plinskega polja z vključitvijo zadostnega števila vrtin, potrebnih za proizvodnjo nafte in/ali plina. Načrt pripravijo geologi, geofiziki in rezervoarski inženirji.

- Odločitev o uporabi tehnologije vrtanja za proizvodne vrtine, ki jo utemeljijo geotehnologi, strokovnjaki za vrtanje, rudarski strojniki.
- Odločitev o velikosti proizvodne zmogljivosti polja (ocena proizvodne zmogljivosti polja skozi časovno obdobje) narekuje potrebe po objektih za obdelavo nafte ali plina (rafinerije, plinske postaje itd.), ki jo utemeljijo inženirji za procesno tehniko.
- Odločitev glede transporta nafte in plina, ki jo opredelijo inženirji logistike.

Razvojni načrt se zaključi z v prvi fazi izvrtanimi proizvodnimi vrtinami in zgrajenimi vsemi potrebnimi objekti za procesiranje ogljikovodikov. V razvojni načrt so vključeni inženirji s področja geotehnologije, logistike in procesne tehnike, ki ustvarijo pogoje za proizvodnjo ogljikovodikov iz nahajališč (sl. 1c). Pri tem se ustvarjajo številne možnosti zaposlovanja, kjer ljudje lahko sodelujejo pri izgradnji proizvodnih objektov. Najpomembnejša prednostna naloga pri tem je varnost. Tveganje za nesrečo je v tej fazi najvišje zaradi števila ljudi, ki se ukvarjajo s pripravo delovišča in samim vrtanjem (Jahn et al., 2003).

Razvoj naftnega polja lahko stane več milijard evrov in običajno traja 5-10 let, odvisno od lokacije, velikosti in kompleksnosti objektov ter števila potrebnih vrtin. Razvoj na kopnem je razmeroma veliko cenejši od razvoja na morju.

Naftna in plinska podjetja naredijo na tej stopnji razvoja polja dokumentacijo o racionalnih pričakovanjih uspešnosti pridobivanja ogljikovodikov z analizo stroškov raziskovanja, stroškov razvoja ter dobička pri prodaji ogljikovodikov. Razvojni cikel se izvede, če so izpolnjeni vsi pogoji po ustrezni rudarski in okoljevarstveni zakonodaji.



Sl. 2. Vrtalni stolp na plinski vrtini Pg-3 in površinska črpalka na naftni vrtini Pt-1 (vir: Petrol Geo, 2018).

Fig. 2. Drilling rig on the gas well Pg-3 and surface pump on the oil well Pt-1 (source: Petrol Geo, 2018).

Proizvodnja

Proizvodnja je zadnja faza, v kateri se pridobivajo ogljikovodiki iz naftnega in/ali plinskega polja ter prvi prihodek iz prodaje nafte in/ali plina. Po tem, ko prihodki presežejo začetno naložbo in fiksne stroške podjetja, se začne ustvarjati dobiček. Proizvodnja na naftno-plinskem polju lahko traja več let, do okoli 40 let, odvisno od velikosti, oblike in tipa kamnin (peščenjaki, skrilavci, karbonati in druge kamnine) v nahajališču (sl. 1d).

Operaterji delajo v izmenah za nemoteno proizvodnjo. Inženirji skrbijo za pravilno delovanje proizvodnega procesa (nadgrajevanje, izboljševanje), rezervoarski inženirji pa spremljajo stanje zalog v nahajališčih in iščejo nova perspektivna nahajališča (Jahn et al., 2003).

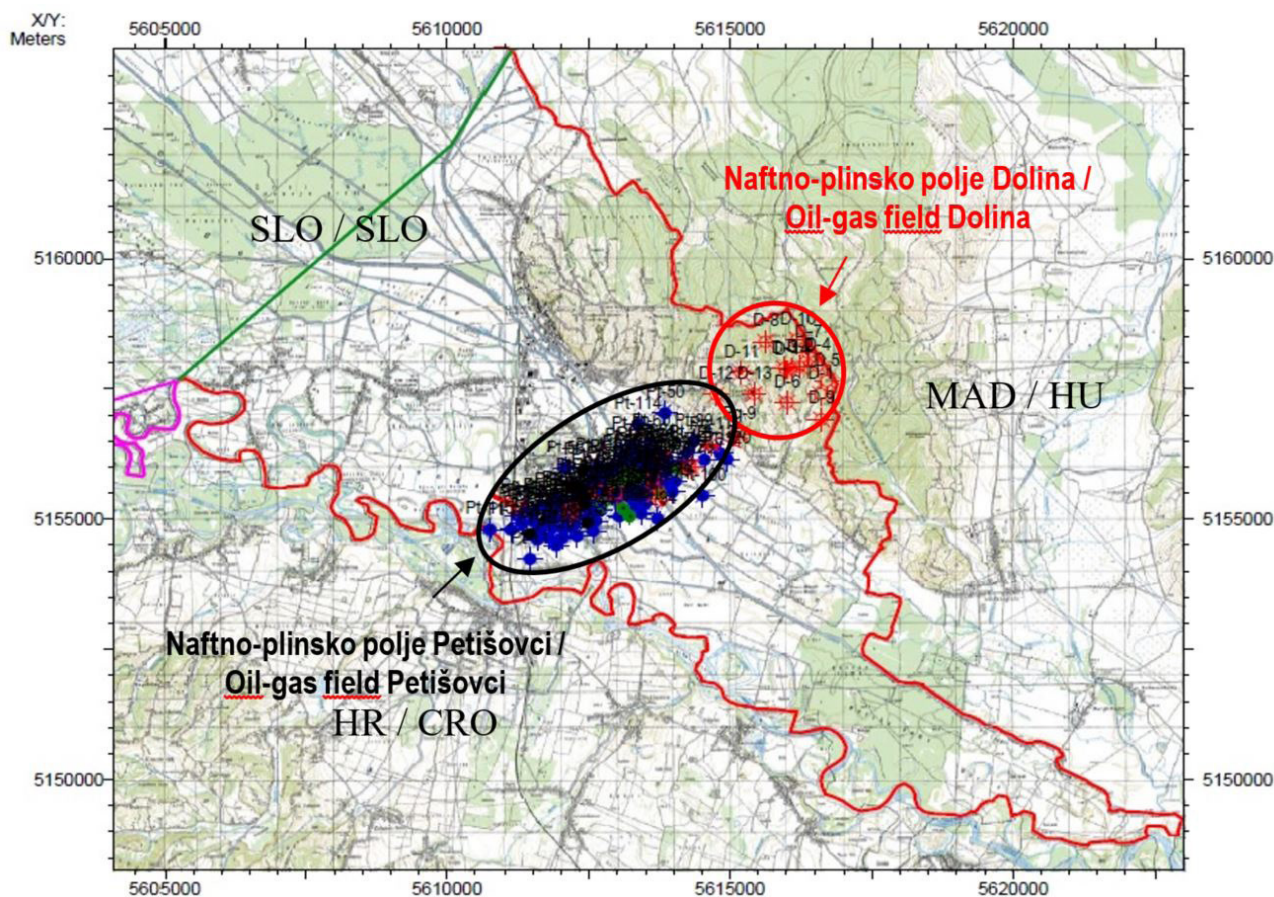
Sanacija

Sanacija je izraz, ki se uporablja za opis vzpostavitve degradiranega okolja zaradi izkoriščanja nafte in/ali plina v stanje, ki bo čim boljše prvotnemu stanju in prijazno okolju brez škodljivih vplivov na zdravje ljudi in živali. Prvotnega stanja sicer ni mogoče nikoli povsem povrniti, zato pa se upoštevajo najvišji standardi za izvedbo sanacije, in sicer (Jahn et al., 2003):

