



Analýza a modelování aktivního objemu podzemního zásobníku plynu Háje u Příbrami

Bakalářská práce

Studijní program:

B3901 Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor:

Aplikované vědy v inženýrství

Autor práce:

Markéta Milerová

Vedoucí práce:

doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.

Ústav nových technologií a aplikované informatiky





Zadání bakalářské práce

Analýza a modelování aktivního objemu podzemního zásobníku plynu Háje u Příbrami

Jméno a příjmení: **Markéta Milerová**
Osobní číslo: M18000116
Studijní program: B3901 Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Aplikované vědy v inženýrství
Zadávající katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou podzemního skladování plynu v přírodních i umělých objektech a se specifiky podzemního zásobníku Háje u Příbrami, měřenými provozními, geologickými, geofyzikálními a geochemickými daty a způsobem monitoringu PZP.
2. Proveďte citlivostní analýzu vlivu vstupních dat na výsledky provozního monitoringu PZP.
3. Navrhněte zjednodušený fyzikální a matematický model změn aktivního objemu kaverny v důsledku interakce s puklinovým prostředím.
4. Navržený model implementujte ve zvoleném programovacím jazyce.
5. Vytvořený program zdokumentujte a ověřte jeho funkčnost na testovacích i reálných provozních datech PZP Háje.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
30–40
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] DAKE, L.P. *Fundamentals of reservoir engineering*. Amsterdam: Elsevier. 2001. ISBN 978-04-4441-830-2.
- [2] GIGLIO, Giorgio, VERGA, Francesca, ORESTE, Paulo. *Geomechanical analyses on the Hájje UGS*. Technická apráva. Torino: Dream. 2005.
- [3] SEVERÝN, Otto. *Analýza provozních data PZP Hájje při zvyšování ložiskového tlaku na 12,5 MPa*. Technická zpráva. Brno: RWE Gas Storage s.r.o., 2012.

Vedoucí práce:

doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

14. května 2021

Markéta Milerová

Poděkování

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Otto Severýnovi, Ph.D. za vedení práce a cenné rady a připomínky při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala své mamince a příteli za podporu při studiích.

Analýza a modelování aktivního objemu podzemního zásobníku plynu Háje u Příbrami

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou modelování aktivního objemu podzemního zásobníku plynu. Z provozních dat vyplývá, že tento objem se mění v závislosti na provozním využití zásobníku. S pomocí citlivostní analýzy dat zásobníku je vytvořen a implementován model změn aktivního objemu v souvislosti s interakcí zásobníku s puklinovým prostředím. Model je pomocí analýzy jeho parametrů kalibrován na zásobník Háje a otestován na reálných datech. Výsledky modelu se liší oproti skutečným tlakům v průměru o setiny MPa s vyššími odchylkami při vtláčení či těžbě.

Klíčová slova: zemní plyn, podzemní zásobníky plynu, PZP Háje, citlivostní analýza, modelování aktivního objemu

Analysis and simulation of active volume of underground gas storage Háje u Příbrami

Abstract

The bachelor's degree thesis deals with the modelling of the active volume of a rock cavern underground gas storage (Háje UGS). Operational data show that this volume changes over the course of time. With the help of the storage data sensitivity analysis, a model of volume changes with an influence of the rock fissures surrounding the storage is created and implemented. This model is, by analysing his parameters, calibrated for the Háje UGS and then tested on real data. The results of the model differ from real values of pressure by an average of hundredths of MPa with higher deviations when the gas is injected or extracted.

Keywords: natural gas, underground gas storage, Háje UGS, sensitivity analysis, active volume modelling

Obsah

Úvod.....	15
1 Zemní plyn a jeho skladování	16
1.1 Důvody ke skladování zemního plynu	16
1.2 Druhy skladování zemního plynu	17
1.3 Historie skladování zemního plynu.....	18
2 Podzemní zásobníky zemního plynu.....	20
2.1 Základní parametry PZP	20
2.2 Aquiferové zásobníky	21
2.3 Kavernové zásobníky	21
2.4 PZP Háje	22
2.4.1 Historie.....	22
2.4.2 Struktura.....	23
3 Citlivostní analýza vstupních dat	25
3.1 Stavové rovnice plynu.....	25
3.2 Vliv složení na kompresibilitní faktor a přepočet tlaku na dně.....	26
3.3 Porovnání naměřených a vypočtených tlaků.....	29
3.4 Teplotní odchylky při vtlačení/těžení plynu.....	30
3.5 Korekce měrné skladovací kapacity.....	31
3.6 Provozní monitoring PZP Háje	32
4 Matematicko-fyzikální model změn aktivního objemu kaverny.....	34
4.1 Fyzikální model.....	34
4.2 Matematický model.....	35
4.3 Numerické řešení modelu	35
5 Realizace matematicko-fyzikálního modelu v programu HaSim.....	37
5.1 Vstupní soubory	37
5.1.1 Konfigurační soubor.....	37
5.1.2 Soubor s provozními daty PZP	38
5.1.3 Soubor s naměřenými tlaky.....	39

5.1.4	Volitelný soubor s kompresibilitními faktory	39
5.2	Výstupní soubor	40
5.3	Instalace a použití programu	41
5.4	Programová dokumentace	42
6	Ladění a analýza parametrů modelu.....	43
6.1	Model bez puklinového prostředí.....	43
6.2	Model s puklinovým prostředím	44
6.2.1	Obsah průřezu pístu.....	44
6.2.2	Koeficient tlumení.....	45
6.2.3	Tuhost pružiny.....	46
6.2.4	Hmotnost pístu	46
6.2.5	Počáteční poloha pístu.....	47
6.2.6	Objem kaverny	48
6.3	Test parametrů pro jiná období.....	49
	Závěr.....	53
	Použitá literatura	54

Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Mapa PZP na území ČR.....	19
Obrázek 2-1: Šíření plynu ve zvodnělé vrstvě	21
Obrázek 2-2: Schéma PZP Háje.....	23
Obrázek 2-3: Schéma provedení zátek PZP Háje	24
Obrázek 3-1: Standing-Katzův diagram.....	26
Obrázek 4-1: Schéma fyzikálního modelu pístu se třením v zásobníku	34
Obrázek 4-2: Butcherova tabulka pro standardní RK metodu čtvrtého řádu	36
Obrázek 5-1: Ukázka konfiguračního souboru	38
Obrázek 5-2: Ukázka Qsouboru.....	39
Obrázek 5-3: Ukázka souboru s naměřenými tlaky	39
Obrázek 5-4: Ukázka souboru s kompresibilitními faktory	40
Obrázek 5-5: Ukázka výstupního souboru.....	41
Obrázek 5-6: Povinné soubory ve složce data	41
Obrázek 5-7: Povinné soubory pro spuštění programu.....	41
Obrázek 5-8: Ukázka komunikace s programem bez využití zfactor.exe.....	41
Obrázek 5-9: Ukázka komunikace s programem s použitím zfactor.exe.....	41
Obrázek 5-10: Ukázka komunikace s programem pomocí parametru příkazového řádku	42

