

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-geologická fakulta

Institut hornického inženýrství

CBM – Těžba sorbovaného plynu z uhelných slojí

Coal bed methane – Exploration of sorbed gas from coal seams

bakalářská práce

Autor:

Libor Kůřil

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Zapletal, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut hornického inženýrství a bezpečnosti

Zadání bakalářské práce

Student: **Libor Kůřil**
Studijní program: B2111 Hornictví
Studijní obor: 2101R008 Hornické inženýrství
Téma: **CBM - Těžba sorbovaného plynu z uhelných slojí**
Coal bed methane - Exploration of sorbed gas from coal seams

Zásady pro vypracování:

Úvod

1. CBM - Princip těžby plynu z uhelných slojí
2. Technika a technologie těžby CBM
3. Stimulace uhelných slojí pro těžbu plynu
4. Ekonomické aspekty těžby plynu

Závěr

Rozsah práce: 25 – 30 stran textu, 3 – 5 příloh

Seznam doporučené odborné literatury:

Jones, A.H., G.J. Bell, and R.A. Schraufnagel: *A Review of the Physical and Mechanical Properties of Coal with Implications for Coal-Bed Methane Well Completion and Production*, SPE Reprint Series No. 35 Coalbed Methane, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas (1992)
Smith, D.M. and F.L. Williams: *A New Technique for Determining the Methane Content of Coal* Proceedings of the 16th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (1981)
Klempa, M., Bujok, P. et al.: *Technika a technologie hlubinného vrtání* [online] <<http://geologie.vsb.cz/TECHHLD/DOB/index.htm>>.
Zákon č. 44/1988 Sb., *O ochraně a využití nerostného bohatství* (Horní zákon) ve znění jeho novel.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Zapletal, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015

doc. Ing. Petr Žůrek, CSc.
vedoucí institutu



prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne: 30.4.2015

Libor Kůřil

Anotace:

Tato práce se zabývá těžbou zemního plynu z uhelných slojí (Coal Bed Methane). Popisuje principy získávání uhelného metanu, jimiž jsou hydraulické štěpení a kavitace, vazby plynu v uhelné sloji a použitou techniku a technologii pro těžbu této suroviny z nekonvenčního ložiska. V neposlední řadě se věnuje samotné stimulaci ložiska pro vydobytí této suroviny a zkoumá technicko-ekonomické aspekty těžby CBM a jejich použitelnost či vhodnost v určitých uhelných oblastech.

Klíčová slova: CBM, uhelná sloj, nekonvenční, stimulace

Summary:

This work is deals exploration of natural gas from coal seams (Coal bed methane). It describes the principles of obtaining coal bed methane, which are hydraulic fracturing and cavity, structure gas in coal seam and used technique and technology for extraction this raw materials from unconventional deposit. Finally, devoted itself to stimulation deposit, this raw material and examines the technical and economics aspects of CBM extraction and their applicability or suitability of some coal fields.

Key words: Coal bed methane, coal seam, unconventional, stimulation

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod | 1 |
| 1 CBM – Princip těžby plynu z uhelných slojí | 3 |
| 1.1 Hydraulické štěpení | 3 |
| 1.2 Kavitace | 4 |
| 2 Technika a technologie těžby plynu z uhelných slojí | 7 |
| 2.1 Užitá technologie pro těžbu plynu | 7 |
| 2.1.1 Uhelná sloj jako zásobník plynu..... | 7 |
| 2.1.2 Formy a vazby plynu..... | 9 |
| 2.1.3 Porézní systém uhlí a hornin | 9 |
| 2.1.4 Propustnost a pórovitost..... | 10 |
| 2.1.5 Plynopropustnost uhlí a filtrační vlastnosti hornin..... | 13 |
| 2.2 Příprava ložiska k těžbě | 14 |
| 2.2.1 Vrtání..... | 14 |
| 2.2.2 Metody pažení, cementace a perforace..... | 15 |
| 2.2.3 Minifrac..... | 18 |
| 2.3 Použitá technika pro těžbu CBM | 18 |
| 3 Stimulace uhelných slojí pro těžbu plynu | 20 |
| 3.1 Hydraulické štěpení | 20 |
| 3.1.1 Teorie vzniku trhlin | 20 |
| 3.1.2 Hlavní činitelé ovlivňující velikost štěpícího tlaku..... | 21 |
| 3.2 Štěpící a nosná kapalina..... | 22 |
| 3.2.1 Čistá a chemicky upravená voda..... | 23 |
| 3.2.2 Viskózní kapalina na bázi gelu | 23 |
| 3.2.3 Kapalný CO ₂ | 24 |
| 3.3 Propant..... | 24 |
| 3.4 Odeznívání tlaku..... | 25 |
| 3.5 Hodnocení hydraulického štěpení..... | 26 |
| 4 Ekonomické aspekty těžby plynu | 27 |
| 4.1 Náklady na realizaci a provoz..... | 27 |
| 4.2 Výnosy..... | 28 |
| 4.3 Ekonomická efektivnost | 28 |
| 4.4 Ekonomické limity těžby | 28 |
| 4.5 Porovnání těžby CBM v ČR a ve světě | 29 |
| 4.5.1 Pilotní průzkum proveden v části Hornoslezské pánve..... | 29 |
| 4.5.2 Situace ve světě | 29 |

| | |
|-------------------------|----|
| Závěr | 31 |
| Použitá literatura..... | 32 |
| Seznam obrázků..... | 33 |
| Seznam příloh..... | 34 |

Seznam použitých zkratk:

CBM – Coal bed methane (uhelný metan)

HSP – Hornoslezská pánev

ROP – Rate of penetration (rychlost, kterou dláto proniká do horniny)

UBD – Underbalanced drilling (metoda vrtání)

Úvod

Zemní plyn patří mezi základní energetické suroviny. Ze strategického hlediska je velmi důležitý jak pro světové zásoby, tak i pro domácí hospodářství státu, jelikož se jedná o vyčerpatelnou surovinu. Prioritou v této oblasti by tedy měl být v prvé řadě stálý průzkum pro lokaci nových ložisek a dále zajišťování potřebných technologií pro získávání této suroviny a jejich inovace. Tato práce se zabývá těžbou uhelného metanu (Coal Bed Methane - CBM), což je jedna z forem získávání zemního plynu. V dnešní době se těžba CBM stává velmi diskutovaným tématem. Rozvoj produkce této suroviny by mohl být klíčový pro jeho komerční využití, protože zajišťuje bohaté a čisté spalování tohoto fosilního paliva. Díky tomu by se také mohla zlepšit otázka ochrany životního prostředí, a to zejména v nejrizikovějších regionech, ve východní Evropě a Číně. Uhlý metan představuje nekonvenční ložisko plynu, a proto jeho získávání může být velmi obtížné. Jeho specifické vlastnosti a nízká propustnost uhelných slojí představují zatím největší komplikace, a to zejména z ekonomického hlediska. I přes to, že je v řadě zemí zásoba uhelného metanu vysoká, doposud se tyto překážky nepodařilo překonat. V současnosti probíhají zkušební programy přibližně v 15 zemích světa.

„Slojový nebo též uhelný metan vznikl během procesu přeměny rostlinného materiálu na uhlí. Původní bujná vegetace se po odumření hromadila v bažinách, kde probíhal proces tlení. Postupem času se přes zetlelou organickou hmotu ukládaly různé sedimenty. Se zvětšováním mocnosti sedimentů překrývajících organickou hmotu se zvyšovala i její teplota. Tento proces vyvolal v organické hmotě fyzikální a chemické změny, které pak postupně vedly ke vzniku uhelné hmoty, metanu, oxidu uhličitého, dusíku a vody. Jak se zvyšovala teplota a tlak, narůstal i obsah uhlíku v uhlí neboli stupeň prouhelnění. Obecně platí, že čím je stupeň prouhelnění uhelné sloje vyšší, tím vyšší je i množství vzniklého metanu. Uhlé sloje obvykle sorbovaný metan neuvolňují do atmosféry, pokud ovšem nejsou navrtány, vystaveny působení eroze či narušeny těžbou.“ [1]

Díky činnosti člověka se uhelné doly stávají jedním z největších producentů emisí metanu. V celosvětovém měřítku se metan na tvorbě emisí podílí 8 až 10%. Vzhledem k tomu, že silně absorbuje infračervené záření, patří mezi významné skleníkové plyny, které zvyšují teplotu zemské atmosféry. Získávání a využívání uhelného metanu přináší zejména:

- příznivý dopad na životní prostředí a potažmo i na snižování emisí skleníkových plyn,
- energetickou nezávislost státu,
- vyšší bezpečnost v dolech,
- vyšší produktivitu těžby,
- vyšší kvalitu ovzduší.

Z výše zmíněných důvodů, považuji za nezbytné se touto problematikou zabývat. Pouze pokud si definujeme problémy v dané oblasti, můžeme hledat možná řešení pro jejich eliminaci a v konečném důsledku přispět k rozvoji těžby uhelného metanu a také k ekonomicky a ekologicky šetrnému vydobytí této suroviny.