- cementiranje proizvodnih intervalov v vrtnah,
- postavitve cementacijskih čepov v vrtnah,
- odstranitev ustij vrtin in pritrditev slepih prirobnic,
- odstranitev naftovodov in plinovodov,
- odstranitev vseh ostalih objektov (plinskih postaj, rafinerij itd.),
- nekaj vrtin se preuredi za monitoring nahajališč, ki ga izvaja državni monitoring.

Odkritje naftno-plinskega polja Petišovci-Dolina

Naftno-plinsko polje Petišovci sodi po naftno-geološki prostorski opredelitvi v Mursko depresijo (Pleničar, 1954; Mioč & Marković, 1998). Začetki raziskav nahajališč ogljikovodikov na območju Murske depresije segajo v sredino 19. stoletja, ko so na Hrvaškem v neposredni bližini meje s Slovenijo v vaseh Peklenica in Selnica začeli pridobivati nafto na površinskih izviri. Raziskave nahajališč ogljikovodikov so se od tod postopno razširile tudi proti severu v Prekmurje oziroma slovenski del Murske depresije. Na začetku 2. svetovne vojne so bile po obsežnih površinskih geoloških raziskavah širšega območja



Murske depresije izvedene gravimetrične meritve (Pleničar, 1954). Na osnovi pridobljenih podatkov je bila leta 1942 najprej določena lokacija in nato izvrtana vrtina Dolina 1 (D1) do globine okrog 1460 m in leta 1943 vrtina Petišovci-1 (Pt-1) do globine okrog 1750 m. Črpalko na naftni vrtini Pt-1 kaže slika 2.

Tako sta bili odkriti naftno-plinski polji Dolina in Petišovci (sl. 3). Kmalu je bilo ugotovljeno, da je naftno-plinsko polje Dolina sestavni del velikega madžarskega polja Lovászi in da je naftno-plinsko polje Petišovci samostojna antiklinalna struktura, ki se nahaja na severnem delu Ormoško-selniške antiklinale (antiforme).

Po odkritju naftno-plinskega polja Petišovci z raziskovalno vrtino Pt-1 se je še v času 2. svetovne vojne nadaljevalo z izgradnjo razdelovalnih vrtin Pt-2 in Pt-3 in po 2. svetovni vojni do leta 1958 z izgradnjo še 107-ih proizvodno-razdelovalnih vrtin. Z dodatnimi seizmičnimi meritvami v letu 1960 je bilo ugotovljeno, da se na območju naftno-plinskega polja Petišovci, pod zgornjemiocenskimi sedimenti, nahaja perspektivna struktura srednje in spodnjemiocenskih sedimentov (Bokor, 1986). Leta 1961 je sledila izgradnja prve globoke raziskovalne vrtine Pg-1 do globine približno 2970 m, s katero so bila odkrita globoka plinska nahajališča, tako imenovana nahajališča »Petišovci globoko«. V obdobju od leta 1961 do leta 1990 je bilo skupno izvrtanih 9 vrtin, ki so vse razen ene (ki ni bila dokončana) navrtale slabo prepustna plinska nahajališča »Petišovci globoko« (sl. 2 - primer plinske vrtine Pg-3). Po izvedbi in interpretaciji 3D seizmičnih meritev sta bili leta 2011 izdelani še dve globoki vrtini (Pg-10 in Pg-11A), ki sta bili leta 2017 vključeni v proizvodnjo.

Geološka zgradba naftno-plinskega polja Petišovci

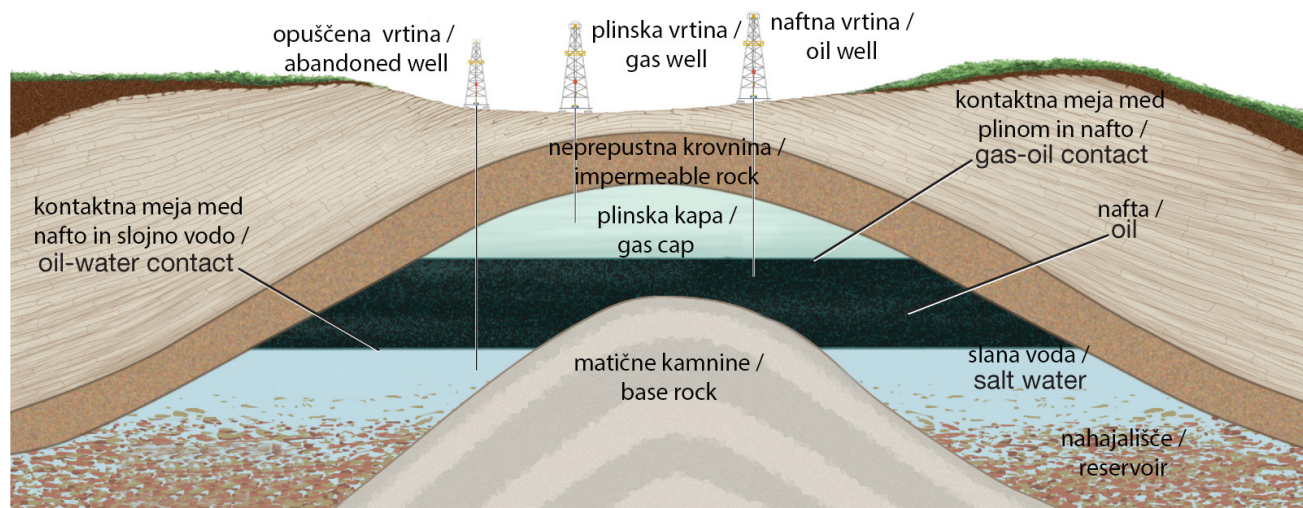
Za nastanek nahajališč ogljikovodikov morajo biti izpolnjeni trije pogoji (sl. 4). Obstajati morajo (Nedeljković, 1963):

- matične kamnine,
- porozne in prepustne rezervoarske kamnine, v katerih se ogljikovodiki akumulirajo,
- neprepustna krovina nahajališča (angl. *cap rock*) ali drugi mehanizmi, ki preprečujejo uhajanje ogljikovodikov.