Seznam grafů

Graf 1-1: Celková spotřeba plynu v ČR v letech 2000-2019.....	16
Graf 1-2: Porovnání spotřeby plynu v letech 2018 a 2019	17
Graf 3-1: Relativní hodnoty kompresibilitního faktoru při teplotě 25 °C.....	27
Graf 3-2: Relativní hodnoty tlaku na dně v hloubce 950 m a při teplotě na ústí 10 °C.	28
Graf 3-3: Absolutní rozdíl tlaků naměřených a vypočtených	29
Graf 3-4: Vývoj teploty a tlaku při intenzivním vtláčení plynu.....	30
Graf 3-5: Vývoj teploty a tlaku při intenzivní těžbě plynu	30
Graf 3-6: Vývoj korigované měrné skladovací kapacity pro průběžná pětiletá období.....	31
Graf 3-7: Hysterezní křivka PZP Háje.....	32
Graf 3-8: Projekce hysterezní křivky PZP Háje.....	33
Graf 6-1: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty V_k v modelu bez puklin.....	44
Graf 6-2: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty S v modelu s puklinami.....	45
Graf 6-3: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty c v modelu s puklinami	45

Graf 6-4: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty k v modelu s puklinami	46
Graf 6-5: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty m v modelu s puklinami	47
Graf 6-6: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty h v modelu s puklinami	48
Graf 6-7: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty V_k v modelu s puklinami	49
Graf 6-8: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků obou modelů v laděném období.....	50
Graf 6-9: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v období 2002-2006.....	51
Graf 6-10: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v roce 2001	51
Graf 6-11: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v roce 2006	52

Seznam tabulek

Tabulka 2-1: Základní parametry zásobníku ve vytěženém ložisku a aquiferu	21
Tabulka 3-1: Složení ruského plynu [% obj].....	27
Tabulka 6-1: Objem puklin pro různé S	43
Tabulka 6-2: RMSE pro různé V_k	43
Tabulka 6-3: RMSE tlaků a průměrný objem puklin pro různé S	44
Tabulka 6-4: Maximální rychlosti pístu pro různá k	46
Tabulka 6-5: RMSE tlaků pro různá h	47
Tabulka 6-6: RMSE tlaků pro různá V_k	48
Tabulka 6-7: Parametry modelu	49

Seznam zkratek

CD	Compact Disc, optický disk
CNG	Compressed Natural Gas, stlačený zemní plyn
CSV	Comma-separated values, souborový formát oddělující položky pomocí čárky
GIP	Gas in Place, množství plynu v zásobníku
JSON	JavaScript Object Notation, datový formát umožňující agregaci v objektech
PZP	podzemní zásobník plynu
UGS	Underground Gas Storage, podzemní zásobník plynu
ZP	zemní plyn
sm ³	standardní metr kubický

Úvod

Zemní plyn je důležitou součástí našich každodenních životů, používá se především k vytápění a jako palivo v hutnickém či sklářském průmyslu, dále v dopravě, v domácnostech k ohřevu vody, nebo například k výrobě elektřiny. Jeho spotřeba je silně závislá na počasí, tudíž je předvídatelná jen krátkodobě. Aby bylo možné výkyvy ve spotřebě vykrýt, je třeba vytvořit místní zásoby, které by zaručily stabilitu dodávek plynu. K tomuto účelu slouží především podzemní zásobníky plynu. Existuje mnoho typů těchto zásobníků, nicméně tato práce se zabývá zásobníkem Háje u Příbrami, který je díky své struktuře poměrně unikátní.

Zatímco většina kavernových zásobníků je situována v solných strukturách či v opuštěných dolech, PZP Háje je jako první kavernový zásobník uměle vytvořen v tvrdých horninách. Jedním z hlavních sledovaných parametrů tohoto zásobníku je aktivní objem. Ten se v průběhu let, jak plyne z provozních dat, mění v závislosti na provozním využití, to může být vysvětleno tím, že zde dochází k vlivu interakce plynu a puklin v okolí zásobníku. Vzhledem k unikátnosti zásobníku, v současnosti neexistují přesné komerční modely, které by procesy v něm dobře simulovaly. Z tohoto důvodu bylo potřeba vytvořit vlastní model, který by tento objem byl schopný simulovat na základě informací o počátečním stavu zásobníku (tlak, teplota apod.) a údajích o vtláčení a těžbě plynu v průběhu provozu.

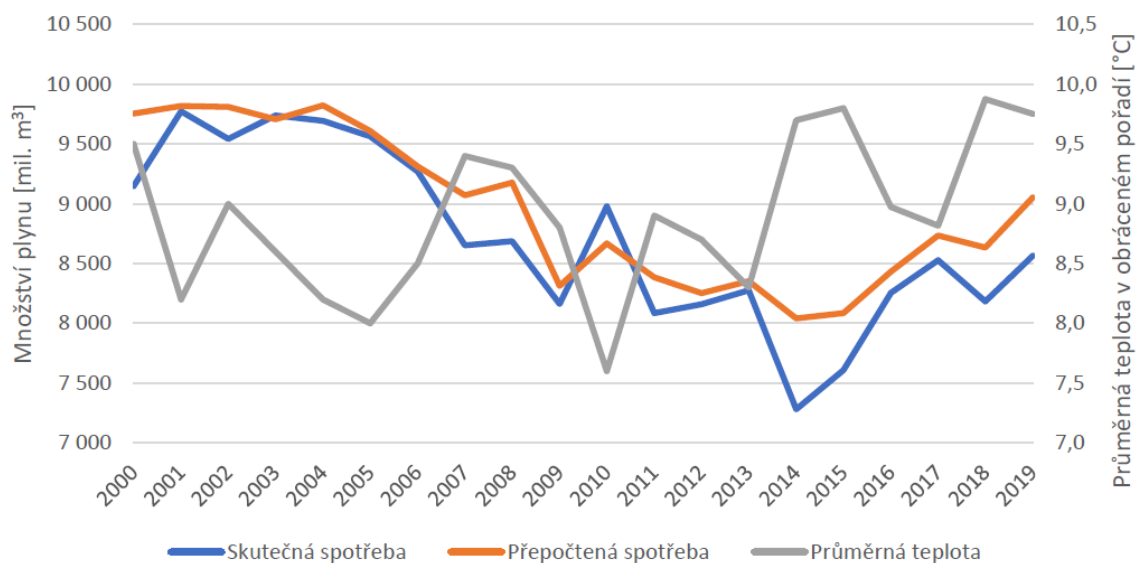
Cílem práce bylo na základě citlivostní analýzy vytvořit, realizovat a otestovat model zásobníku, který by byl schopný simulovat změny aktivního objemu. Model vycházel z myšlenky, že rozhraní voda-plyn, se chová jako píst se třením.