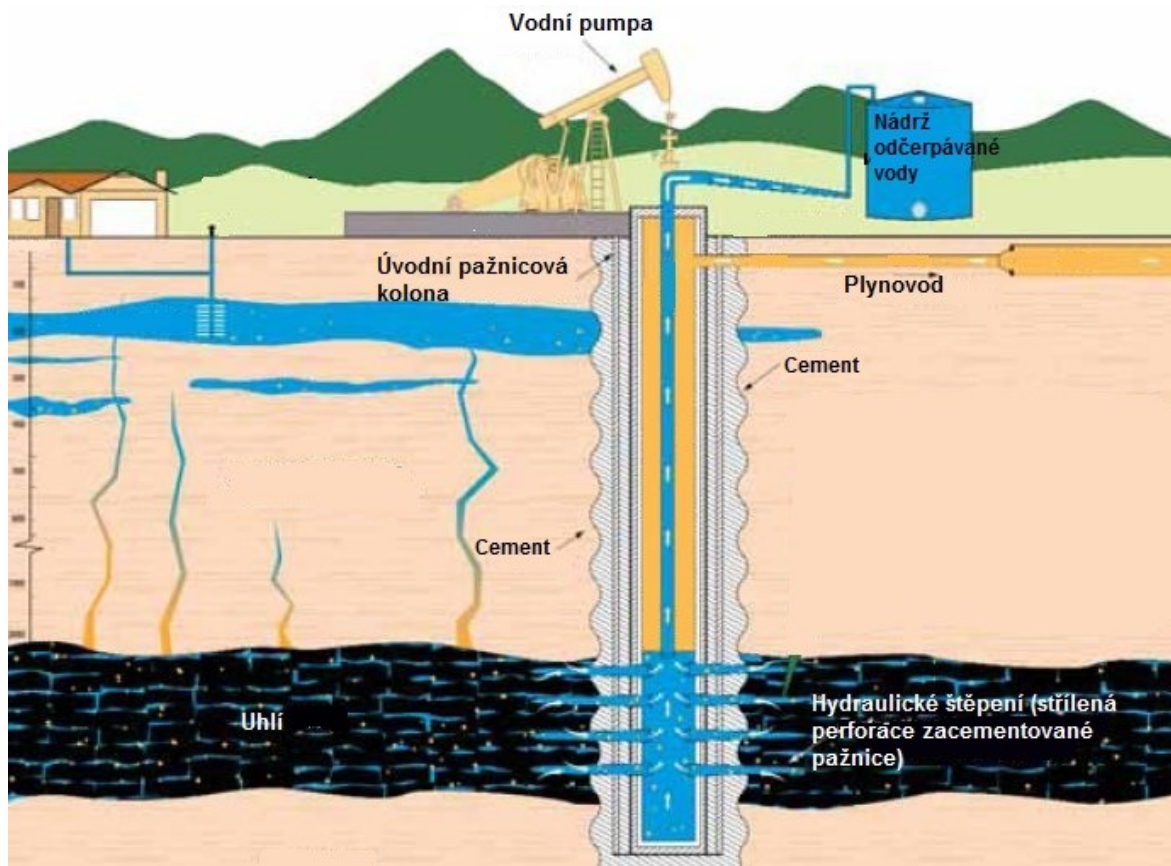
1 CBM – Princip těžby plynu z uhelných slojí

1.1 Hydraulické štěpení

Hydraulické štěpení (z angl. hydraulic fracturing) je technika, která se používá při získávání ropy a zemního plynu prostřednictvím rozrušení uhlé vrstvy. Štěpením a vytvářením puklin v uhelných oblastech se zintenzivňuje těžba uhlé metanu. Následně vzniklý systém puklin napomáhá odčerpání spodní vody z dobývaného ložiska. V důsledku toho se v daném místě sníží tlak, čímž dojde k vytvoření cest, aby se plyn mohl snadněji uvolňovat z uhlí do vytvořené sítě puklin, a tím zlepšit komunikaci mezi vrtem a štěpeným horizontem. K tomuto se používá nosná kapalina, která obsahuje propant. Propant se vstříkují pod vysokým tlakem do vrtu, a to cíleně do uhlé sloje a podloží [5].

Štěpící kapalina se vstříkuje do podloží při vysoké rychlosti a tlaku. Cílené působení těchto vlivů v injektovaném vrtu má za následek rozrušení horniny v uhlé oblasti. Takto funguje proces vytváření puklin při hydraulickém štěpení (někdy i uvnitř jiné geologické vrstvy, nebo kolem cílené uhlé oblasti). Tento proces může v některých případech vytvořit i nové pukliny, ale nejčastěji dojde ke zvětšení rozsahu již existujících. Zvyšuje se spojení vlastní sítě puklin v okolí uhlé sloje. Nosná kapalina pumpovaná do podloží pod vysokým tlakem transportuje a umísťuje propant. Nejběžnější podobou propantu je jemný písek. Tyto drobné částice zajišťují, že pukliny zůstávají otevřené, a to i následně potom, co se štěpící tlak sníží. Tento postup usnadňuje tok a potažmo i samotnou těžbu metanu z uhlé sloje [5].

Před tím než začne samotná produkce CBM, je nutné odčerpání spodní vody a pracovní kapaliny ze sítě puklin a kolem uhlé oblasti, tak aby se snížil hydrostatický tlak v podloží. Kapaliny jsou pumpovány, dokud tlak neklesne na bod, ve kterém se začne metan desorbovat z uhlí. Zpočátku je podíl čerpané vody vysoký, následně však klesá se zvýšenou produkcí metanu. Po tomto procesu může začít samotná těžba zemní plynu [5].



Obr. 1 Hydraulické štěpení metanu z povrchu svislým vrtem (zdroj: <http://cdn.frack-off.org.uk>, upraveno)

1.2 Kavítace

Kavítace je metoda, při které je uměle tlakovým rázem vytvořena kaverna (dutina) v uhelné sloji. Metoda spočívá ve zvýšení propustnosti mateční horniny vytvořením kliváže a kolmé smykové zóny v dané oblasti [2].

Proces kavítace začíná vrtem, který se zapaží nad horní hranicí uhelné sloje. Opakovaným působením tlaku se zabraňuje zavalení a porušení vytvářené dutiny a její následné rozpínání. Odčerpání kapaliny způsobí velký pokles hydrostatického tlaku ve vrtu, to má za následek přerozdělení napětí a vznik uhelných zlomů [2].

Pro těžbu CBM bylo popsáno 5 níže uvedených typů kavítace:

- vrtaná,
- přírodní,
- injektovaná,

- mechanická,
- tryskaná [2].

Každý z těchto způsobů se obvykle provádí opakovaně podle určitého typu uhlé oblasti, dokud se nezíská přijatelná propustnost. Pro změření rychlosti průtoku se používá různých průtokoměrů a na základě naměřeného údaje se rozhodne, zda je nutné operaci opakovat [2].

Jedním ze způsobů vytvoření kavitace je metoda Underbalanced drilling (UBD), která spočívá v tom, že přizpůsobujeme tlak uvnitř vrtu hodnotám okolní horniny použitím vrtného výplachu. Tato metoda se ovšem využívá i při vrtání klasických konvenčních ložisek ropy a zemního plynu. Vzniklý přítok kapaliny z rezervoáru může být kontrolován po celou dobu vrtání, díky tomu lze eliminovat zničení okolí vrtu. To má za následek zvýšení produkce a výtěžnosti uhlé metanu. Metoda UBD také snižuje některé problémy při vrtání jako je např. ztráta výplachu či zaseknutí vrtného nářadí, k čemuž obvykle dochází z důvodů vysoké kontaktní síly způsobené nízkým tlakem okolní horniny nebo naopak vysokým tlakem ve vrtu a nízkou rychlostí vrtání (ROP) [2].

Přírodní kavitace je založená na vyvrtání uhlé sloje prostřednictvím stlačeného vzduchu či plynu. Poté se vrtné nářadí vytáhne a vrt se uzavře. Tlak je vytvářen přirozeně, dokud není dosaženo potřebného měrného tlaku. Celý proces probíhá při stálém měření a zaznamenávání jednotlivých nárůstů měrného tlaku prostřednictvím křivek. Po dosažení cílové hodnoty tlaku je vrt následně otevřen pomocí hydraulicky ovládaných ventilů na povrchu. Rychlé snížení tlaku je doprovázeno vysokým nárůstem vody, plynu a uhlé suti, které je produkováno vrtem a dále je odvedeno na povrch do tzv. „fléry“ (zařízení na povrchu, které odvádí přebytečný plyn). Sonda je čištěna a poté kontrolována na obsah uhlé suti, operace je opakována, dokud není dosaženo odpovídajících výsledků. Poté je vrtána další uhlé zóna a celý proces se opakuje [2].

Vstříkovaná neboli injektovaná kavitace je podobná již výše uvedené přírodní kavitaci, s výjimkou toho, že vrt je pod tlakem z povrchu a potom naroste. Tento proces se obvykle opakuje mnohokrát, často po dobu několika dnů nebo týdnů v závislosti na výsledcích každého cyklu. Může být aplikováno několik různých tekutin:

- plyn,

- vzduch,
- voda,
- oxid uhličitý CO₂,
- uhelné rozpouštědlo [2].

Ty jsou čerpány přes vrtní kolonu do okolní horniny, dokud není dosaženo předem stanoveného tlaku, který může dosahovat i více než 10,5 MPa. Tento vyvolaný tlak se uvolní na povrch do hydraulicky ovládaných ventilů, což má za následek pronikání vody, plynu a uhelné suti na povrch, při současné cirkulaci vrtu přes mezikruží s plynem nebo vzduchem. Je velmi důležité, aby byl vrt vyvrtán co nejlépe a nejčistěji, aby se využil maximální produkční potenciál vrtu. Úskalím této metody je vznik velkých uhelných kusů, které nelze z vytvořené dutiny dostat na povrch z důvodu malého průměru vrtu [2].

Mechanická kavitace spočívá ve vytvoření vrtu do stanovené hloubky s použitím tzv. přibíráku (rozšiřovače), který se používá pro většinu vrtů. Ten slouží k rozšíření průměru vrtu a zkvalitnění jeho stěn, tím zabraňuje zničení okolní horniny. Současně snižuje nadložní napětí, které by mohlo způsobit porušení uhelné formace a rozrušení směrem do vrtu. V mnohých případech mechanická kavitace předchází výše zmíněným metodám [2].

Tryskaná kavitace je založená na využití hydraulického tlaku k řízení proudu plynu a vody rovnou směrem k uhelné stěně. Tento postup může být aplikován k usnadnění tvorby dutiny v případě, že jiné metody kavitace byly neúspěšné [2].

2 Technika a technologie těžby plynu z uhelných slojí

2.1 Užitá technologie pro těžbu plynu

2.1.1 Uhelná sloj jako zásobník plynu

Celkové množství vytvořeného metanu v uhelné sloji se odvíjí od celkové geologické historie ložiska a procesu prouhelňování. Každý zásobník plynu má charakteristické vlastnosti jako je např. nasycení vodou, frakční propustnost a tlak. Naproti tomu sorpční rovnováha, propustnost či mikroporézní struktury jsou pro jednotlivá uhelná ložiska specifická [4].