Naftno-plinsko polje Petišovci delimo v osnovi po vertikali v 5 glavnih nahajališč ogljikovodikov, ki si sledijo od vrha navzdol po naslednjem vrstnem redu (od površine terena):

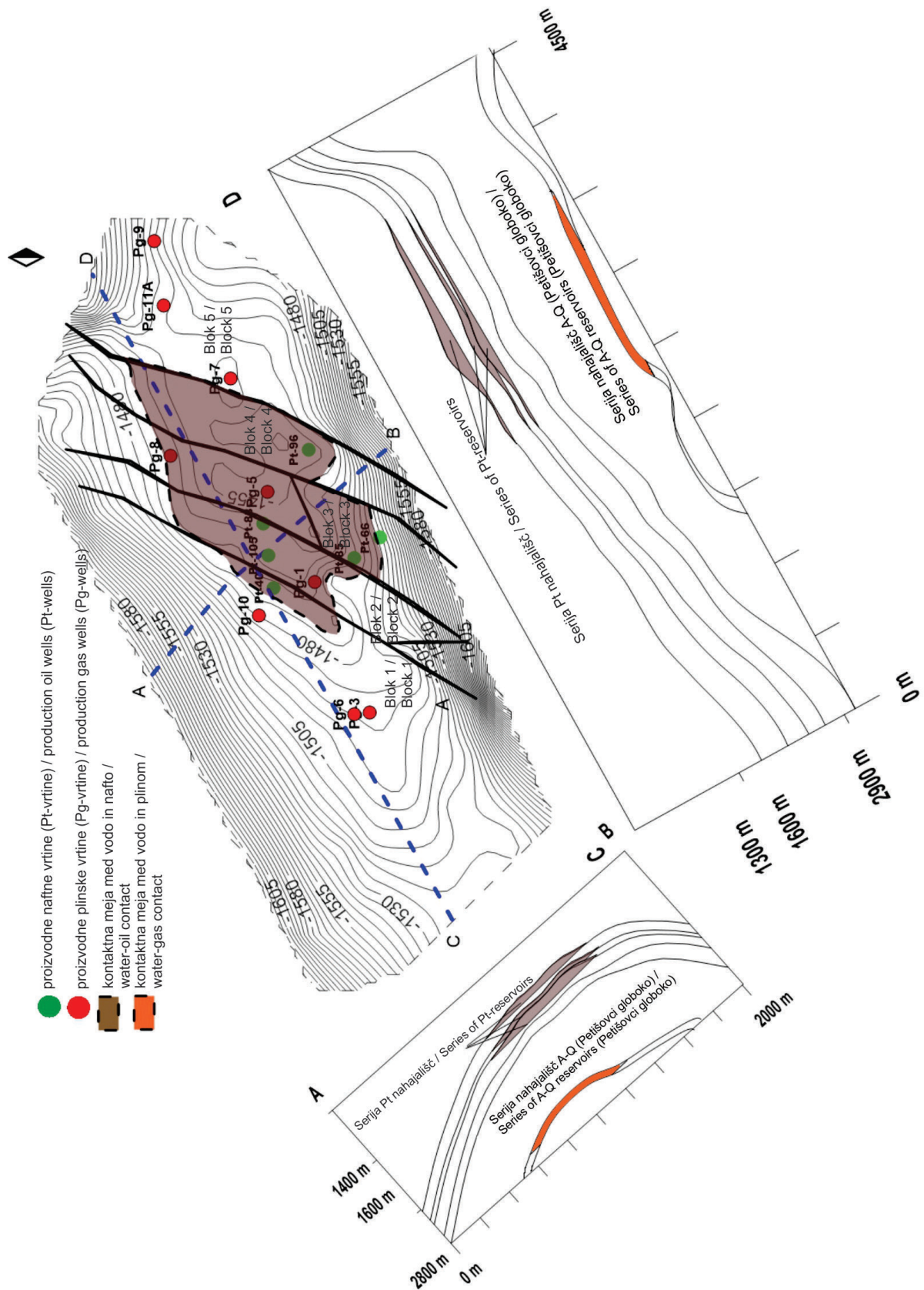
- Paka, serija naftnih nahajališč (1080-1200 m),
- Ratka, serija naftnih nahajališč (1300-1400 m),
- Lovaszi, serija plinskih nahajališč (1550-1600 m),
- Petišovci, serija naftnih nahajališč (1650-1700 m),
- »Petišovci globoko«, serija plinskih nahajališč (od 2000 m navzdol – terciarna podlaga).

V primeru Petišovcev so mnogoštevilni plinonosni in/ali naftonosni sloji bolj ali manj porozni miocenski neogenski peščenjaki z vmesnimi tankimi plastmi laporjev. Naftonosne in/ali plinonosne plasti so debele od nekaj metrov do nekaj deset metrov in približno enako debele so tudi vmesne neprepustne (izolacijske) plasti laporcev.



Sl. 4. Poenostavljen geološki prerez skozi antiformno nahajališče ogljikovodikov (Internet 1).

Fig. 4. Generalized geological cross-section through an anti-form hydrocarbon reservoir (Internet 1).



Sl. 5. Struktura naftnih nahajališč Petišovci in plinskih nahajališč "Petišovci globoko" (Kerčmar, 2014).
 Fig. 5. Structure of oil reservoirs Petišovci and gas reservoirs "Petišovci globoko" (Kerčmar, 2014).

Znotraj naftno-plinskega polja Petišovci je trenutno najbolj perspektivno plinsko nahajališče »Petišovci globoko«, ki je predmet natančnejše razlage v nadaljevanju članka.