V kapitole 1 se práce zabývá důvody, druhy a historií skladování zemního plynu. Další kapitola rozebírá podzemní zásobníky plynu a jejich typy a specifikace se zaměřením na PZP Háje. Kapitola 3 se věnuje stavovým rovnicím s navázáním na citlivostní analýzu vstupních dat, s pomocí těchto poznatků pak v kapitole 4 vzniká matematicko-fyzikální model změn objemu, který je v další kapitole 5 implementován v jazyce Java. Poslední kapitola 6 se zabývá analýzou parametrů modelu za účelem kalibrace modelu pro PZP Háje a testování na reálných datech.

1 Zemní plyn a jeho skladování

Zemní plyn patří mezi nejvýznamnější strategické suroviny současnosti. Díky své vysoké výhřevnosti se používá k výrobě elektřiny, kde pokrývá až 22 % celosvětově vyrobené elektřiny. Kromě toho je využíván například také v domácnostech k vytápění a vaření a v dopravě, kde se využívá stlačený zemní plyn (CNG) jako palivo. (WEC, 2016, s. 16; Budín, 2015b)

V České republice bylo například za rok 2019 využito 8 565 mil. m^3 zemního plynu. V ČR je využit především k vytápění, spotřeba je tedy silně závislá na teplotě (graf 1-1). (ERÚ, 2020a, s. 34)



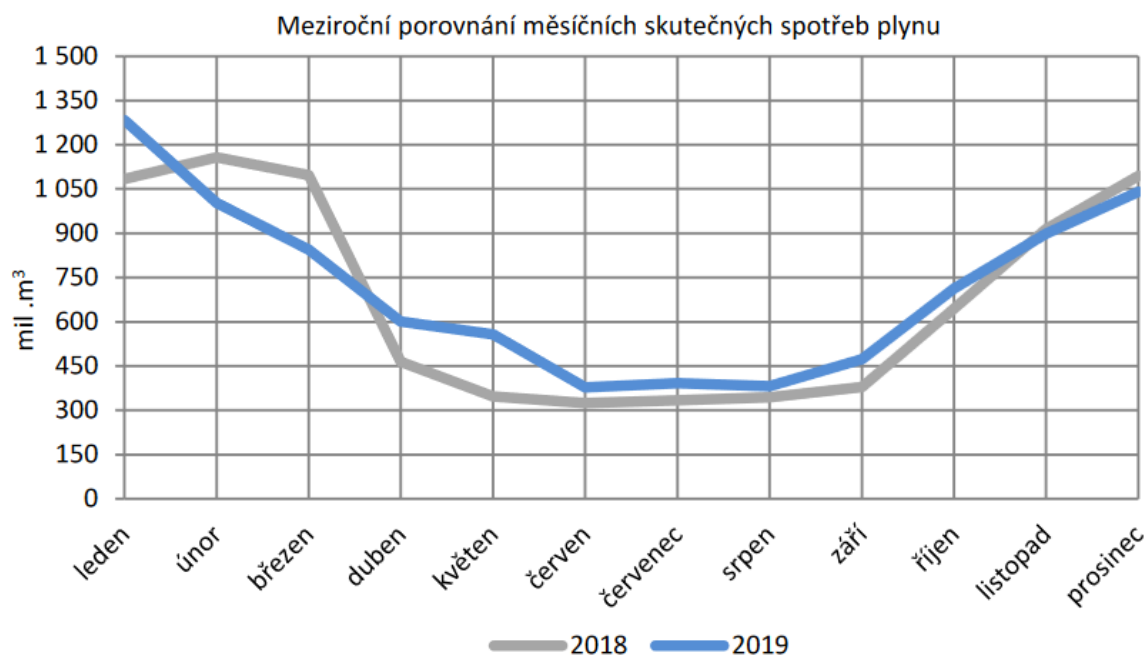
Graf 1-1: Celková spotřeba plynu v ČR v letech 2000-2019 (ERÚ, 2020a, s.35)

1.1 Důvody ke skladování zemního plynu

Vzhledem k tomu, že většina zásob ZP se nachází v poměrně velkých vzdálenostech od spotřebitelů, je nutné ho dopravovat za pomoci plynovodů či tankerů (po zkapalnění). V Evropě se zdroje ZP nacházejí do 5000 km od hlavních spotřebitelů, k dopravě se tedy používají především tranzitní plynovody. V ČR je spotřeba pokryta z více než 98 % dovozem (asi 1,3 % pochází z místní těžby). (Budín, 2015a; ERÚ, 2020b)

V plynovodech má ZP za účelem snížení ztrát energie a opotřebení stěn plynovodu poměrně vysoký tlak a malou rychlost proudění, která se pohybuje kolem 45 km/h. Není tedy možné bezprostředně regulovat množství dodávek v závislosti na spotřebě ve vzdálených místech odběru. Pro pokrytí výkyvů v řádu hodin postačí vlastní kapacita potrubí, nicméně co se týče denních výkyvů, je zapotřebí mít k dispozici bližší zdroj ZP. (Severýn a Onderka, 2013)

Skladování ZP využíváme za účelem vykrytí značných výkyvů spotřeby v průběhu roku. To se týká především období tzv. topných sezón, kdy je zvýšené využití ZP (graf 1-2). Zatímco je možné odhadnout přibližné množství plynu potřebné na zimu, nelze konkrétně říct, kdy ho v průběhu zimy bude potřeba (mohou se objevit chladné vlny či oblevy). Skladování též můžeme využít za účelem těžení z ložisek a může také napomoci rovnoměrnému využívání kapacity tranzitních plynovodů. (Zákopčan, 2003)



Graf 1-2: Porovnání spotřeby plynu v letech 2018 a 2019 (ERÚ, 2020b, s. 17)

Dalšími důvody ke skladování ZP jsou například obchod s plynem (obchodník levně koupený plyn uskladní a čeká, až se jeho cena zvedne), snížení nákladů (na stavbu plynovodů atd.), nebo zvýšení spolehlivosti zásobování. Poměrně zajímavý důvod má skladování ve starých ložiscích ropy, kdy se v průběhu skladování mění její vlastnosti ve prospěch koeficientu vytežitelnosti. (Zákopčan, 2003)