„Uhelný metan je produkt procesu prouhelňování. Nedostává se tedy do uhelné hmoty zvenčí, ale z vlastního procesu prouhelňování. Plyn je vázán uvnitř uhelných slojí jedním z následujících způsobů:

- jako adsorbované nebo absorbované molekuly v mikropórech,*
- jako volný plyn existující mezi trhlinami či póry,*
- jako rozpuštěný plyn ve vodě i v uhelné hmotě [4].“*

Sorpce představuje nejběžnější způsob zadržení, proto také adsorbované nebo absorbované molekuly v mikropórech představují až 90% celkového zadrženého množství. Při procesu prouhelňování připadá na každou tunu uhlí zhruba 90 m³ až 150 m³ metanu. Obvykle je ovšem vázané množství plynu mnohem nižší, a to pouze 2,5 až 40 m³ na tunu uhlí. Celkové množství vytvořeného plynu je především funkcí kvality uhlí, hloubky uložení a hydrogeologie okolního prostředí [4].

Slojová ložiska jsou charakteristická svou těsností s pórovitostí obvykle nižší než 8% a propustností pod 1mD (miliDarcy). Tok plynu je ovlivněn přirozenými zlomy (tzv. „stříhy“) a difuzí uvnitř uhelné hmoty. Parametry určující kvalitu těchto zásobníků jsou hlavně umístění uhelné sloje a její struktura. Ty obvykle dobře reagují na umělou stimulaci. Při tomto procesu může docházet k nežádoucím projevům jako je migrace drobných uhelných kalů [4].

Specifické geologické podmínky k vytvoření uhelného ložiska produkující plyn, nebyly doposud zcela objasněny. Z nashromážděných dat, které máme v současnosti k dispozici, je zřejmé, že v jedné oblasti i v jedné uhelné sloji mohou být vytvořeny zcela odlišné podmínky nasycení vodou i plynem. Mnohé uhelné sloje jsou nasyceny vodou, proto je zde nutná znalost lokální hydrogeologie. Tlak vody zadržuje plyn v mikroporézním systému a tím se brání desorpci, to v důsledku znamená, že voda musí být vytěžena. Čím déle proces odčerpání vody trvá, tím více je ovlivňována okolí a zvětšuje oblast desorpce metanu. Odvodnění snižuje hydrostatický tlak, který udržuje plyn v adsorbovaném stavu. S postupným odvodněním ložiska stoupá propustnost a metan začíná prostupovat k vrtu [4].

„Desorpce a tok plynu procházejí třemi hlavními stádii:

- 1. stadium – jednofázový tok, kdy je produkována pouze voda, pokles tlaku ve sloji je malý;*
- 2. stadium – jednofázový tok, kdy je přítomen plyn i voda, avšak pouze vodní fáze je pohyblivá. V tomto stádiu se projevuje značný pokles tlaku ve sloji, neboť začala desorbce metanu. Tvoří se izolované bubliny plynu, které snižují relativní propustnost vody, protože však nejsou spojené, nedochází k toku plynu;*
- 3. stadium – dvoufázový tok, kdy je přítomen plyn i voda a obě fáze jsou mobilní. S pokračujícím poklesem tlaku a desorbci roste uvolňování plynu do stavu, kdy se jednotlivé bubliny spojují a tvoří souvislý proud plynu k vrtu [4].“*

V momentě, kdy nastane dvoufázový tok, migraci plynu řídí dva mechanismy. První je tok systémem pórů a trhlinami, druhý je tok vyvolaný difuzí mikroskopických pórů v uhlí. Pro dlouhodobou desorpci je důležitější druhý mechanismus, neboť většina adsorbovaného plynu existuje uvnitř struktur se systémem mikropórů. Rychlejší difuze nastává u mělce uložených ložisek [4].

Pro počátek 3. stádia je charakteristické, že desorbovaný plyn prochází pórovým systémem směrem k oblasti s nižším tlakem. Tok plynu způsobuje částečnou erozi uhelné hmoty a zlepšuje komunikaci. To se projeví hlavně zvýšeným výskytem jemných částic uhlí (prachu) [4].

Samotný tlakový spád uvnitř sloje je přímo závislá na difuzi a desorpci plynu. Jak postupuje odvodňování a rozšiřování celkové oblasti ovlivněné třetím stadiem tak se také souběžně zvětšuje postupující tok plynu do systému trhlin, který je přímo způsobený difuzí [4].

Charakter uhelné sloje jako zásobníku plynu je dán jejím strukturálním charakterem, hlavně se jedná o malou poróznost, směrovou propustnost, nízkou efektivnost propustnosti základní hmoty a vysokým neredukovatelným nasycením vodou [4].

2.1.2 Formy a vazby plynu

Jsou uvažovány čtyři parciální formy vazby plynu:

- sorpce plynu v mikropórech s poloměry $r < 1,6$ nm probíhá v důsledku zesíleného adsorpčního potenciálu protilehlých stěn procesem objemového zaplňování,
- sorpce plynu v mezo- a makropórech s poloměry $1,6 \text{ nm} < r < 7500 \text{ nm}$ se uskutečňuje na jejich povrchu ukládáním do molekul vrstev,
- volný plyn je integrální součet obsahu plynu ve volné části mezo- a makropórů a jeho chování může být při tlaku P (MPa) popsáno stavovou rovnicí pro ideální plyn,
- plyn rozpuštěný v pórové vodě [4].

2.1.3 Porézní systém uhlí a hornin

Existuje několik velikostí, podle kterých lze rozdělit porézní systém uhlí a hornin a to na mikropóry s poloměrem menším než 2 nm, mezopóry s poloměrem od 2 do 30 nm, makropóry s poloměrem od 30 do 7500 nm (7,5 μm) a hrubé póry s poloměry nad 7500 nm [4].

Jelikož je uhlí vyloženě mikroporézní látka, je určující celkový podíl plynu vázaného právě v mikropórech. Protože jsou mikropóry molekulárních rozměrů a vyznačují se malým objemem a značným povrchem, je plyn vázán sorpčně a již při malých tlacích je vyplněn v silně zhuštěné formě. V důsledku zesíleného adsorpčního potenciálu procesem objemového zaplňování probíhá sorpce [4].

V uhlí převládá objem hlavně mezo-, makro- a hrubých pórů ve kterých je plyn vázán částečně sorpčně, ale s tím rozdílem, že se zde sorpce uskutečňuje ukládáním molekul do vrstev. Z důvodů nadkritických teplot a malého povrchu těchto pórů představuje plyn v tomto stavu jen velmi malý podíl z celkového množství. Plyn zde vystupuje hlavně ve formě volně pohyblivého, protože je jeho objem shodný s objemem těchto pórů. Rozhodující hlavně u hornin [4].

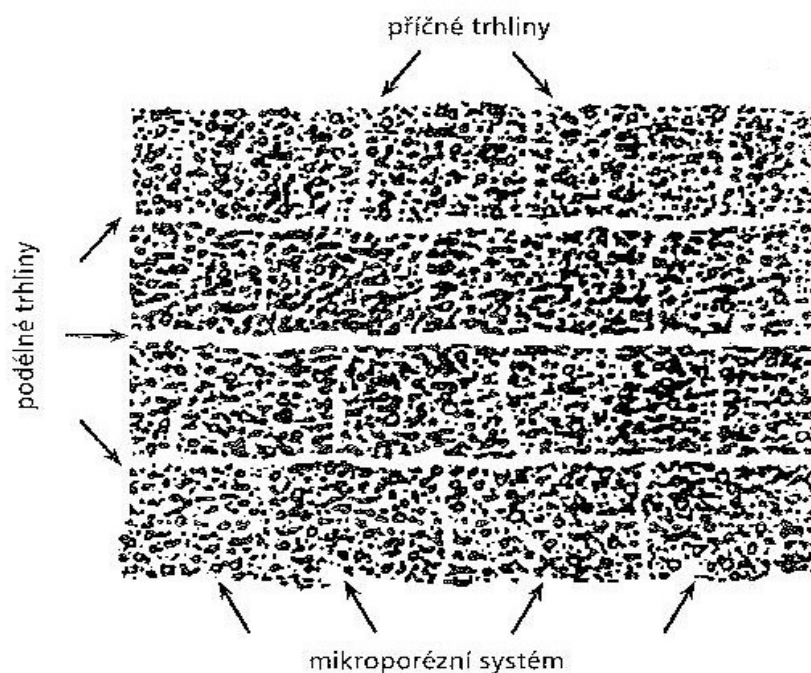
Protože je vždy přítomna voda, nebo vodní pára je objem všech pórů částečně zaplněn vodou a povrch uhelné hmoty pokryt vrstvou kondenzované vodní páry. U mikroporézního systému jde patrně pouze o produkt metamorfózy, ale u mezo-, makro- a hrubých pórů o vodu prostoupenou [4].

Zbytková plynosnost

Vzhledem k tomu, že jsou mikropóry minimálních rozměrů, nekomunikují s okolím uhlím právě jednoduše. Část jich je uzavřena v téměř nepropustném labyrintu kapilárních dutin. Vůči těmto okolnostem se určuje povaha zadržených plynů v uhlí, proto se celkové množství označuje jako zbytková plynosnost. Jedná se o plyny, které se po vytěžení uhlí téměř nemohlo mísit se vzduchem, a jsou vzniklé procesem prouhelňování [4].

2.1.4 Propustnost a pórovitost

Propustnost a pórovitost uhelné hmoty jsou vzájemně úzce spjaté. U uhlí existuje dvojitý systém trhlín (obr. 1). Základní hmota s vnitřní mikropórovitou je rozdělena hustým systémem přirozených trhlín, které stanoví propustnost vrstvy. Podélné trhlíny (hlavní kliváž) jsou průběžné a velmi dlouhé, i stovky metrů. Příčné trhlíny (vedlejší kliváž) nevytvářejí tak dlouhé trhlíny jako podélné, jejich délka je obvykle mezi dvěma sousedními podélnými trhlínami. A zpravidla jsou orientovány pod velkými úhly vůči podélným trhlínami. Propustnost a pórovitost klasických nestimulovaných uhelných slojí se v porovnání s klasickým plynovým ložiskem liší. Základní hmota uhlí má obvykle účinnou pórovitost pod 10% a propustnost pod 1mD. Za napájecí trhlíny jsou považovány ty, které vedou do podélných trhlín [4].