Nahajališča »Petišovci globoko«

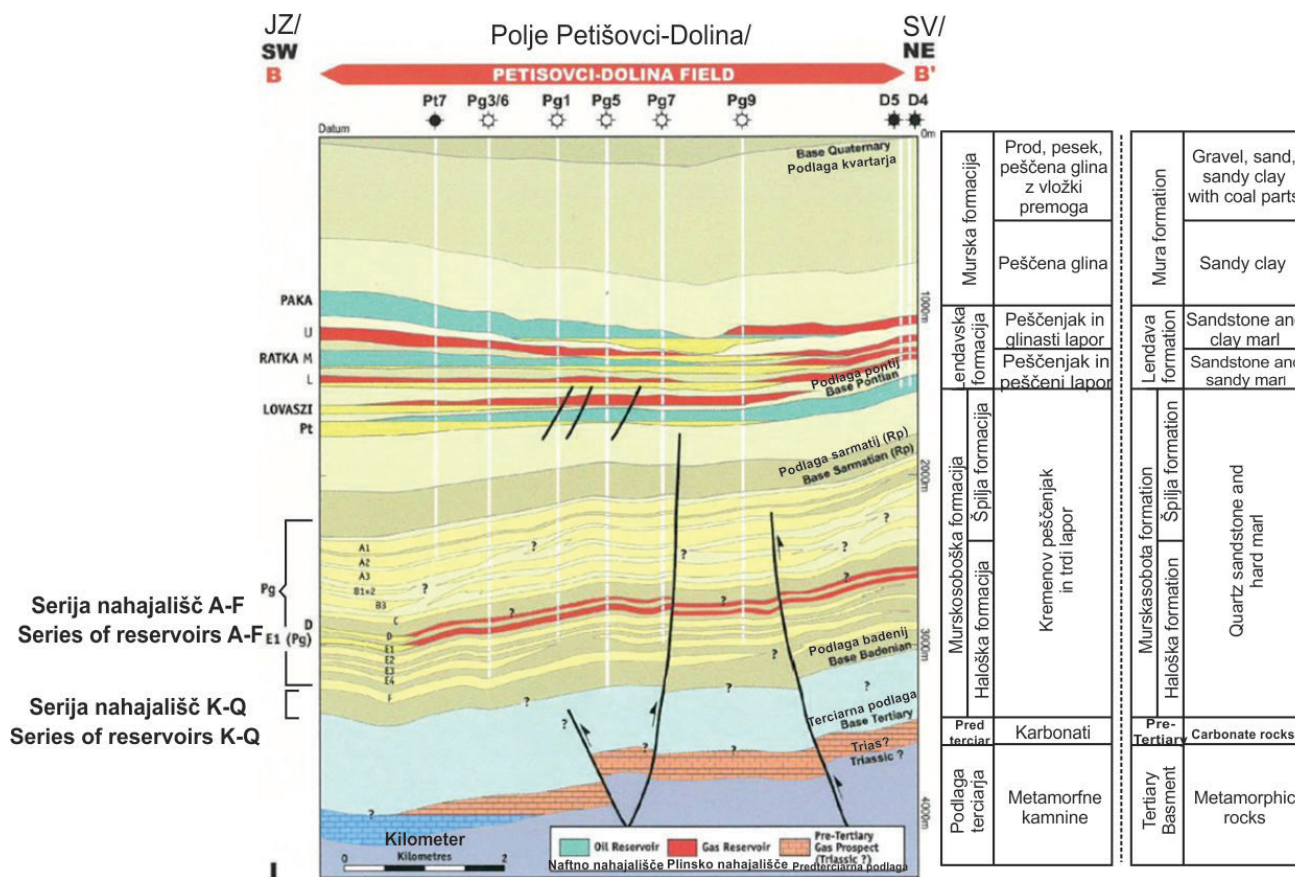
Strukturno-tektonska zgradba

Najstarejše ogljikovodikonosne karpatijske in badenijske plasti tvorijo na obravnavanem območju kompleksno antiformalno strukturo z nekaj maksimumi, ki predstavljajo »strukturne pasti« za akumulacijo oziroma »ujetje« ogljikovodikov v njih. Omenjena antiformala (sl. 5) v prečnodinarski smeri SW-NE je v geološki literaturi (Mioč & Marković, 1998) imenovana kot Ormoško-selniška antiklinala. Interpretacije v 1980-ih letih (Djurasek, 1988) so pokazale, da je omenjena antiformala dvignjena (iztisnjena) ob dveh reverzih prelomih, Ljutomerskem in Donačkem prelomu. Antiformalo sekajo prečni prelomi, ki jo delijo v več blokov (Mioč & Marković, 1998). Gre za pet glavnih blokov z značilno strukturo horstov in vmesnih grabnov. Vsak blok zase predstavlja posebno hidrodinamsko enoto.

Litostratigrafske razmere

Stratigrafija plasti polja Petišovci je na osnovi velikega števila litoških in paleontoloških preiskav vzorcev izvrtanih kamnin ter korelacij z geofizikalnimi elektrokarotaznimi (EK) diagrami potrjena kot kronostratigrafska in litostratigrafska zgornjeterciarna (neogenska) starost plasti, značilna za Mursko depresijo. Terciarni sedimenti so razvrščeni v tri formacije. Najstarejša je Mursko-soboška formacija, ki se po novem deli na Haloško in Špiljsko formacijo (Jelen & Rifelj, 2011), nad njo je v normalnem zaporedju Lendavska formacija in nato najmlajša Murska formacija (sl. 6).

Murskosoboška formacija (Špiljska in Haloška formacija) zajema v stratigrafskem zaporedju obdobja karpatija, badenija, sarmatija in spodnjega panonija. Karpatijske, badenijske in sarmatijske plasti sestavljajo trdo vezani drobno- do srednjezrnati kremenovi peščenjaki s sljudo, meljevci in trdi do srednje trdi meljasti laporji. Spodnjepanonijske plasti pa sestavljajo srednje vezani drobno- do srednjezrnati kremenovi peščenjaki s sljudo, lapornati peščenjaki, meljevci in srednje trdi laporji (Bokor, 1986; Lisjak, 1988).



Sl. 6. Presek naftno-plinskega polja Petišovci-Dolina z litoškimi stolpcem (vir: Ascent Resources, Geomega, 2012).

Fig. 6. Cross-section through the Petišovci-Dolina oil and gas field with lithological column (source: Ascent Resources, Geomega 2012).

Lendavska formacija je zgornjepanonijske do spodnjepontijske starosti. Zgornjepanonijske plasti sestavljajo srednje vezani drobno- do srednjezrnati kremenovi peščenjaki s sljudo in srednje trdi laporji, spodnjepontijske plasti pa sestavljajo slabo do srednje vezani kremenovi peščenjaki s sljudo in srednje trdi laporji.

Murska formacija je zgornjepontijske starosti in jo sestavljajo slabo vezani peščenjaki, peski in prod ter peščene in lapornate gline z vložki lignitnega do rjavega premoga (Markič et al., 2011).

Kvartar sestavljajo gline, peski, prod in humus.

Serijski peščenjakovi »Petišovci globoko« na naftno-plinskem polju Petišovci je s podrobno korelacijo EK-diagramov, jeder in podatkov, dobljenih z geološko spremljavo vrtin, izdvojena v badenijskih in karpatijskih plasteh in sicer (od spodaj navzgor): serija F, serija E z nahajališči E_4 , E_3 , E_2 in E_1 , serija D z nahajališči D_2 in D_1 , serija C, serija B z nahajališči B_3 , B_2 in B_1 ter serija A z nahajališči A_4 , A_3 , A_2 in A_1 .

Na osnovi korelacije EK-diagramov je ugotovljeno, da so serije F, C, B in A nasičene z vodo, oziroma vsebujejo le manjše količine plina. Serija E z nahajališči E_4 , E_3 , E_2 in E_1 je ugotovljena na celotnem polju. Nahajališči E_3 in E_2 sta zavodnjena oziroma nasičeni z manjšimi količinami plina. Dotok plina iz nahajališča E_4 je bil ugotovljen samo v jugozahodnem delu polja v bloku 1 iz vrtin Pg-3 in Pg-6. Glavno nahajališče plina je E_1 , ki je najproduktivnejše v bloku 1 in v bloku 2. Serija D z nahajališči D_1 in D_2 se nahaja nad serijo E. Dotok plina iz nahajališča D_1 je potrjen na vseh vrtinah. Največje količine plina iz nahajališča D so dobljene iz 2. bloka. Z dvema novima vrtinama, Pg-10 in Pg-11A pa se je izkazalo, da so perspektivna nahajališča še globlja od serije nahajališč F, to je vse do nahajališč Q.