1.2 Druhy skladování zemního plynu

Prvním způsobem skladování je, jako u ropy či jiných kapalných paliv, uložení v ocelových nádržích. Pokud ale ZP skladujeme za tzv. normálních podmínek, je jeho objem přibližně deset až stotisíckrát větší než kapalných paliv o stejné hmotnosti. V praxi není možné takové množství uskladnit v těchto nádržích. Řešení velkého objemu může být jeho stlačení, nicméně dlouhodobé skladování v tlakových nádobách je značně nebezpečné pro lidi a okolní prostředí, navíc i po stlačení ho není možné skladovat v příliš velkém množství. (Zákopčan, 2003)

Dalším způsobem je zkapalnění. Zde je velkou nevýhodou potřeba složitých technologií k přepravě a skladování. Tento způsob je také poměrně materiálně, finančně, a především energeticky nákladný. Alternativní metoda je rozpouštění v kapalném propanu. Nevýhodou je potřeba nosného média, navíc je nutné plyn před spotřebou upravit. (Zákopčan, 2003)

Nejvýhodnější a nejvíce využívanou metodou je skladování v podzemních zásobnících. V nich se skladuje až 98 % plynu na světě. Dělí se na zásobníky vytvořené v porézním a puklinovém (pórové) a v neporézním prostředí (kavernové). Mezi pórové patří vytěžená ložiska plynu, nebo nafty a aquiferové zásobníky. Mezi kavernové pak patří především zásobníky v solných kavernách, opuštěných dolech a kavernách vzniklých výbuchem či výrubem. (Svoboda aj, 1997, s. 233; Zákopčan, 2003)

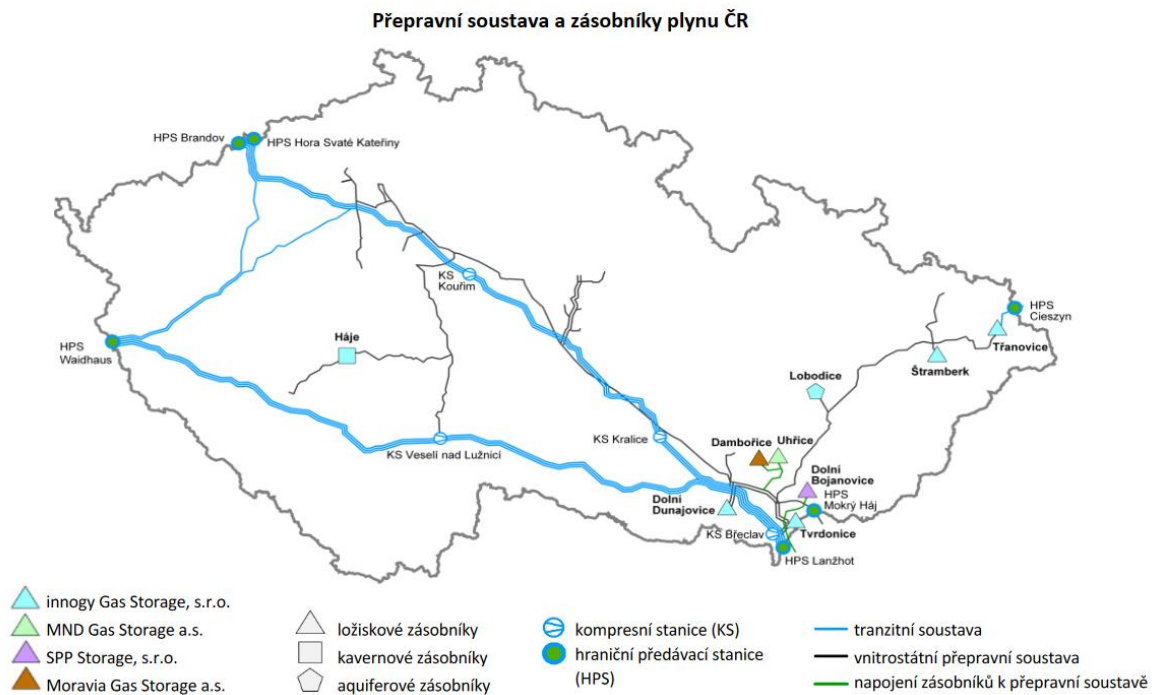
1.3 Historie skladování zemního plynu

Za první zásobník plynu se považuje tzv. mokrý plynojem L. A. Lavosiera, který byl vynalezen v roce 1781. Poprvé byl použit v plynárně na parní stroje v Anglii. Vylepšení se dočkal v roce 1833 v podobě tzv. teleskopického mokrého plynojemu. S narůstající poptávkou po zemním plynu se zvýšila i nutnost ho skladovat ve větších objemech. Nadzemní nahradilo skladování podzemní s mnohem většími kapacitami. (Zákopčan, 2003)

První podzemní zásobník plynu vznikl v roce 1916 ve Spojených státech, jeho kapacita dosahovala 62 mil. m³. První pokus o aquiferový zásobník byl realizován v roce 1946 v USA, byl však neúspěšný. Zásobník se nepodařilo zprovoznit z důvodu nemožnosti vytěsnění vody z kolektoru. V Evropě vznikl první PZP v roce 1954 v Německu, zde nejprve sloužil jako sklad svítiplynu, později v roce 1973 se konvertoval na zásobník zemního plynu. (Zákopčan, 2003)

První podzemní zásobník na území České republiky je aquiferový zásobník u Lobodic. Byl uveden do provozu v roce 1965 a sloužil jako sklad svítiplynu. V roce 1989 byl převeden na zásobník zemního plynu. Prvním zásobníkem na zemní plyn v ropo-plynovém ložisku v České republice byl PZP Tvrdonice (dříve Hrušky), jeho aktivní kapacita je asi 435 mil. m³. Dalším podzemním zásobníkem byl PZP Dolní Dunajovice, ten byl vytvořen v částečně vytěženém plynovém ložisku. Jeho aktivní kapacita je přibližně 910 mil. m³. Mezi další ložiskové PZP na našem území patří například PZP Štramberk, Uhřice, Dambořice a další (obrázek 1-1).

Jediný kavernový zásobník na našem území, PZP Příbram (Háje), je jedinečný tím, že je postaven uměle v tvrdých horninách. Tomu se práce věnuje v kapitole 2.4. (Zákopčan 2003; Svoboda aj, 1997, s. 236–246)



Obrázek 1-1: Mapa PZP na území ČR (ERÚ, 2020b)

2 Podzemní zásobníky zemního plynu

PZP se skládá z nadzemní části, sond a podzemní uskladňovací části. Nadzemní část obvykle zajišťuje dopravu a úpravu zemního plynu, regulaci, měření a řízení PZP.