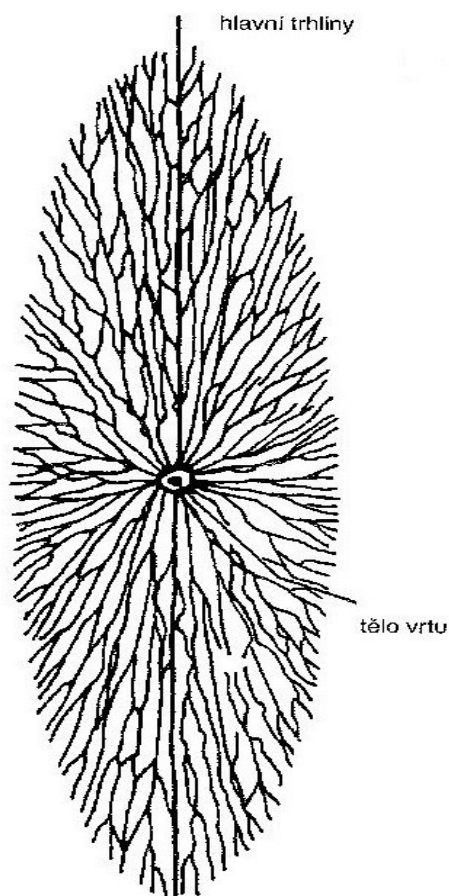


Obr. 2 Systém trhlin uhelné sloje (zdroj: Ďurica et al. 2006)

Větší délka podélných trhlin má za následek daleko vyšší směrovou propustnost a to až o několik řádů, než v porovnání propustnosti trhlin příčných. Díky tomu se nám vyskytuje několik poznatků, které jsou již známé a souvisejí s těžbou metanu. A to že odvrtné vrty odvádějí plyn z eliptických oblastí a ne kruhových (obr. 2). Může také dojít k zavalení vrtu (vydrolení), které je obvyklé pro hlouběji uložená ložiska s dlouhou osou podélných trhlin. Zjištění orientace trhlin je velmi důležité, proto se provádí co nejpřesnější určení, které je nezbytné pro:

- odhad produktivity vrtu,
- určení rozmístění vrtů,
- předpověď orientace trhlin,
- maximalizaci těžby [4].

Směr a sklon trhlin může být také stanoven méně přesnou analýzou pomocí dat z geologického profilu ložiska, nebo z orientace jádra.



Obr. 3 Vznik trhlín v uhelné sloji (zdroj: Ďurica et al. 2006)

Pro desorpci uhelného metanu a jeho směru propustnosti je nezbytné vědět, že propustnost uhlí se zvyšuje s rostoucím namáháním při štěpení. Několik faktorů nám však může snižovat propustnost a to možná druhotná mineralizace (ucpávání) trhliny a napětí v ložisku. Snížením tlaku ložiska pomocí odvodnění, způsobí výrazný pokles stlačitelnosti a porózy. Odvodnění je nutno provést z důvodu velkého nasycení vodou, které zvyšuje napětí v nadloží. Z tohoto důvodu se dá také očekávat velmi velké snížení propustnosti, která může výrazně ovlivnit celkovou úspěšnost těžby. Největší propustnost uhlí je tedy očekávána v mělce uložených slojích s vyšší porózitou ale nízkou stlačitelností a malou nasyceností vodí. Pravděpodobně nejvyšší zádržnou kapacitu má uhlí s relativně nízkým obsahem tohoto plynu [4].

Hodnoty kapilárního tlaku a relativní propustnost

Kapilární tlak je důležitá veličina při odhadování množství zadržované vody v uhelných slojích, tj. nasycení vodou. Nasycení vodou nám naopak poskytuje údaje o maximální propustnosti plynu, které může být dosaženo [4].

Pro pochopení a správné předpovězení toho, jak se bude zásobník vyvíjet s časem, jsou důležité údaje o relativní propustnosti. Relativní propustnost označuje propustnost pro určitou tekutinu při společném proudění směsi o několika fázích, v našem případě se jedná o vodu a plyn. Na základě těchto poznatků se dá předurčit, jestli je pro získání plynu nutná umělá stimulace, nebo je-li ložisko schopno komunikovat samo bez nutné stimulace [4].

2.1.5 Plynopropustnost uhlí a filtrační vlastnosti hornin

Plynopropustnost můžeme charakterizovat koeficientem propustnosti. Tok tekutiny o dané viskozitě nekonsolidovanými ložisky u kterých se neuvažuje ovlivnění toku póry, lze charakterizovat pomocí Darcyho rovnice, jež je závislost lineární rychlosti toku tekutiny a tlakovém spádu. Konstantou úměrnosti je koeficient permeability. Pro měření propustnosti se užívá Darcyho rovnice upravená na stlačitelnost plynu. Koeficient se vyjadřuje v jednotkách Darcy D nebo v m^2 a platí $1 D = 10^{-11} m^2$. Měření se provádí tak, že se na vzorku měří objemová rychlost tekutiny při konstantním tlakovém spádu [4].

$$K_p = \frac{Q \cdot \mu \cdot \Delta L}{S \cdot \Delta p} \quad (m^2)$$

kde,

Q – objemový průtok kapaliny (m^3/s)

μ - dynamická viskozita kapaliny ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)

ΔL – délka dráhy filtrace (m)

S – průřez kolektoru, kolmý na směr proudění (m^2)

Δp – rozdíl hydrostatických tlaků (Pa) [7]

Komunikační soustavu mezi prostory, ve kterých je plyn sorbován ovlivňují trhliny a mikroporušení. Tyto vlastnosti jsou určující pro časový průběh uvolňování plynu a také pro plynopropustnost. Vlastnosti komunikační soustavy jsou ve vztahu k měřitelným chemickým a fyzikálním vlastnostem uhelného vzorku, jako je stupeň prouhelnění,

marcerálové složení, objem pórů a jejich distribuce. Plynopropustnost je hlavním faktorem, který ovlivňuje proudění plynu a tím i jeho únik. Závisí na porézní struktuře uhlím, která se zmenšuje s tlakem v horninovém masivu. Proto i propustnost uhlí je na tomto tlaku závislá stejně jako pórovitost, která se však zmenšuje značně pomaleji. Převážná část pórovitosti je funkcí objemu makro- a mezopórů, je zřejmé, že mikrotrhliny, které leží, mimo oblast těchto pórů hrají také hlavní roli. Obecně řečeno existuje přímá úměra mezi pórovitostí a plynopropustností [4].

Rozhodující vlastnosti podmiňující propustnost jsou:

- primární tektonické porušení,
- kotrakční trhliny ve vitrinitu vzniklých během procesu prouhelňování,
- pórový prostor v horninách,
- existence zvětralinového pláště na povrchu [4].

Další okolnost, která může negativně ovlivňovat složení plynné fáze ve sloji, je pronikání plynu z kolektorové horniny do sloje. Problém tkví v různé plynopropustnosti hornin a uhlí a v afinitě jednotlivých plynů k uhelné hmotě a tím možnost vytěsňování jednoho plynu druhým. Velkou roli zde hraje rozdílná textura uhlí a okolní horniny. Omezujícím faktorem může být také velmi malá propustnost obou prostředí [4].

2.2 Příprava ložiska k těžbě

Projekt těžby CBM lze rozdělit do několika technologických etap, kterými jsou vrtání, pažení vrtu a jeho cementace, perforace, minifrac, stimulace, odeznívání tlaků (čerpání vody a plynu).

2.2.1 Vrtání

Vrtání je realizováno pomocí rotarových vrtných souprav, které jsou používány i u klasických ropných a plynových ložisek. U uhelných slojí je však potřeba vzít v úvahu faktory jako je možné porušení uhelné oblasti, ztráta výplachu z důvodů vysoké propustnosti, možný výskyt zvodnělých kolektorů. Je tedy nutné si před zahájením této činnosti uvědomit, jaká má být konečná hloubka vrtu, druh uhelné pánve, a tím i samotného

nadloží, které bude vrtáno. Dále je nutné zvážit, jaké budou požadavky na vrtný výplach, plán pažení, výskyt možných problémů při vrtání, způsob pažení vrtu a návrh použité stimulace [8].

Před samotnými vrtnými pracemi musí být proveden geologický průzkum, který zjistí a určí nadložní podmínky. Při návrhu použití vrtného náradí a celkové délky kolony pažnic, které jsou do vrtu zapouštěny, je důležité vědět, jak bude konečný vrt hluboký. Hloubku vrtání ovlivňuje několik faktorů. Těmi hlavními jsou štěpená oblast uhelné sloje a přilehlého okolí a vznik možných problémů při vrtání [8].

Chceme-li určit správné velikosti průměrů vrtu, je důležité vzít v potaz několik faktorů:

- očekávaná produkce vody a plynu,
- rozměr použitých stupaček,
- metoda zapažení,
- metoda stimulace,
- druh použitého vrtného výplachu,
- budoucí očekávané opravy [8].

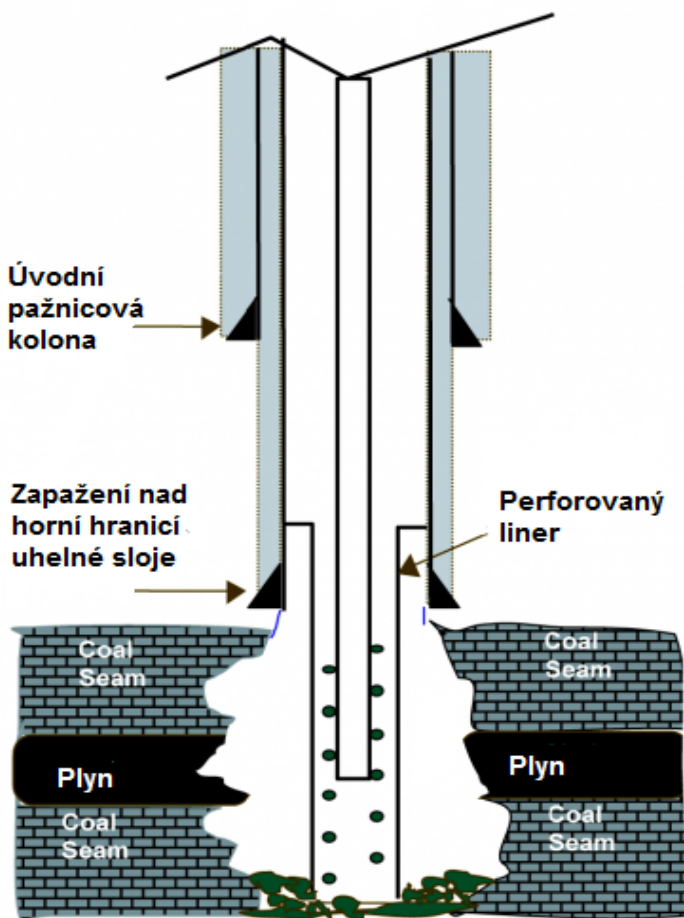
2.2.2 Metody pažení, cementace a perforace

Výběr vhodného pažení by měl vycházet z použité metody stimulace. Z praktických zkušeností se jako nejvýhodnější jeví systém pažnicových kolon použitých při těžbě zemního plynu. Důležité je rovněž zohlednit typ čerpací techniky. Čerpadlo, kromě efektivního odstranění vody z vrtu, musí rozeznat účinky uhelného prachu a štěpeného abrazivního materiálu vzniklého rozpadem dříve soudržné horniny, který může migrovat zpět do vrtu. Stupačky vrtu musí být navrženy tak, aby maximalizovali včasné vyzvedání vody z vrtu a napomohly tak odvodnění uhlí. Chceme-li určit správný typ použité metody pažení, měla by být provedena analýza potenciačního rezervoáru, který chceme těžit [6],[7].