Nahajališča K, L, M, N, O, P in Q (sl. 6) so vključena v proizvodnjo z vrtinama Pg-10 in Pg-11A. V vrtini Pg-10 sta bili razkriti in mehansko obdelani nahajališči F in L, v vrtini Pg-11A pa M/N, O in P. Vsa našeta nahajališča so bila vključena v testno proizvodnjo leta 2011, v redno proizvodnjo pa so stopila leta 2017.

Vsa nahajališča plina "Petišovci globoko" so slabo prepustni peščenjaki miocenske starosti. Zaradi majhne primarne prepustnosti oziroma nizke permeabilnosti so bili omenjeni peščenjaki v fazi proizvodne razdelave polja obdelani z mehansko stimulacijo, ki je za polje Petišovci standardni postopek za spodbujeno pridobivanje plina že več kot šest desetletij (vir: Arhiv Petrol Geo).

Fizikalne lastnosti kolektorskih kamnin nahajališč

Izračun fizikalnih lastnosti kolektorskih kamnin nahajališč je bil narejen na podlagi podatkov o poroznostih posameznih nahajališč (ogljikovodikonosnih slojev), pridobljenih z analizo EK diagramov s programom EPILOG. Vrednosti glede nasičenja z vodo (S_w) zaradi vrste in lastnosti kamnin niso povsem zanesljive, kajti dobljene vrednosti so večje od realnih.

Laboratorijske vrednosti poroznosti in prepustnosti so bile izmerjene na sedmih odvzetih jedrih (Lisjak, 1988), na podlagi katerih se lahko poda verodostojno oceno kolektorskih parametrov. V tabeli 1 so prikazane vrednosti (povprečje med laboratorijskimi meritvami in vrednostmi, pridobljenimi iz EK diagramov) za poroznost, prepustnost in zasičenost s fluidi za nahajališča od D_1 do E_4 . Fizikalne lastnosti za trenutno nova proizvodna nahajališča serije, 'K' (K-Q) navrtane na vrtini Pg-10 in Pg-11A niso podane zaradi zaupnosti podatkov, ki si jih pridržuje investitor.

Klasifikacija in kategorizacija plinskega nahajališča

Raziskovanje in izkoriščanje mineralnih surovin v R Sloveniji opredeljuje Zakon o rudarstvu (Uradni list RS, št. 14/2014). Po Pravilniku o klasifikaciji in kategorizaciji zaloga in virov nafte, kondenzata in naravnih plinov (Uradni list RS, št. 61/10), ki ga določa Rudarski zakon, se morajo nahajališča v času testiranja oziroma na začetku redne proizvodnje ovrednotiti z elaboratom o zalogah. Šele na podlagi izdelanega elaborata se skupaj z rudarskim projektom za izkoriščanje mineralnih surovin na določenem pridobivalnem prostoru za določeno obdobje dodeli koncesija s strani države Republike Slovenije.

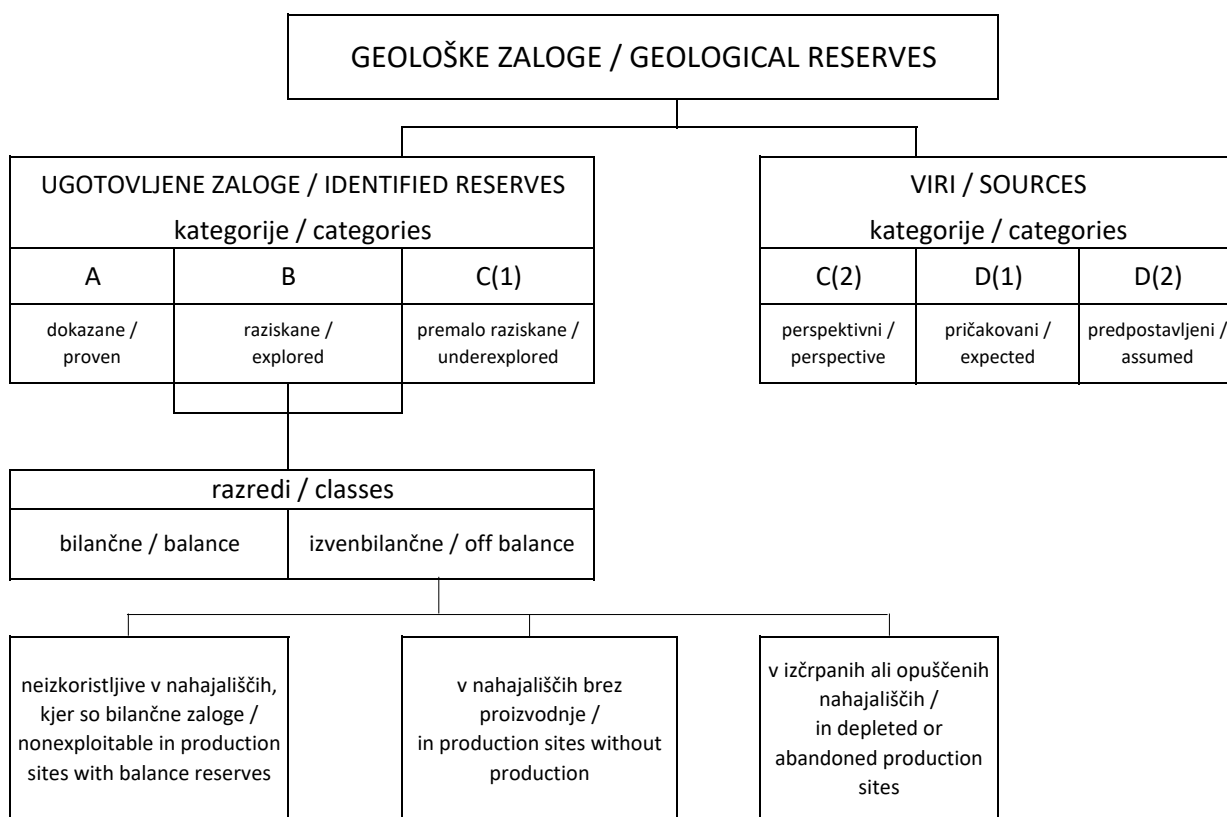
S klasifikacijo nahajališč opredelimo, ali gre za vire ali za zaloge, s stopnjo raziskanosti pa jih ovrednotimo v kategorije. Glede na ekonomsko terminologijo se zaloge nafte in plina delijo v tri skupine in sicer (Internet 2):

- Geološke zaloge: so skupne ugotovljene ali ocenjene zaloge mineralnih surovin znotraj nahajališča ali rudnega telesa brez upoštevanja odkopnih in industrijskih izgub.
- Bilančne zaloge: so zaloge, ki se lahko pri obstoječi stopnji znanosti, tehnike, tehnologije in ekonomske gospodarno izkoriščajo.
- Izvenbilančne zaloge: so zaloge, ki se ne morejo po obstoječi stopnji znanosti in tehnike ekonomično izkoriščati.

Tabela 1. Povprečne vrednosti za poroznost, prepustnost in nasičenost s fluidi v nahajališčih "Petišovci globoko" (po Lisjak, 1988).

Table 1. Average values for porosity (ϕ) water saturation (S_w), gas saturation (S_g) and permeability (k) of the »Petišovci globoko« D and E reservoirs as analysed in the Pg wells (after Lisjak, 1988).