Sondy (v PZP označení vrtu s vstrojením) můžeme dělit dle použití na provozní (vtlačně-odběrové – zajišťují výkon PZP), pozorovací (sledování ložiskových tlaků, hermetičnosti atd.) a účelové. Podzemní část obsahuje v případě pórových zásobníků kolektor (umožňuje hromadění plynu), izolátor (zabraňuje úniku plynu) a ložiskovou past (skládá z kolektoru a izolátoru), ve které dochází k akumulaci plynu. Mezi základní vlastnosti kolektoru patří porozita a propustnost. Porozita představuje poměr mezi objemem dutin a celkovým objemem dané horniny. Propustnost je vlastnost horniny propouštět plyn či kapalinu při daném tlaku. (Zákopčan, 2003)

2.1 Základní parametry PZP

Základním parametrem PZP je hermetičnost (uzavřenost), především se jedná o hermetičnost nadložních vrstev nad skladovacím obzorem. U ropo-plynových ložisek je tato hermetičnost prakticky jistá vzhledem k faktu, že daná struktura dokázala akumulovat plyn několik miliónu let. Existují však i nehermetické zásobníky, které jsou nadále v provozu s tzv. přetokem. (Svoboda aj, 1997, s. 233; Zákopčan, 2003)

Hloubka PZP se pohybuje okolo 300-2000 m, minimální hloubka je limitována především hermetičností, možností vtlačení plynu do zásobníku, aniž by docházelo ke štěpení hornin, navíc s menší hloubkou klesá maximální tlak PZP (resp. kapacita), který se odvíjí od hydrostatického tlaku v dané hloubce. Maximální hloubka je pak dána ekonomickou náročností provozu. Efektivní mocnost skladovací vrstvy ovlivňuje celkovou kapacitu zásobníku a výkon provozních sond. Fyzikální parametry hornin byly již zmíněny u vlastností kolektoru (v kapitole 2). Na parametry PZP má vliv tzv. zvodeň v okolí zásobníku, která se podílí na režimu zásobníku. V expanzním režimu, tedy režimu s lineární závislostí ložiskového tlaku na objemu, nedochází k vlivu vodní fáze. Ve vodním režimu, kde se projevuje značný vliv vodní fáze, je ložiskový tlak konstantní. Často však dochází k částečnému ovlivnění vodním zápolím v různém rozsahu, vzniká tzv. smíšený režim, který je nelineární. (Svoboda aj, 1997, s. 233–234; Zákopčan, 2003)

Mezi základní provozní parametry patří celkové zásoby, maximální a okamžitý výkon, rozsah provozních tlaků a počet provozních sond. Celkové zásoby ještě můžeme rozdělit na pasivní (poduška) a aktivní (provozní). Poduška je zbytkové množství plynu potřebné k provozu zásobníku. Účelem podušky je zabezpečit potřebnou hodnotu tlaku a udržet dostatečný výkon na konci těžby, udržet filtrační vlastnosti kolektoru a zabránit nástupu vodního zápolí do plynové části obzoru. Aktivní zásoby pak představují objem plynu, který je možné během těžební sezóny odebrat ze zásobníku, aniž by se porušila stabilita ložiska. (Zákopčan, 2003)

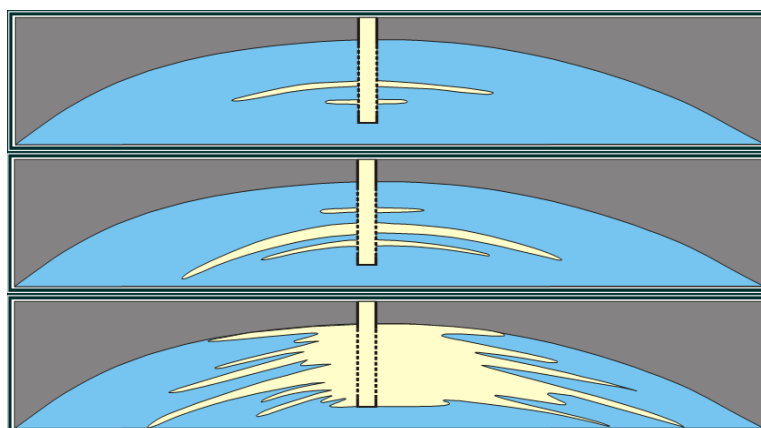
2.2 Aquiferové zásobníky

Aquiferové PZP, též zásobníky vytvořené ve zvodnělých vrstvách, jsou obecně zásobníky budované v případě, kdy není k dispozici vhodně vytěžené ropo-plynové ložisko. Jsou obecně mnohem rizikovější z důvodu nejasné těsnosti krycích vrstev, uzavřenosti struktury a aktivity vodního zápolí. Geologický průzkum pro tento typ je značnou investicí, jelikož na rozdíl od ložiskových zásobníků se náklady na tento průzkum nezaplátí těžbou dané suroviny. Pokud hermetičnost nelze výzkumem prokázat, je ověřena vtlačení plynů. Nicméně, pokud existuje vhodná struktura a podmínky pro vytvoření toho typu zásobníku, je aquifer schopný dosáhnout poměrně velké kapacity i výkonu. Pro porovnání v tabulce (tabulka 2-1) lze vidět základní parametry zásobníků ve vytěžených ložiscích a v aquiferech. (Svoboda aj, 1997, s. 236)

Tabulka 2-1: Základní parametry zásobníku ve vytěženém ložisku a aquiferu (Zákopčan, 2003)

	Ve vytěžených ložiscích	V aquiferech
Hloubka [m]	1000–1200	800–1000
Mocnost [m]	20–80	20–150
Porozita [%]	10–30	10–30
Propustnost [mD]	5–150	0,1–150

Aquiferový zásobník funguje obvykle ve vodním režimu, při vtlačení se vytváří plynová bublina, šíření plynu ve zvodnělé vrstvě lze vidět na obrázku níže (obrázek 2-1). Na rozdíl od plynových ložisek, kde tvorba těchto ložisek trvala několik statisíců let, se v aquiferu vytváří plynová bublina pouze několik let. (Svoboda aj, 1997, s. 236)



Obrázek 2-1: Šíření plynu ve zvodnělé vrstvě (Zákopčan, 2003)