Zapažení nad horní hranicí uhelné sloje – Openhole

Metoda Openhole je zapažení pouze nad horní hranicí uhelné sloje, kdy samotná uhelná sloj zůstává nezapažená. Vrt je vyvrtán na dno uhelné sloje, nebo pod její úroveň. Metoda je efektivní v pevných formacích, kde nehrozí zavelení vrtu tím, že se z něj odčerpá kapalina a sníží se hydrostatický tlak, tím dojde k přerozdělení napětí v uhelné hmotě. To má za následek porušení uhlí a vznik mikrotrhlin. Uhelná hmota má tendenci postupovat směrem k vrtu. V závislosti na tom se zvětšuje propustnost a okolní prostor. Pro odstranění nežádoucího nahromaděného uhlí a vody je nutné vrt proplachovat nebo odčerpávat [6],[7].

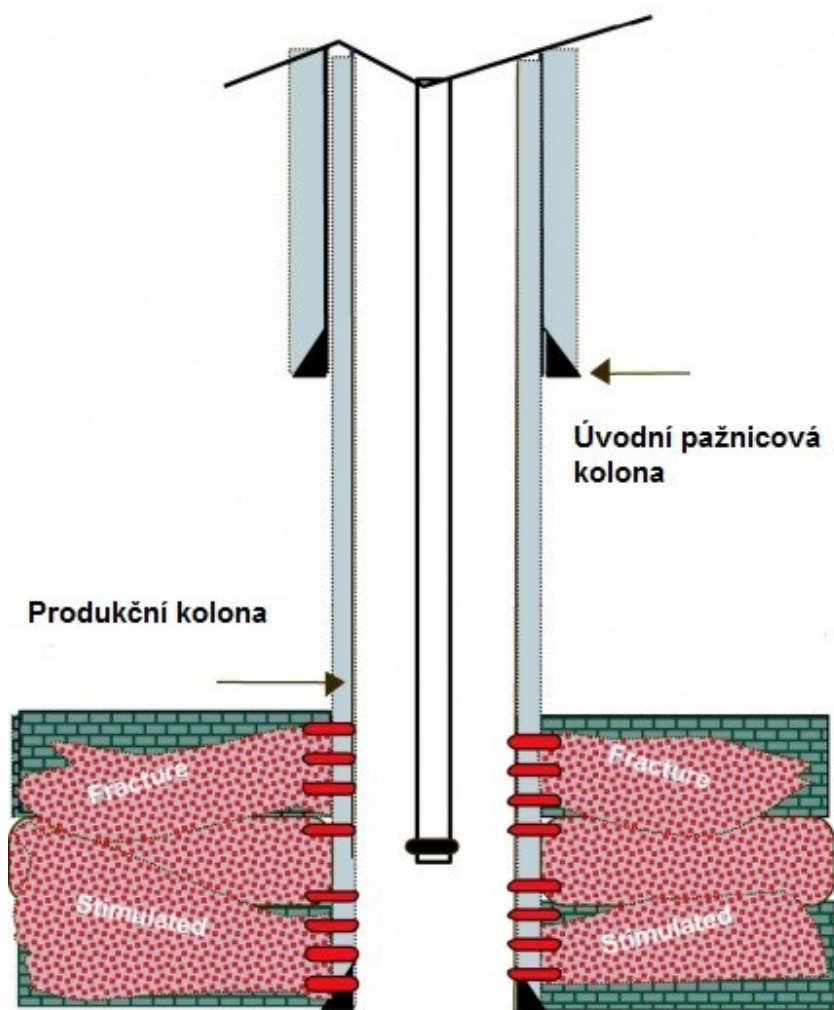
Cementaci je možno provádět vícestupňově, oknem s použitím cementační objímky a zapažnicového pakru. Zapažnicový pakr má ochrannou funkci před hrozbou kolmatace uhelné sloje. Vzhledem k tomu, že uhelná sloj zůstává po zapažení otevřená, používá se perforovaný liner (kolona pažnic jdoucích z hloubky, která je usazená do předchozí kolony pažnic) [6],[7].



Obr. 4 Zapažení nad horní hranicí uhelné sloje (zdroj: <http://petrowiki.org>, upraveno)

Přepažení uhelné sloje pažnicovou kolonou – Cased hole

Metoda Cased hole je pro CBM nepoužívanější. Je využíván zejména se u středně až nízko propustných uhelných slojí. Tato metoda poskytuje nejlepší kontrolu integrity uhlí a stimulaci jednotlivých uhelných ložisek, proto může být každá uhelná sloj provozována samostatně a současně technické operace ve vrtu jsou méně náročné. Ke komunikace mezi vrtem a uhelnou slojí se používá střílená perforace nebo hydroperforace. Obě tyto metody perforace zajišťují dobré výsledky. Zapažení vrtu v místě štěpeného intervalu je většinou nezbytné, protože stabilita stěn uhelné sloje nebývá příliš vysoká. Cementace je prováděna patou vrtu [6],[7].



Obr. 5 Přepažení uhelné sloje pažnicovou kolonou (zdroj: <http://petrowiki.org>, upraveno)

2.2.3 Minifrac

Minifrac neboli miništěpící zkouška se provádí před samotnou stimulací uhelného ložiska. Tato zkouška ověřuje základní hydrodynamické a mechanické vlastnosti sloje a testuje připravené metody stimulace. Provádí se v jak nezapaženém, tak i zapaženém vrtu. Provedená zkouška zjišťuje štěpný gradient, tzn. použití vytvořené modelové situace, kterou poté porovnáme se skutečnými naměřenými údaji. Štěpný gradient je stanoven analýzou poklesu tlaku po uzavření ventilu na ústí vrtu. Tahle oblast se také běžně nazývá štěp uzavřený tlakem. Je to tvorba napětí, které hraje důležitou roli při určování štěpící geometrie a jímavosti. I přes vysokou finanční náročnost se nedoporučuje vynechání této zkoušky [4],[6].

2.3 Použitá technika pro těžbu CBM

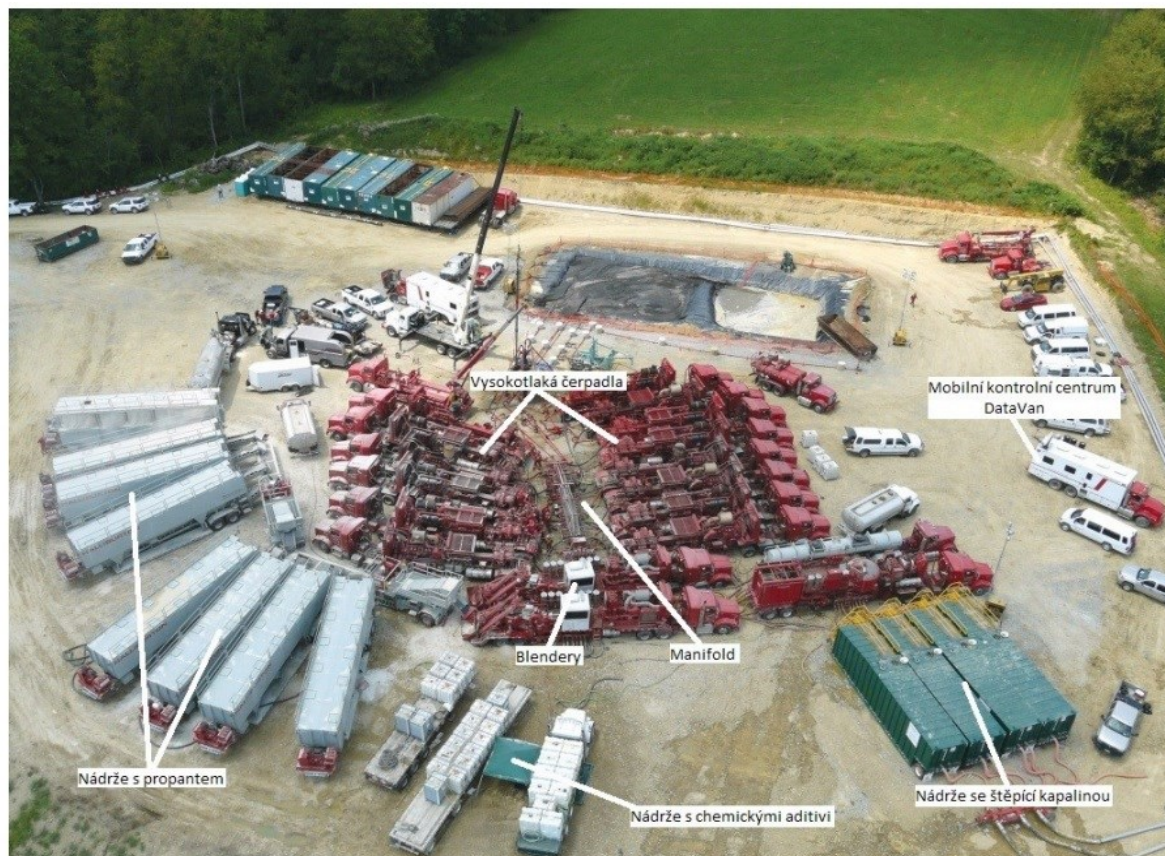
Pro vytvoření štěpného intervalu uhelné sloje pomocí hydraulického štěpení se využívá řada specializovaných zařízení. Jedná se hlavně o skladovací nádrže pro použitou štěpící kapalinu, zařízení pro transport propantu, blendery, vysokotlaká čerpadla a další technická zařízení jako připojovací ventily a manifoldy. Průběh štěpicích prací je nutné monitorovat a zaznamenávat jednotlivé údaje. Jedná se hlavně o stav zásob kapalin ve skladovacích zařízeních, rychlost čerpání, tlak ve vrtu, koncentrace nosné kapaliny obsahující propant a obsah chemických látek [9].