Nahajališče / Reservoir	POROZNOST / POROSITY		NASIČENOST S FLUIDI / FLUID SATURATION			PREPUSTNOST / PERMEABILITY	
	Vrtina / Well	ϕ	Vrtina / Well	S_w (voda) / S_w (water)	S_g (plin) / S_g (gas)	Vrtina / Well	k ($10^{-3} \mu m^2$)
D1	Pg-2,5,6	0,081	Pg-5,6	0,40	0,60	Pg-5	0,38
D2	Pg-5,6	0,079	Pg-5,6	0,35	0,65		
E1	Pg-2,3,5,6	0,091	Pg-5,6	0,35	0,65	Pg-3	8,6
E2	Pg-5,6	0,054	Pg-5,6	0,45	0,55		
E3	Pg-3,5,6	0,065	Pg-5,6	0,45	0,55	Pg-5	0,27
E4	Pg-5,6	0,048	Pg-5,6	0,38	0,62		



Sl. 7. Klasifikacija in kategorizacija zalog in virov nafte, kondenzatov in naravnih plinov v Sloveniji (vir: Internet 3).

Fig. 7. Classification and categorisation of reserves and resources of oil, condensates and natural gas as in use Slovenia (source: Internet 3).

Računsko se bilančne zaloge ovrednotijo po naslednji enačbi:

$$BILANČNE\ ZALOGE = GEOLOŠKE\ ZALOGE - IZVENBILANČNE\ ZALOGE$$

Razvrščanje zalog in virov mineralnih surovin v ustrezne kategorije je pogojeno s stopnjo poznavanja (Internet 2):

- prostorska razporejenost kolektorja,
- fizikalne lastnosti kolektorja,
- fizikalne in kemične lastnosti fluidov,
- razmerja PVT fluidov,
- proizvodne značilnosti kolektorja.

Ugotovljene in razvrščene zaloge ter viri mineralnih surovin (sl. 7) izražajo stopnjo njihove raziskanosti in pripravljenosti za nadaljnje izkoriščanje. Delijo se v (Internet 2):

- A zaloge, ki se razvrščajo v nahajališču ali delu nahajališča, ugotovljene z vrtinami z dotokom fluidov, dobljenim z osvajanjem vrtin, ki so predvidene za proizvodnjo. Pri tem se ugotovi tudi: geološka sestava, oblika in velikost nahajališča ali njegovega dela, kolektorske lastnosti, položaj nahajališča ter fizikalno-kemične značilnosti fluidov.

- B zaloge, ki se razvrščajo v nahajališču ali delu nahajališča, ugotovljene z nekaj vrtnami, iz katerih je dobljen dotok fluidov z osvajanjem in potrjen s hidrodinamičnimi meritvami ali s poskusno proizvodnjo. V drugih vrtnah je prisotnost fluidov ugotovljena s karotažnimi meritvami, jemanjem vzorcev jedra ali testiranjem med vrtnami. Ugotovljena mora biti geološka sestava, oblika in velikost nahajališča ali njegovega dela, kolektorske lastnosti, razmerja ter fizikalne in kemijske značilnosti fluidov.
- C(1) zaloge, ki se razvrščajo v nahajališču ali delu nahajališča, ki so odkrite z raziskovalnimi vrtnami. Dotok fluidov se doseže z osvajanjem in hidrodinamičnimi raziskavami najmanj na eni raziskovalni vrtni. Meje nahajališča so določene na podlagi podatkov geološko-geofizikalnih raziskav in vrtnja.
- C(2) vire, katerih prisotnost se predpostavlja na podlagi podrobnih geološko-geofizikalnih raziskav (razvoj strukturno-tektonske enote nahajališča).
- D(1) vire, ki jih je mogoče pričakovati na podlagi rezultatov regionalnih geoloških in geofizikalnih raziskav (prisotnost naravnega rezervoarja, njegova strukturna oblika, prisotnost ogljikovodikov).

- D(2) vire, ki jih je mogoče oceniti na podlagi temeljnih geoloških in geofizikalnih raziskav.

Za izračun zalog mineralnih surovin kategorij A, B in C(1) se uporabljajo naslednje metode:

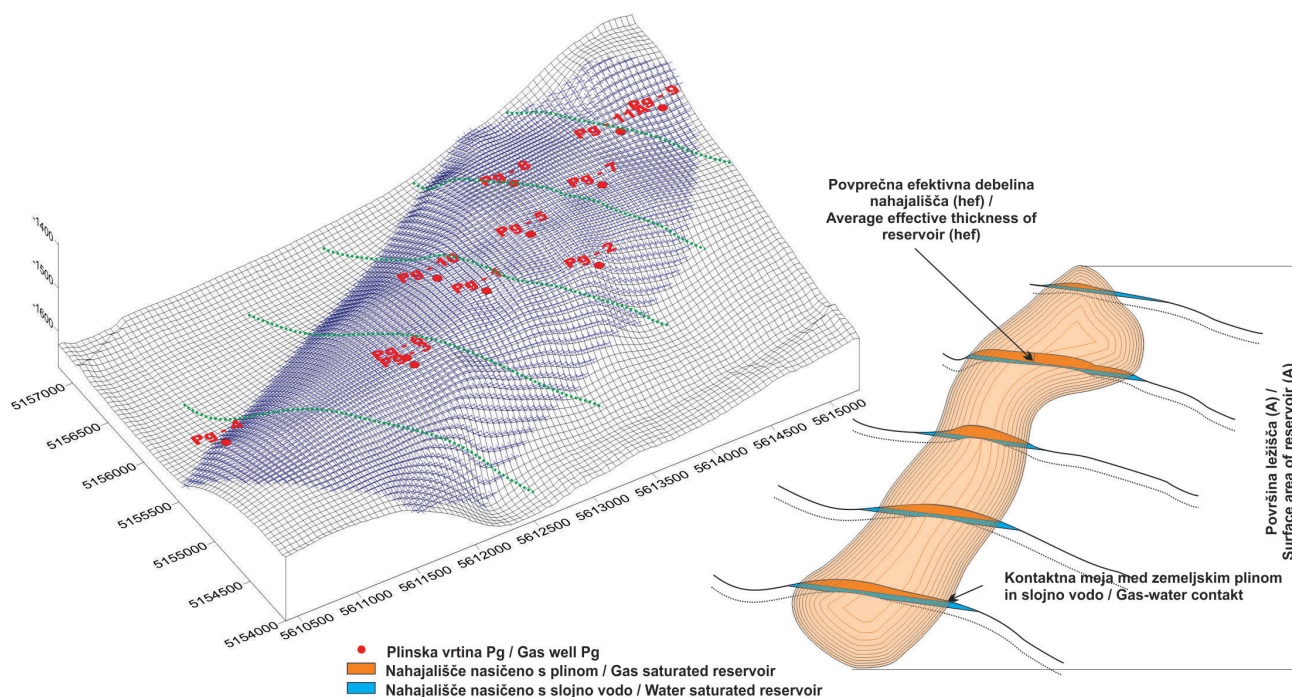
1. prostorninska metoda,
2. metoda materialnega ravnovesja,
3. statistična metoda,
4. metoda matematičnega modeliranja.