2.3 Kavernové zásobníky

Většina těchto zásobníků ve světě je solná. Mají poměrně vysokou provozní spolehlivost a krátkou dobu potřebnou pro změnu provozního režimu (vtlačení/těžba). Vzhledem k výše uvedeným

faktům, mají tyto zásobníky lepší technické a ekonomické vlastnosti oproti ostatním typům zásobníků, ale dosahují obecně menších kapacit. (Svoboda aj, 1997, s. 247–249)

Při budování toho typu zásobníku je kladen důraz na minimální hloubku 500 m z důvodu ekonomicky výhodného provozního tlaku. Kromě dalších základních parametrů jsou při navrhování zásobníku zkoumány podrobněji stabilitní poměry a celkový charakter horninového prostředí. Podmínky pro vznik zásobníku jsou tedy ještě rozšířeny o prostupnost horniny pro vodu a maximální ložiskový tlak, který zde ale není přímo úměrný hydrostatickému tlaku v dané úrovni zásobníku. Stanoví se tedy pomocí hydrodynamické analýzy. (Svoboda aj, 1997, s. 247–249)

Kavernové zásobníky vzniklé v důlních prostorech jsou nákladově výhodnější, nicméně ložiskový tlak zde dosahuje maximálně 3 MPa. U nově vyražených zásobníků jsou pořizovací náklady vyšší, ty jsou však kompenzovány vysokým ložiskovým tlakem zásobníku. (Svoboda aj, 1997, s. 247–249)

Samotný skladovací prostor skalní kaverny je tvořen sítí propojených chodeb. Tlaková uzávěra, která odděluje přístupové cesty k zásobníku, je nepropustná, musí zajistit vytvoření vodní bariéry v prostoru přístupových cest a jejich okolí a dále obsahuje kontrolní systém, který sleduje chování uzávěry během provozu. Vodní bariéra je tlakově regulovatelná v závislosti na tlaku uvnitř zásobníku. (Svoboda aj, 1997, s. 247–249)

2.4 PZP Háje

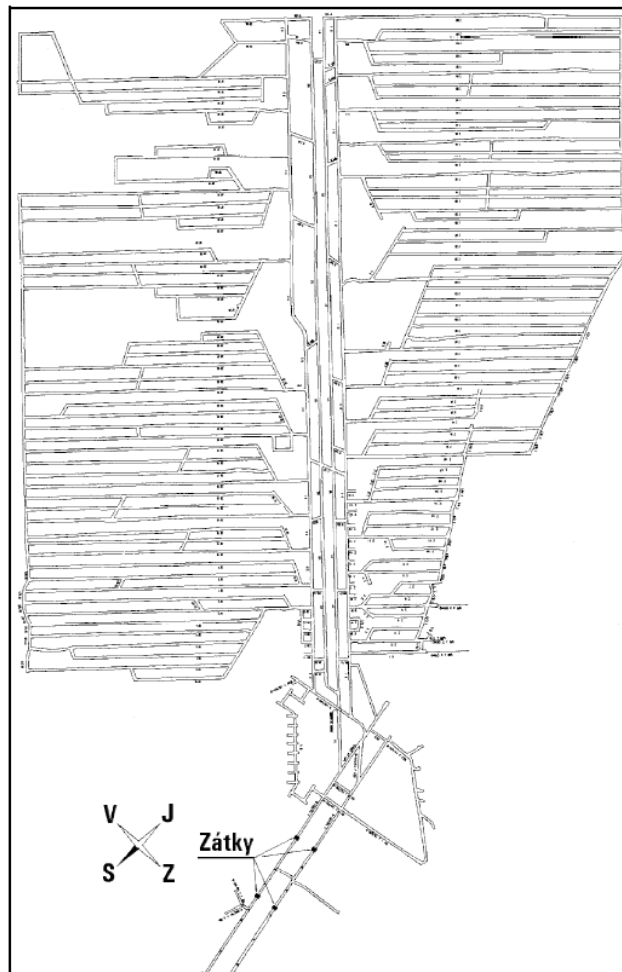
Tento kavernový zásobník, který se nachází v Příbrami, je vůbec prvním komerčně využívaným zásobníkem v tvrdých horninách. Hlavním účelem PZP Háje je vykrytí špiček ve spotřebě zemního plynu v Praze a Středočeském kraji. (RWE, 2020)

2.4.1 Historie

Vzhledem k tomu, že v Praze ani Středočeském kraji neexistují žádné vhodné sedimentární struktury, bylo potřeba přejít ke kavernovým typům zásobníků. V roce 1979 začal Plynoprojekt s.p. Praha výzkum, který se zabýval ukládáním zemního plynu ve vyražených kavernových zásobnících v místech, kde pro to nebyly vhodné porézní struktury. Nejvhodnější místo byla struktura středočeského plutonu, která se nachází 70-80 km od Prahy. První zkušební kaverna Bohutín byla vybudována v roce 1980 v hloubce 760 m, která byla tlakována vodou do 7,6 MPa. O čtyři roky později byla otestována druhá zkušební kaverna Milín, která byla v hloubce 511 m, tlakováním vzduchem do 7,5 MPa. Z výsledků zkušebních kavern došlo k rozhodnutí, že kavernový zásobník bude vystavěn v hloubce 1000 m v rudní oblasti v okolí Příbrami. Stavba zásobníku, včetně následných zkoušek, byla dokončena v roce 1998. Poprvé byl zemní plyn vpuštěn do skladovacího prostoru 14. 7. 1998. (Svoboda aj, 1997, s. 250; RWE, 2020)

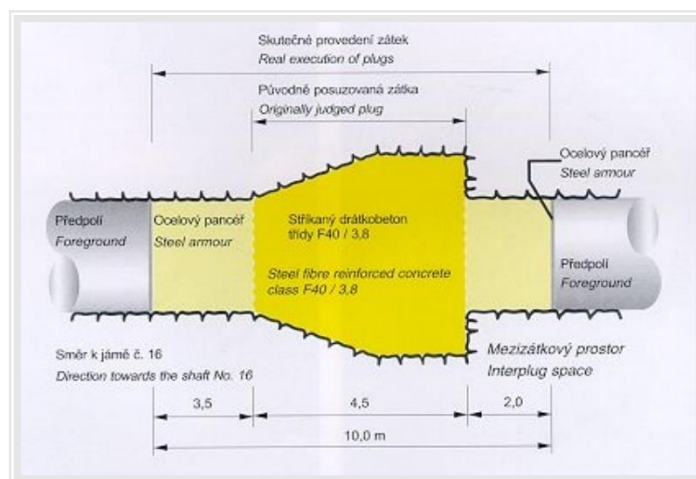
2.4.2 Struktura

Skladovací prostor zásobníku se nachází v granodioritové struktuře středočeského plutonu. Skládá se ze soustavy chodeb s profilem 12–15 m² a celkovou délkou asi 45 km, které byly vyraženy v jednom horizontu se spádem 5 ‰. Tyto chodby byly vyztuženy pouze v místech, kde hrozilo zavalení, jinak jsou ponechány bez úpravy. Na jednom konci (ve hloubce 961 m) ústí pět těžebních sond, druhý konec (v hloubce 955 m) je vzdálený od prvního 1350 m. Celkový objem skladovacího prostoru je 620 000 m³ s ložiskovým tlakem 9,5–12,5 MPa na ploše asi 1,5 km². Na obrázku níže (obrázek 2-2) je zobrazeno schéma chodeb tohoto zásobníku. (RWE, 2020; Svoboda aj, 1997, s. 252)