Blender

Blender je zařízení používané k mísení použité kapaliny a propantu. Smísením nám vznikne kapalina označovaná jako nosná, která jde dále do manifoldu [9].

Manifold

Manifold je soustava potrubí a ventilů které slouží k rozdělení hlavního proudu na několik částí. Jsou na něj napojeny všechny výstupy z čerpadel a blenderů [9].



Obr. 6 Schéma použitého zařízení při hydraulickém štěpení (zdroj: Sobotka, J. (2012) *Hydraulické štěpení*, Bakalářská práce)

3 Stimulace uhelných slojí pro těžbu plynu

Způsob jakým bude štěpený interval otevřen, záleží především na navržené metodě stimulace uhelné sloje. Z praxe jsou známy dvě základní metody stimulace a to hydraulické štěpení a Kavitace. Při použití Kavitace, kdy je uměle vytvořená kaverna (dutina) tlakovým rázem v uhelné sloji se bezvýhradně používá metoda zapažení nad horní hranicí uhelné sloje. Avšak nejrozšířenější a nejúčinnější metodou pro stimulaci je hydraulické štěpení [4],[7].

3.1 Hydraulické štěpení

Hlavní podstatou hydraulického štěpení je tlakové rozrušení vrstvy uhelného ložiska a tím zlepšení komunikace a zvýšení propustnosti mezi slojí a vrtem. Princip této spočívá v zatlačení štěpící kapaliny do uhelné sloje, která způsobí naštěpení sloje a umožní rozšíření vzniklé pukliny. Do nosné kapaliny se přidává propant. Ten se zatlačí do vzniklé pukliny a postupně ji vyplní, tím se zabrání jejímu uzavření. Základní faktory, které ovlivňují provedení hydraulického štěpení, jsou:

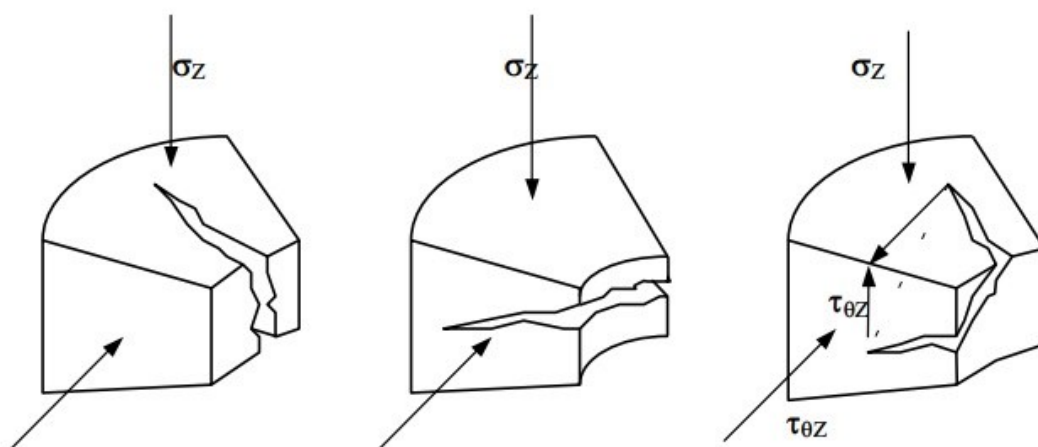
- hloubka a mocnost uložení sloje, fyzikálně mechanické vlastnosti uhelné sloje a jejího okolí, hydrodynamické parametry, hydrogeologické podmínky,
- výběr vhodné štěpící a nosné kapaliny,
- výběr vhodného typu propantu,
- technické vstrojení sondy,
- technické možnosti štěpící techniky [7].

3.1.1 Teorie vzniku trhlin

„Existují různé teorie vzniku trhlin v pórovitém horninovém tělese. Velmi rozšířená teorie penetračních (pronikajících) a nepenetračních (nepronikajících) kapalin předpokládá, že i v normálně stlačených horninách ($\sigma_z > \sigma_H$; σ_H = horizontální složka geostatického tlaku, σ_z = vertikální složka geostatického tlaku) může docházet ke vzniku horizontálních trhlin. Stává se tak tehdy, jestliže se použije štěpící kapalina, která může omezeně filtrovat do 19 kolektoru přes stěnu vrtu. Propustnost sedimentárních hornin bývá

totiž ve směru kolmo k vrstevnatosti mnohem nižší než ve směru po vrstvách. Naproti tomu při použití „absolutně“ nefiltrující kapaliny působí její tlak na stěnu vrtu a je-li horizontální složka geostatického tlaku menší než vertikální musí vzniknout trhlinka vertikální. Přitom tlak potřebný pro její vytvoření je menší než tlak nutný pro vytvoření trhlin horizontálních [3].“

„V současné době převládá názor, že vznik vertikální nebo horizontální trhliny závisí zejména na poměru horizontální a vertikální složky napjatosti hornin. Orientace trhlín vzniklých při hydroštěpení závisí na velikostech vertikální složky σ_z a horizontální složky σ_H geostatického tlaku a na existenci smykového napětí $\tau_{\theta z}$ [3].“



Obr. 7 Orientace trhlín při tahovém porušení (zdroj: <http://www.cbusbs.cz>)

„Jestliže $\sigma_H < \sigma_z$ a $\tau_{\theta z} = 0$, pak vznikají vertikální trhliny, při $\sigma_z < \sigma_H$ a $\tau_{\theta z} = 0$ vznikají horizontální trhliny. Je-li $\tau_{\theta z}$ různý od nuly, vznikají trhliny obecně orientované. Je nutno poznamenat, že na orientaci trhlín působí také jiné faktory, např. přírodní trhlinatost; znamená to, že výše uvedené závěry platí pouze pro izotropní stejnorodé vrstvy [3].“

3.1.2 Hlavní činitele ovlivňující velikost štěpícího tlaku

Geostatický tlak

„Obecně lze rozlišovat vrstvy normálně stlačené nebo tektonicky stlačené. V oblastech, které jsou, v normálním napětovém stavu působí maximální hodnota

geostatického tlaku (σ_z) vertikálním směrem a odpovídá tlaku nadloží. Další dvě geostatická napětí (σ_{H1} , σ_{H2} ;) působí v horizontální rovině a jsou si přibližně nebo úplně rovna. V tektonicky aktivních oblastech (aktivní zlomy, solné dómy, vrásové struktury atd.) nemusí být hlavní napětí orientována ve vertikálním a horizontálním směru [3].“

Vrstevní tlak

„Vrstevní tlak značně ovlivňuje velikost štěpícího tlaku. Médium v pórech horniny totiž přebírá část zatížení, které na vrstvu působí vlivem tíhy nadložních hornin. Tím ovšem dochází ke snížení vertikální i horizontální složky ve skeletu horniny a tím i ke zvýšení náchylnosti horniny ke štěpení [3].“

Úklon a směr vrtu

„Úklon i směr vrtu mají významný vliv na stabilitu stěny vrtu i na velikost štěpícího tlaku. V normálně stlačených oblastech dosahují štěpící tlaky v ukloněných vrtech nižších hodnot než ve vrtech vertikálních [3].“

Výpočet štěpícího gradientu a štěpícího tlaku

„Pro stanovení hodnoty štěpícího tlaku v různých hloubkách je používán štěpící gradient, což je přírůstek hodnoty štěpícího tlaku na jednotku hloubky. K určení štěpícího gradientu hornin existuje několik metod. Jedna z nejstarších metod výpočtu byla navržena Hubertem a Willisem. Další metoda Eatonova je zobecněnou metodou Huberta a Willise. Výpočet je rovněž prováděn pomocí metody Matthewse a Kellyho. Nutno zdůraznit, že všechny uvedené metody výpočtu platí pro vrty vertikální v normálně napjatých oblastech [3].“

3.2 Štěpící a nosná kapalina

Důležitý faktor, který ovlivňuje výsledek štěpení je použití vhodné štěpící kapaliny a její optimální vlastnosti. Štěpící kapalina slouží k provedení vlastního naštěpení sloje, nosná kapalina zanáší propant do již vzniklé trhliny. Štěpící kapalinou můžeme chápat veškerou kapalinu vtlačenu do vrtu. Jelikož je většinou štěpící a nosná kapalina totožná

správný výběr ovlivňuje celý průběh štěpení. Při výběru vhodné použité kapaliny musíme brát v potaz vlastnosti jako je viskozita a filtrační koeficient, které silně ovlivňují geometrii vzniklé trhliny a transport propantu [4].

Zvolený typ štěpící kapaliny musí splňovat následující kritéria:

- musí být kompatibilní s horninou, aby nedocházelo k nežádoucím chemickým reakcím, které by mohli snižovat propustnost,
- musí být snadno čerpatelná,
- musí mít nízké filtrační koeficienty,
- musí mít minimální kolmatační účinek (nesmí ucpávat ložisko),
- viskozita kapaliny nesmí být citlivá na teplotu,
- musí být levná.

Štěpící kapaliny můžeme rozdělit na čtyři základní druhy a to: čistá voda, chemicky upravená voda, vysoce viskózní kapalina na bázi gelu a kapalný CO₂ [4].

3.2.1 Čistá a chemicky upravená voda

Použití čisté vody při štěpení má řadu výhod. Vodu lze považovat za chemicky neutrální, čímž nedochází k nežádoucím reakcím kapaliny z uhlíkem hmotou. Jelikož je voda levná má také nízké pořizovací náklady, které při návrhu nejsou zanedbatelné. Je také snadněji čerpatelná, má nízký kolmatační účinek a nízké hydraulické odpory a také menší nárok na čerpací techniku. Oproti tomu má ale nízkou schopnost transportu propantu, vysokou míru filtrace a při začerpávání větších objemů vody je návratnost vody z ložiska zhoršenou návratnost, která má negativní vliv následnou propustnost plynu [6],[7].