Viri mineralnih surovin kategorije C(2) in D(1) se izračunavajo s prostorninsko metodo, viri kategorije D(2) se izračunavajo po metodi geološke analogije.

Pri elaboratu iz leta 1986 (Bokor et al, 1986) in leta 1988 (Lisjak et al., 1988) za izračun začetnih geološki zalog in virov nafte, plina in kondenzata na območju naftno-plinskega polja Petišovci-Dolina se je uporabila prostorninska metoda. Zaloge in viri so bili izračunani po naslednji enačbi (sl. 8):

$$G_i = \frac{A * h_{ef} * \phi * S_{gi}}{B_{gi}}$$

- G_i - začetne geološke rezerve (Sm^3) / initial geological reserves (Sm^3),
- A - površina nahajališča (m^2) / reservoir area (m^2),
- h_{ef} - povprečna efektivna debelina nahajališča (m) / average effective thickness of a reservoir (m),



Sl. 8. Primer volumenskega preseka posameznega nahajališča „Petišovci globoko“ (Kerčmar, 2014).

Fig. 8. An example of a volumetric cross-section of a reservoir from “Petišovci globoko” (Kerčmar, 2014).

- ϕ - povprečna poroznost (v delih enote, ne %) / average porosity (in parts of the unit, not %),
- S_{gi} - povprečno začetno nasičenje s plinom ($1-S_{wi}$) (v delih enote, ne %) / average initial gas saturation ($1-S_{wi}$) (in parts of the unit, not %),
- B_{gi} - začetni prostorninski koeficient plina (m^3/m^3) / initial gas volume factor (m^3/m^3).

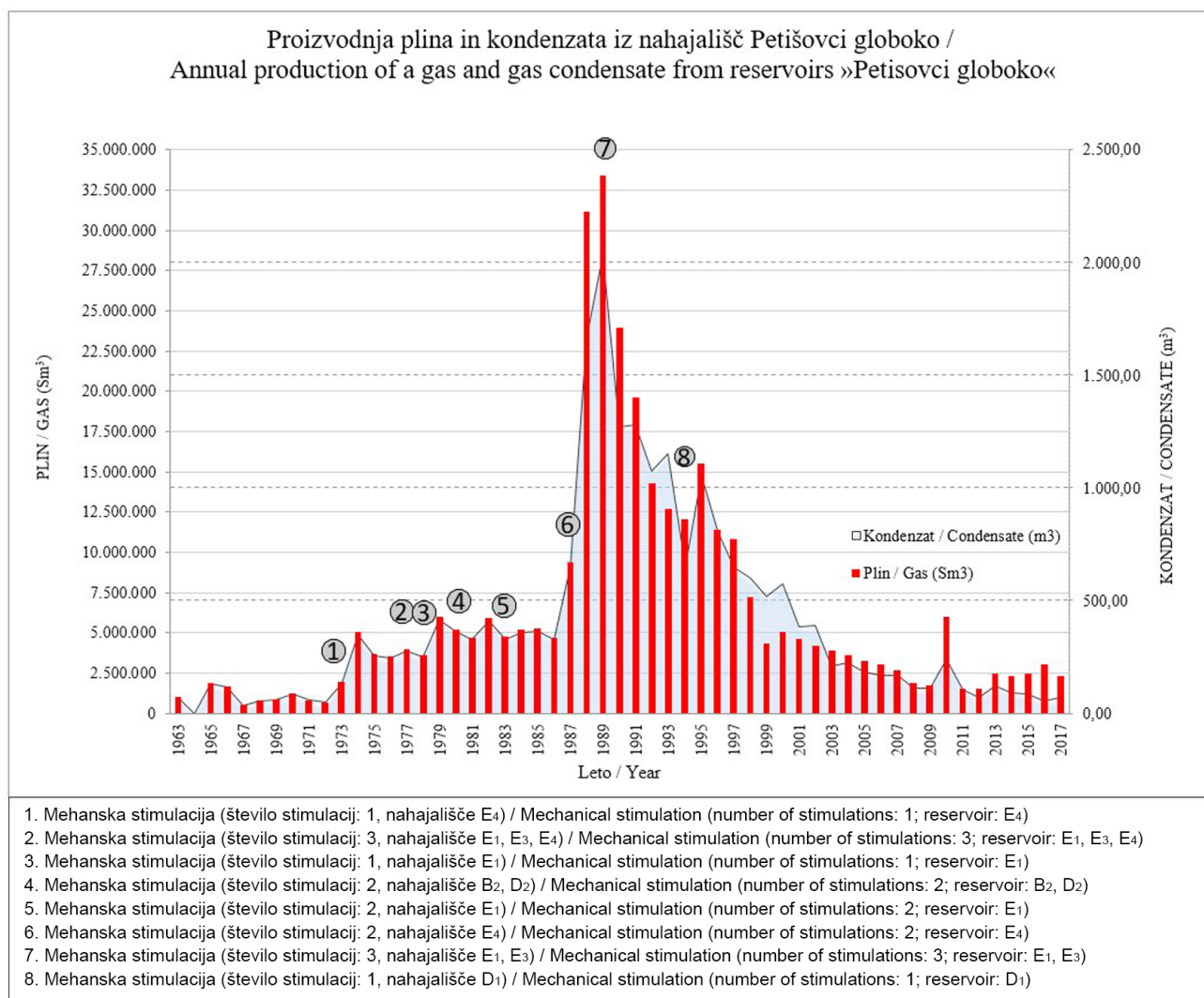
Stopnja izkoriščenosti geoloških zalog (mednarodno znanih kot *in-situ* zalog) znaša za plinska nahajališča serije A-F »Petišovci globoko« 45–60 % (Bokor, 1986).

Trenutno se v svetu za izračun zalog uporablja statistična metoda, imenovana metoda Monte Carlo. Z omenjeno metodo se uporabijo vrednosti velikega števila meritev posameznih parametrov (debelina plasti, poroznost, nasičenost z ogljikovodiki itd.), ki se nato prikažejo v verje-

tnostni porazdelitveni frekvenčni krivulji. Te se nato prevedejo v kumulativno krivuljo in nato odčitajo vrednosti P90, P50, P10 in mediana. Te vrednosti verjetnosti se potem uporabijo za izračun zalog s pomočjo površinske metode. V primeru ocene virov in zalog plina na območju Petišovcev z Monte-Carlo metodo je v smisel našega pravilnika o zalogah prevedel Markič (2014), kar je bilo predstavljeno tudi komisiji Komisiji za ugotavljanje zalog in virov mineralnih surovin januarja 2014.

Proizvodnja plina iz nahajališč »Petišovci globoko«

S Pg-vrtinami so bila raziskana plinska nahajališča »Petišovci globoko«, iz katerih se črpa zemeljski plin in plinski kondenzat vse od leta 1963 do danes. V času raziskav in poizkusne proizvodnje je bilo ugotovljeno, da so plinska nahajališča



Sl. 9. Proizvodnja plina in plinskega kondenzata po letih iz nahajališč »Petišovci globoko« serije A-F (vir: Petrol Geo, 2018).