Obrázek 2-2: Schéma PZP Háje (Svoboda aj, 1997, s. 251)

Součástí jsou také čtyři tlakové drátkobetonové zátky, tedy pro každý dopravní překop dvě (obrázek 2-2). Každá je dlouhá 10 m, ve střední části je po celém obvodu kuželově zapuštěná na 1,2 m do okolní horniny a je z obou stran ohraničená ocelovým pancířem (obrázek 2-3). Z důvodu zvýšení nepropustnosti byla též provedena injektáž horninového okolí. Mezizátkový prostor je zatopen pomocí zavodňovacích vrtů vodou za účelem vytvoření tlakové vodní clony, která zaplazuje pukliny a trhliny v hornině, a tím působí proti tlaku plynu uvnitř zásobníku. (RWE, 2020; Svoboda aj, 1997, s. 252)



Obrázek 2-3: Schéma provedení zátek PZP Háje (Zákopčan, 2003)

V nejhlubší části je zaveden odvodňovací vrt, kam stéká veškerá voda ze zásobníku, která se nadále pomocí čerpadla a čerpacích trubek odčerpává ze zásobníku. V celé oblasti se též nachází lokální seismická síť, která se skládá ze sedmi monitorovacích stanic, a plynometrická síť, která monitoruje obsah methanu v půdních vrstvách. (RWE,2020)

Nadzemní část se skládá především ze struktur, které zajišťují úpravu a transport zemního plynu a řízení provozu zásobníku. V případě vtlačení se plyn nejdříve předeřeje, poté dochází k redukci jeho tlaku tak, aby odpovídal aktuálnímu tlaku v zásobníku, a na závěr se změní ještě jeho množství. Pokud není možné vtlačet plyn vlastním tlakem plynovodu, je veden do kompresorovny a popřípadě je na závěr ochlazen. V případě těžby dochází nejdříve k očištění plynu od nečistot filtrací, poté se suší, hřeje, redukuje na tlak v plynovodech a měří se jeho množství. Řízení zásobníku probíhá buď lokálně pomocí akčních členů na rozvaděčích, nebo pomocí operátorského pracoviště na velínu. Druhý způsob řízení je rozdělen na individuální ovládání a automatické řízení. (RWE, 2020)

3 Citlivostní analýza vstupních dat

Objem plynu v zásobníku lze vypočítat pomocí stavové rovnice, ta má v současnosti několik desítek podob.

3.1 Stavové rovnice plynu

Nejjednodušší forma této rovnice je tzv. stavová rovnice ideálního plynu (3.1),

$$pV = nRT \quad (3.1)$$

kde p [Pa] je tlak plynu, V [m³] objem plynu, n [mol] molární množství plynu, R [Jmol⁻¹K⁻¹] molární plynová konstanta a T [K] termodynamická teplota plynu. Ideální plyn je myšlenkový model plynu, který obsahuje nekonečně malé částice, které mezi sebou vzájemně neinteragují. Tuto rovnici však lze použít jen pro tlaky blízké atmosférickému tlaku (0,1 MPa), v zásobníku se tlaky pohybují v řádu jednotek až desítek MPa. V plynárenství je častěji používaná jednotka množství plynu G (nebo také GIP) tzv. standardní metr krychlový (1 sm³ \cong 41,82859 mol), který odpovídá množství plynu, které vyplní 1 m³ za standardního tlaku (101,325 kPa) a teploty (15 °C). (Dake, 1998, s. 12)

Dalšími používanými rovnicemi jsou například van der Waalsova, Redlich-Kwongova či Peng-Robinsonova. Nejvyužívanější rovnice v plynárenství je tzv. stavová rovnice reálného plynu (3.2), kde oproti stavové rovnici ideálního plynu je navíc tzv. kompresibilitní faktor z [-], který je definován jako poměr mezi objemem ideálního a reálného plynu za konstantního tlaku a teploty, jedná se tedy o veličinu závislou na teplotě a tlaku. (Dake, 1998, s. 13; Svoboda aj, 1997, s. 125)

$$pV = nzRT \quad (3.2)$$

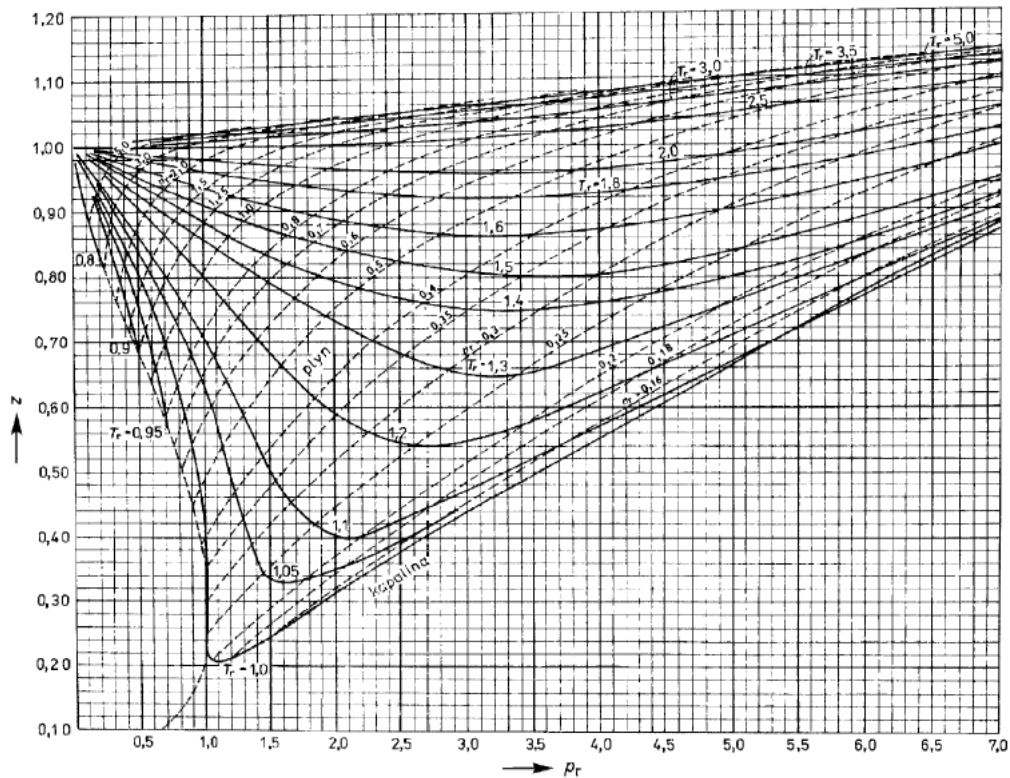
Kompresibilitní faktor (neboli z -faktor) má několik způsobů výpočtů, které vychází mimo jiné i z výše zmíněných rovnic. Například pro Redlich-Kwongovu rovnici lze kompresibilitní faktor zapsat pomocí vzorce (3.3) (veličiny ve vzorci jsou stejné jako výše, a a b jsou konstanty počítané pomocí tzv. kritických veličin). (Svoboda aj, 1997, s. 125)