Při chemické úpravě vody jde o zlepšení její parametrů jakožto použité štěpící kapaliny. Čistá voda se upravuje přidáním stabilizátorů na bázi anorganických sloučenin soli (KCl, NaCl nebo CH₄Cl) a antifrakčních aditiv [6],[7].

3.2.2 Viskózní kapalina na bázi gelu

V porovnání s vodou mají tyto kapaliny vlivem vysoké viskozity výrazně vyšší transportní schopnost pro propant, nízkou filtraci a nízké hydraulické odpory. Po zatlačení

kapaliny do štěpeného horizontu musí dojít k rychlému a řízenému rozložení gelu. Proto se ještě přidávají látky, které tomuhle procesu přispějí. Dávkování musí být přesné. Pokud nedojde k úplnému rozložení gelu, mohou nastat komplikace, které by znemožnili čerpání. Použití těchto gelů má však i svá úskalí jako je možný účinek kolmatace, má horší čerpatelnost a vyšší pořizovací náklady jak samotné látky tak i na použitou čerpací techniku [6],[7].

3.2.3 Kapalný CO₂

Použití zkapalněného CO₂ jako štěpící kapaliny snižuje tlakové ztráty způsobené třením, v porovnání s vodou má lepší schopnost nést propant a po ukončení štěpení dochází k rychlejšímu ustálení hydrodynamických podmínek. Možnost kolmatace je zanedbatelná. Jeho aplikace je vhodná tam, kde není přítok ložiskové vody. Kapalný CO₂ má také nízké hydraulické odpory a velmi dobrou návratnost z ložiska. Mezi hlavní nevýhodu patří skladování obrovského množství (řádově v m³) tohoto média a tím spojené technické a ekonomické aspekty [6],[7].

3.3 Propant

Nedílnou součástí procesu hydraulického štěpení je použití propantu. Jeho hlavními funkcemi jsou stabilizace a zvýšení propustnosti štěpných trhlin. Jedná se o křemitý písek různé zrnitosti, jímž se vyplňují vytvořené pukliny a brání jejich uzavření. Do štěpných trhlin se propant transportuje pomocí nosné kapaliny. Tento materiál musí mít schopnost udržet vytvořenou puklinu otevřenou. Při daném svěrném tlaku, který působí, musí propant zachovat maximální propustnost trhlin. To na něj klade vysoké kvalitativní nároky, proto se při výběru zohledňují následující kritéria:

- rozložení zrnitosti,
- obsah prachových částic,
- ovalita a sféricita zrn,
- odolnost proti kyselinám (nesmí se rozpouštět),
- pevnost zrn [4].

Nejdůležitějším parametrem výběru propantu je jeho zrnitost. Volba zrnitost má vliv jak na samotný průběh hydraulického štěpení, tak i následné čerpání štěpící (nosné) kapaliny a těžbu plynu. Mezi hlavní činitele, které mají podstatný vliv na zaplňování štěpných trhlin propantem, patří:

- měrná hmotnost,
- viskozita nosné kapaliny,
- objemový průtok,
- tvar a velikost podpěrných částic,
- množství propantu [4].

Pevnější a těžší částice propantu vyžadují intenzivnější průtok nosné kapaliny s větší viskozitou. Vyšší úroveň viskozity kapaliny zajišťuje transport písku hlouběji do puklin vytvořených štěpením. Čím nižší zaoblenost při současně větší míře hrubosti písku, tím dochází ke značnému tření, které ve svém důsledku zabraňuje jeho vyplavování při samotné těžbě. Používá se různých velikostí zrn [4]. (Příloha č. 1)

Pro vytvoření optimální podmínek propustnosti, je nutné použít dostatečné množství propantu. Cílem je vytvořit co nejlepší rozložení tlaku na kontaktní plochu trhliny a díky tomu eliminovat zatláčování zrn propantu do stěn štěpné pukliny. Po vytvoření štěpných trhlin a jejich vyplnění propantem prostřednictvím nosné kapaliny, zůstává sonda z důvodu stabilizace trhliny po určitou dobu uzavřena [4].

3.4 Odeznívání tlaku

Odeznívání tlaku je poslední etapou procesu hydraulického štěpení. Hlavní funkcí této fáze je vyvážení hydrodynamických podmínek vrtu. V praxi jsou využívány dva způsoby odeznívání tlaku:

- samovolné,
- řízené.

K samovolnému odeznění tlaku dochází bez vnějšího zásahu. Sonda je uzavřena, dokud se nevyrovná ložiskový tlak. Tato varianta je velice nákladná, a to jak časově, tak i

finančně, proto se v praxi převážně využívá řízené snižování tlaku. Nevýhodou tohoto způsobu vyrovnávání tlaku jsou např. možnost uvolnění propantu a uhlé hmoty do vrtu či hrozba zanešení, tzv. kolmatace vytvořené štěpné trhliny uhlým kalem. Vzhledem k výše zmíněným nedostatkům metody řízeného odezňování tlaku se spíše doporučuje přirozená stabilizace tlaku bez vnějšího zásahu. Pokud by ovšem tato varianta znamenala markantní nárůst nákladů, je vhodné zvolit režim řízeného odezňování tlaku s důkladným zvážením rychlosti snižování tlaku [4].

3.5 Hodnocení hydraulického štěpení

Systém štěpení je vždy volen podle ohledu na použitou techniku, vstrojení vrtu, použitý propant a štěpící kapalina a v neposlední řadě také ložiskové poměry sloje. Primární parametry, které určují štěpení, jsou tlak, koncentrace propantu a litráž štěpící kapaliny [4].

Hlavními tlakovými parametry jsou štěpící tlak, uzavírací tlak pukliny a maximální dosažený tlak štěpení. Štěpící tlak je takový, při kterém dojde k naštěpení uhlé hmoty a vznik trhliny, uzavírací tlak je ten při kterém dojde k uzavření trhliny. Užití maximálního štěpícího tlaku je limitováno vstrojením vrtu a použité technologie pro štěpení [4].

Základní ukazatel pro hodnocení úspěšnosti hydraulického štěpení je množství zatlačeného propantu. Kromě množství zatlačeného propantu, které je změřitelné jsou ostatní ukazatele (délka, šířka a výška vzniklé pukliny a její orientace) vyhodnotitelné pouze na základě matematicko-fyzikálních předpokladů, nebo pomocí hydrodynamických testů. Předpokládá se, že čím více je zatlačeno propantu do trhlín, tím se zvyšuje následné čerpání vody a poté samotná desorpce plynu. Ovšem s větší hloubkou uložení uhlé sloje, klesá množství zatlačeného propantu [4].

Množství zatlačené kapaliny do ložiska ovlivňuje hydrodynamické a fyzikálně-mechanické vlastnosti v okolí vrtu tzn., čím více se kapaliny dostane do vrtu, tím více bude ovlivněno ložisko. To má za následek pomalejší ustalování hydrodynamických podmínek štěpené sloje. Při určování množství použité vtláčené kapaliny se bere ohled na použitou techniku a její hydraulické výkony [4].

4 Ekonomické aspekty těžby plynu

Ziskovost těžby uhelného metanu je závislá na faktorech, jako jsou mocnost sloje a její uložení, hloubka sloje, obsah plynu v ložisku a jeho plynopropustnost, objem likvidované štěpící kapaliny. Dalšími proměnnými jsou např. přístup k trhu a tržní cena plynu. V nákladech se také mimo jiné promítají geologický průzkum, vrtné technické práce, vytvoření modelového zdroje atd. [4].

4.1 Náklady na realizaci a provoz

Na základě fáze realizace projektu CBM rozlišujeme náklady investiční a provozní. Investiční náklady jsou spojené s vybudováním sítě těžebních sond a jejich uvedení do provozu. Jsou spojeny s vysokou investicí, proto se v nákladech promítají postupně prostřednictvím odpisů. Doba odpisování je stanovena na základě předpokládané životnosti projektu. Vstupní investice je zpravidla kryta vlastním kapitálem ve spojení s investičním úvěrem. Do této skupiny počátečních nákladů řadíme také zřizovací náklady na založení těžební společnosti, získání potřebných oprávnění dle legislativy dané země. Při kalkulaci nákladů musíme brát v potaz finanční náročnost provedení geologického průzkumu a následné vytvoření dokumentace pro realizaci projektu [4],[7].

Po dokončení vybudování sítě těžebních sond se dostávají do popředí provozní náklady. Mezi provozní náklady patří zejména:

- materiál a energie,
- služby (náklady spojené s odvodněním ložiska, provozování plynovodů),
- náklady na opravy (sond, čerpadel apod.) a běžnou údržbu,
- osobní náklady (mzdové náklady a s tím spojené odvody pojistného),
- daně a poplatky,
- odpisy investičního majetku,
- úroky z investičního úvěru,
- tvorba zákonné rezervy na následnou rekultivaci,

- ostatní provozní náklady (administrativa, režijní náklady) [4],[7].

4.2 Výnosy

Výnosy predikujeme na základě tržní ceny zemního plynu a celkového objemu produkce. V počáteční fázi těžby této komodity se dá předpokládat nižší výnosnost v porovnání s náklady. To je dáno průběhem desorpce, která v počátečních fázích těžby nabývá nízkých hodnot. S postupným odvodňováním ložiska se zvyšuje produkce a potažmo i výnosnost projektu CBM. V prvních třech letech se objem vytěženého plynu zvyšuje. Poté by mělo dojít ke stabilizaci produkované komodity. Pro poslední fázi projektu je typický postupný pokles produkce a tím spojená výnosnost až do ukončení těžby, kdy již výnosy nepokryjí provozní náklady. Tato etapa je spojena s výnosy v podobě rozpuštění zákonných rezerv a odprodeje použité technologie [4],[7].

4.3 Ekonomická efektivnost

Program těžby CBM je dlouhodobý projekt, který vyžaduje významné investice. Při tvorbě manažerských rozhodnutí musíme vycházet z předpokládané ekonomické efektivnosti. Pro zkvalitnění rozhodovacích procesů je nutné mít relevantní a co možná nejpřesnější informace. Avšak při takto dlouhém horizontu existence projektu musíme vycházet predikovaných údajů. Ekonomickou efektivnost odvozujeme zejména na základě plánu objemu produkce zemního plynu, předpokládaných tržních cen a investičních nákladů. Prostřednictvím těchto ukazatelů posuzujeme např. ekonomickou návratnost investice, dobu návratnosti vložených prostředků, ukazatele rentability v jednotlivých fázích projektu atd. [4],[7].