Fig. 9. Annual production of a gas and gas condensate from reservoirs »Petišovci globoko« series A-F (source: Petrol Geo, 2018).

D₁, D₂, E₁, E₃, E₄ in F proizvodna pod pogojem, da se poveča naravna propustnost z mehansko stimulacijo. Po izvedbi mehanske stimulacije je bila daleč najboljša proizvodnja dosežena iz nahajališča E₁.

Takoj po stimulaciji nahajališč se vidi trend povečanja proizvodnje in sicer največja letna proizvodnja se je zgodila leta 1989, kjer so količine presegale 33 milijonov Sm³ in 2.000 m³ kondenzata. Skozi proizvodno obdobje nahajališča serije A-F je bilo narejenih 17 mehanskih stimulacij od leta 1973 do 1994. Pet stimulacij je bilo narejenih leta 2011 na vrtini Pg-10 in Pg-11A za nahajališča serije, 'K' (K-Q).

Skupno je bilo na naftno-plinskem polju Petišovci iz plinskih nahajališč od začetka proizvodnje leta 1963 do konca leta 2017 pridobljeno 341.754.115 Sm³ zemeljskega plina in 21.803 m³ kondenzata (Kraljič, 2015).

Letne proizvodnje zemeljskega plina in kondenzata od leta 1963 do 2017 iz nahajališč »Petišovci globoko« serije A-F (D₁, D₂, E₁, E₃, E₄ in F) so prikazane na sliki 9. Proizvodnja iz novih nahajališč serije K-Q na tej sliki še ni prikazana.

Zaključek

Kljub temu, da se zdi proizvodnja zemeljskega plina pogosto samoumevna in enostavna, gre za celovit razvoj naftno-plinskega polja, se pravi vse od raziskav, nastanka, proizvodnje in na koncu tudi sanacije polja, kjer je vključena cela vrsta strokovnjakov, ki pokrivajo različne stroške za to dejavnost. V zadnjih letih so v Sloveniji dela potekala na perspektivnih nahajališčih zemeljskega plina (»Petišovci-globoko«) na podlagi najnovejših 3-D seizmičnih meritev. Uspešni rezultati se kažejo v proizvodnji plina iz serije, 'K' iz vrtin Pg-10 in Pg-11A. Pospeseno pa se proučujejo tudi možnosti pridobivanja ogljikovodikov, predvsem plina tudi v območjih drugih vrtin z možnostjo njihove poglobitve in iskanja naknadnih perspektivnih globokih nahajališčih. Dejstvo namreč je, da se z večanjem globin raziskovanja in morebitnega pridobivanja plina vse bolj približujemo območju matičnih kamnin. S tem je pričakovati tudi večjo vsebnost ogljikovodikov, predvsem plinonost kolektorskih kamnin obravnavanega območja.

Zahvala

Za dovoljenje in uporabo podatkov se zahvaljujem podjetju Ascent Resources plc. - Podružnica Lendava, za popravke in usmeritve pri pisanju članka pa recenzentu dr. Milošu Markiču z Geološkega zavoda Slovenije.

Literatura

- Bokor, N., Sačar, D., Bauk, A. & Sečen, J. 1986: Elaborat o rezervama plina Petišovci-globoko, INA-Nafta Lendava: TOZD RNPN, OE Raziskave, Lendava.
- Čikeš, M. 2013: Proizvodnja nafte i plina. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb: 346 p.
- Djurasek, S. 1988: Pregledna karta podloge tercijskega sa odkrivenim naftnim i plinskim objektima. Nafta Lendava.
- Jahn, F., Cook, M. & Graham, M. 2003: Hydrocarbon Exploration and Production. Development in Petroleum Science 46. United Kingdom: 388 p.
- Jelen, B. & Rifelj, H. 2011: Površinska litostratigrafska in tektonska strukturna karta območja T-JAM projekta, severovzhodna Slovenija = Surface lithostratigraphic and tectonic map of the T-JAM project area, northeastern Slovenia, 1: 100.000. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Kerčmar, J. 2014: Vtiskovanje slojne vode v Pt ležišča, Idejni projekt. Petrol Geoterm.
- Kraljič, M., Kerčmar, J., Horn, B. & Lugomer-Pohajda, R. 2015: Rudarski projekt za izkoriščanje nafte in plina na pridobivalnem prostoru Petišovci-Dolina, št. proj.: RPZI, 02/15, PETROL GEOTERM d.o.o., Lendava.
- Kraljič, M., Lisjak, L., Sovilj-Legčević, J., Zag, J. & Levačič, N. 1997: Tehno-ekonomska analiza nadaljnje proizvodnje ogljikovodikov na naftno-plinskih poljih Petišovci in Dolina. Nafta Lendava. Sektor RPNP. Lendava: 39 p.
- Lisjak, L., Sovilj-Legčević, J. & Bokor, N. 1988: Naftno-plinsko polje Petišovci, Elaborat o rezervama nafte i plina, INA-Nafta Lendava: TOZD RNPN, OE Raziskave, Lendava.
- Markič, M. 2014: Ocena stanja zalog plina v peskih "A" do "Q" naftno-plinskega polja Petišovci na stanje 31. 12. 2012. Geološki zavod Slovenije, 20 p., dok.grad. 1-7.
- Markič, M., Turk, V., Kruk, B. & Šolar, V. S. 2011: Premog v Murski formaciji (pontij) med Lendavo in Murskim Središčem ter v širšem prostoru SV Slovenije. Geologija, 54/1., 97-120. <https://doi.org/10.5474/geologija.2011.008>
- Nerad, J. 2012: Energija v Sloveniji 2012. Republika Slovenija, Ministrstvo za infrastrukturo, Direktorat za energijo, Sektor za energetiko in rudarstvo: 54 p.
- Mioč, P. & Marković, S. 1998: Osnovna geološka karta. Tolmač za list Čakovec L 33-57. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko. Ljubljana, Inštitut za geološka istraživanja. Zagreb: 84 p.

- Nedeljković, V. 1963: Eksploatacija naftnih i gasnih ležišta. Prvi deo. Tehnologija ležišta i proizvodnje. Novi Sad: 286 p.
- Pavšič, J. 2013: Geološki terminološki slovar. Založba ZRC, Ljubljana: 331 p.
- Pleničar, M. 1954: Obmurska naftna nahajališča. Geologija, 2: 36-93.
- Tanoh, A. D. 2016: The Exploration and Production Life cycle of oil and gas. <http://www.reportingoilandgas.org/the-exploration-and-production-life-cycle-of-oil-and-gas/> (15.06.2018).
- Internetni viri:
- Internet 1: <https://www.britannica.com/science/gas-reservoir> (15.06.2018).
- Internet 2: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2006-01-1507?sop=2006-01-1507> (15.06.2018).
- Internet 3: https://www.uradni-list.si/files/RS_-2006-036-01507-OBčP001-0000.PDF (15.06.2018)