4.4 Ekonomické limity těžby

Při realizaci projektu CBM jsme limitováni určitými faktory, které mohou mít ve svém důsledku negativní vliv na úspěšnost celého programu. Mezi takové limity patří:

- koncentrace zdrojů neboli objemem zásob plynu v uhelné sloji,
- denní těžební výkon a jeho proměnlivost v čase,

- doba realizace projektu,
- hodnota investičních nákladů [4],[7].

4.5 Porovnání těžby CBM v ČR a ve světě

4.5.1 Pilotní průzkum proveden v části Hornoslezské pánve

Pilotní projekty těžby uhelného metanu provedeny v letech 1993 až 2000 v části Hornoslezské pánve (HSP) poukázaly na technologické problémy a to že provedené průzkumné práce nebyly zcela zajištěny. Nebyly zcela pochopeny geologické podmínky vzniku a uložení ložiska a specifické geotechnické a fyzikálně-chemické vlastnosti uhlí.

HSP se však z pohledu na další možný průzkum jeví vhodná a to z důvodů příznivým tektonickým vývojem ostravsko-karvinského oblasti. Odhady množství zadrženého plynu je nejméně 100 miliard m³. V pilotním průzkumu se sice štěpením podařilo vytvořit komunikační trasy, ale došlo k uzavírání vytvořené cesty. To znamená, že použitá metodika, která byla převzata od odborníků z USA, není univerzálně použitá v našich podmínkách. Podle Česká geologické služby, která zpracovala výsledky, se doporučuje v projektech i nadále pokračovat. Ovšem bude muset být proveden rozsáhlý výzkum jak terénních tak i laboratorních prací a upravit technologie pro naše podmínky. [4] Mapa povrchových vrtů v HSP. (Příloha č. 2)

4.5.2 Situace ve světě

Největší rozmach těžby a komerčního využívání uhelného metanu se dostalo právě v USA. Rozvoj začal v 50. a 60. letech minulého století, v pánvi San Juan Basin kde bylo v letech 1997 – 1998 vytěženo více než 2,8 miliard m³ plynu a v pánvi Black Warrior více než 25,4 miliard m³. Použití kavitace nezapaženého vrtu v Pánvi San Juan bylo podmíněno právě dobrými geologickými podmínkami ložiska. Později se také průzkumné práce přesunuly do oblastí západní a střední USA. Byly to pánve Raton, Piceance, Wind River, Powder River, Green River a Sand Wash. Mapa oblastí s výskyt uhelného metanu V USA bylo provedeno přes 8000 vrtů, které svou produkcí v letech 1997 - 1999 dosáhli více než 20 miliard m³ plynu, což představovalo více než 6% celkové produkce v USA. Finanční

prostředky, které byly vynaloženy, se pohybují někdy mezi 5 miliony US dolary. Náklady spojené s vyvrtáním jednoho vrtu do hloubky 800 m se v přepočtu pohybují kolem 13 mil. Kč. Při nepříznivých podmínkách jde očekávat nárůst až do výše 23 mil. Kč [4]. Mapa uhelných oblastí USA. (Příloha č.3)

Čína v momentální době patří mezi největší producenty černého uhlí na světě. Proto je zde odůvodněné očekávat největší rozmach právě těžby CBM. Zásoby plynu jsou odhadovány na $30-80 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ což je dvakrát větší než v uhelných pánvích USA. Právě z důvodu velkého úniku metanu do ovzduší začali v 90. letech minulého století první zmínky o možnostech využití tohoto plynu. Bylo vytipováno sedm oblastí, ve kterých jsou odhadovány již výše zmíněné zásoby plynu. Ovšem první pilotní průzkumy zjistily nízkou propustnost slojí. To dalo za úkol vyřešení mnoha technických problémů při provádění vrtů. Další vlna započala v roce 2000, kdy se v Číně objevilo mnoho firem, které si daly za úkol vyřešit technické problémy a tím nastartovat úspěšnou těžbu CBM [4].

Austrálie disponuje obrovskými zásobami černého uhlí. V současné době probíhá aktivní těžba v pánvích, které zasahují do měst New South Wales a Queensland. Největší rozmach těžby CBM v Austrálii, započal v 80. letech minulého století. Firma Enron započala průzkumné práce v roce 1992 ve východní pánvi Galilee. V letech 1993-1994 se povedlo úspěšně stimulovat čtyři vrty, které měly velkou propustnost a to v rozmezí 20 – 60 mD. Firma Tristar, která v roce 1995 začala s prováděnými pracemi v oblasti Fairview odvrátila, 18 vrtů z toho 13 jich bylo stimulováno kavitací a to z důvodů mimořádně příznivých podmínek. Produkce plynu se pohyboval od $30\,000 \text{ m}^3$ do $65\,000 \text{ m}^3$ denně a s tím spojený fakt, že přítok vody byl minimální. Společnost CRA Exploration Pty Ltd. realizovala vrty v části pánve Bowen. Mocnosti jednotlivých slojí dosahovali výšky až 40 metrů a denní produkce plynu až $70\,000 \text{ m}^3$. Firma BHP se v současnosti věnuje těžbě CBM na dole Moura v pánvi Bowen. Jsou v oblasti mělce uložených slojí, které dosahují délky více než 1000 m. Od roku 1996 je, plyn z této oblasti komerčně využíván a denní produkce dosahuje $420\,000 \text{ m}^3$ [4].

Západní a střední Evropa co se týče produkce CBM je momentálně v útlumu. Důvodem byly vysoké náklady na realizaci a malá produkce. Práce byly provedeny v Německu, Polsku, Anglii, Rakousku, Belgii a Maďarsku. Snahou některých odborníků o uvolnění metanu je použitý vtlačeno CO_2 a tím využití sorpčních vlastností uhlí [4].

Závěr

Cílem mojí práce bylo popsat principy těžby plynu z uhelných slojí, zákonitosti a vazby plynu v uhlí a současně použitou techniku a technologii pro vydobytí této energetické suroviny. Popisuji průběh nejpoužívanější stimulační metody a to hydraulické štěpení. V neposlední řadě popisuji základní ekonomické ukazatel, které je nutné zohlednit při návrhu projektu.

Jelikož uhelné ložisko představuje nekonvenční zdroj plyn, je důležité vzít v úvahu, jakým způsobem se metan do uhelné hmoty dostává a také rozmanitost uhelné struktury ve které je uchován. Před samotnou těžbou je důležité zajistit spoustu technických úkonů. Mezi ty hlavní patří správné vyhodnocení technologických postupů, jakými bude uhelná sloj zpřístupněna, zapazena a perforována a také jaký bude použit způsob stimulace a k tomu použitá technika.

Zemní plyn je vyčerpatelná surovina, protože uhelné sloje jsou obrovskými zásobníky metanu, považují za důležité se touto problematikou i nadále zabývat. V porovnání ze světem máme ještě co dohánět, pilotní projekty u nás poukázaly, že technologie používaná v USA a jinde ve světě se do našich podmínek až tak nehodí. Uhlí se podařilo nastimulovat, ale v krátkém čase došlo, k uzavírání vytvořených trhlin což není uspokojivý výsledek.

Poslední ukazatel těžby CBM je ekonomický. Je nutno zohlednit všechny peněžité vstupy na použití této nákladné technologie. Pokud se vynaložené náklady na realizaci a provoz v čase nevrátí (i několik let), nebude o tuto problematiku zájem, ovšem nepředpokládám, že by taková situace nastala.

Použitá literatura

- [1] Břidlicový plyn – Geologie (2015) [online] [cit. 2015-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://energetika.tzb-info.cz/vytapime-plynem/12371-bridlicovy-plyn-geologie>>.
- [2] CBM well drilling and completion [online] [cit. 2015-03-20]. Dostupný z WWW: <http://petrowiki.org/CBM_well_drilling_and_completion>.
- [3] Dlouhodobá desorpce metanu z horninových struktur – Závěrečná zpráva k řešení projektu č. 9 (2002). Dostupný z WWW: <<http://www.cbubs.cz/docs/projekty/zprava009.pdf>>.
- [4] Ďurica, D., Müller, P., Krčál, T., Doubravský, R., Hemza, P., Němec, J., Osner, Z. (2006): *Plyn sorbovaný v uhelných slojích hornoslezské pánve*. Česká geologická služba.
- [5] EPA (2004): Characteristics of Coalbed Methane Production and Associated Hydraulic Fracturing Practice [online] [cit. 2015-02-05]. Dostupný z WWW: <http://www.epa.gov/ogwdw/uic/pdfs/cbmstudy_attach_uic_ch03_cbm_practices.pdf>.
- [6] Coalbed Methane Technology, Halliburton Company – Interní materiál firmy KaC s.r.o Hodonín.
- [7] Košutek, M. (2001): Možnost těžby slojového metanu s využitím vrtů realizovaných z povrchu. Diplomová práce.
- [8] Ramaswamy, S. (2007): Selection of best drilling, completion and stimulation methods for coalbed methane reservoirs. [online] Dostupný z WWW: <<https://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/85835/Ramaswamy.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- [9] Sobotka, J. (2012): Hydraulické štěpení, Bakalářská práce.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Hydraulické štěpení metanu z povrchu svislým vrtem (zdroj: http://cdn.frack-off.org.uk , upraveno) | 4 |
| Obr. 2 Systém trhlin uhelné sloje (zdroj: Ďurica et al. 2006) | 11 |
| Obr. 3 Vznik trhlin v uhelné sloji (zdroj: Ďurica et al. 2006)..... | 12 |
| Obr. 4 Zapažení nad horní hranicí uhelné sloje (zdroj: http://petrowiki.org , upraveno) | 16 |
| Obr. 5 Přepažení uhelné sloje pažnicovou kolonou (zdroj: http://petrowiki.org , upraveno) | 17 |
| Obr. 6 Schéma použitého zařízení při hydraulickém štěpení (zdroj: Sobotka, J. (2012) Hydraulické štěpení, Bakalářská práce)..... | 19 |
| Obr. 7 Orientace trhlin při tahovém porušení (zdroj: http://www.cbusbs.cz) | 21 |

Seznam příloh

Příloha č. 1: Zrnitosti propantu

Příloha č. 2: Mapa povrchových vrtů HSP

Příloha č. 3: Mapa uhelných oblastí USA