$$z = \frac{V}{V-b} - \frac{a}{RT^{\frac{3}{2}}(V+b)} \quad (3.3)$$

Kompresibilitní faktor lze také získat z empirických vzorců. Docent Koza (Koza, 2004) uvádí například následující vzorec (3.4), kde P [MPa] je tlak plynu a T [K] termodynamická teplota plynu.

$$z = 1 - \frac{P \left(\frac{400}{T} - 1 \right)}{20} \quad (3.4)$$

Závislost z-faktoru na tlaku a teplotě zobrazuje tzv. Standing-Katzův diagram (obrázek 3-1), kde p_r (resp. T_r) je redukovaný tlak (resp. teplota). (Svoboda aj, 1997, s. 116)



Obrázek 3-1: Standing-Katzův diagram (Svoboda aj, 1997, s. 116)

Nejpřesnější a nejvyužívanější je rovnice AGA8-DC92 (3.5), která je speciálně vytvořena za účelem použití v plynárenství. Konkrétní vzorce a vysvětlení koeficientů této rovnice lze nalézt v Plynárenské příručce. (Svoboda aj, 1997, s. 127)

$$z = 1 + \frac{B}{K^3} d - d \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n d^{k_n}) d_{b_n} e^{-c_n d^{k_n}} \quad (3.5)$$

Pro přesné určení objemu v zásobníku Háje bylo potřeba se zabývat tím, jak velký vliv má změna jednotlivých členů rovnice (3.2) na výsledek. Vzhledem k rozsáhlosti analýzy jsou dále uváděny pouze vybrané grafy a závěry. Všechna data v této analýze byla zpracována pomocí softwaru MATLAB a byla z důvodu obchodního tajemství časově posunuta. Podrobnou analýzu dat včetně jmenovitých hodnot lze nalézt v technických zprávách, které jsou na přiloženém CD ve složce *Citlivostní analýza vstupních dat*.

3.2 Vliv složení na kompresibilitní faktor a přepočet tlaku na dně

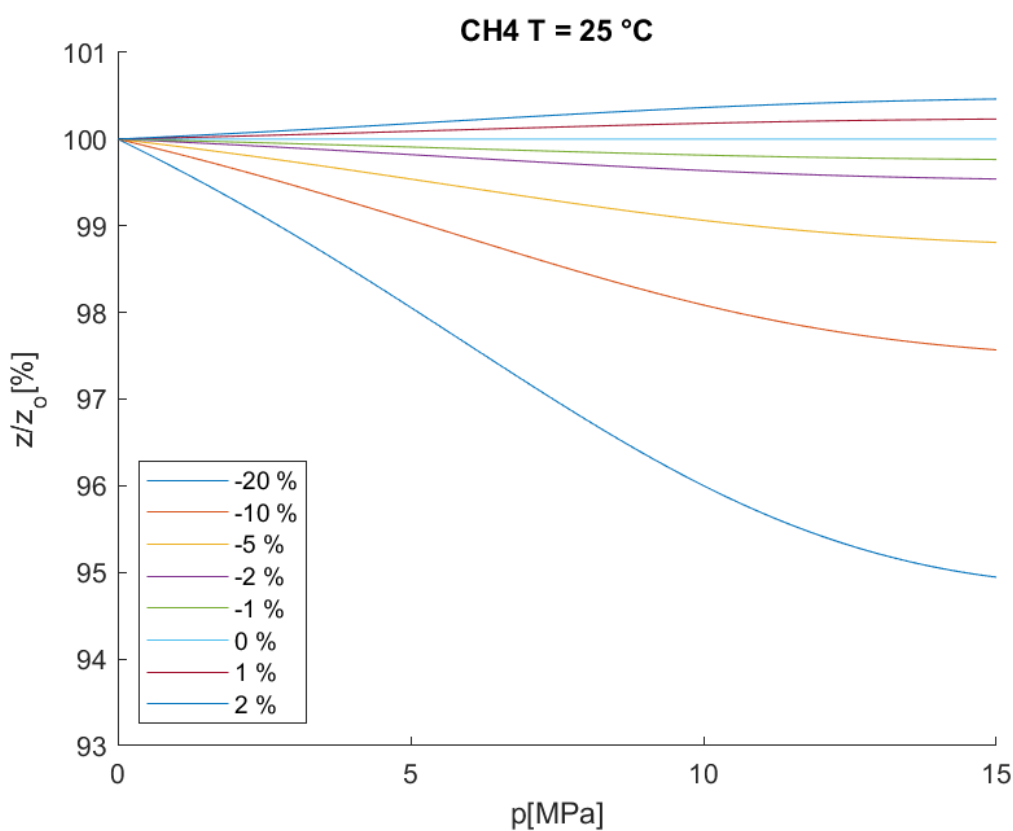
Kompresibilitní faktor je kromě tlaku a teploty závislý i na složení daného plynu. Pomocí programu *zfactor.exe* M. Dresslera (program počítající hodnotu z-faktoru v závislosti na teplotě, tlaku a složení plynu) byly vypočteny kompresibilitní faktory pro různé teploty a složení plynu v rozsahu tlaků 0 až 15 MPa s krokem 0,1 MPa. Analýza je rozdělena na dvě části, v první části

docházelo ke změně 3 nejvýznamnějších komponent (methan, ethan, dusík) zemního plynu za konstantní teploty 25 °C, v druhé části docházelo ke změně methanu, ethanu, propanu, butanu, dusíku, kyslíku a oxidu uhličitého při různých teplotách v rozsahu 10 až 40 °C s krokem 5 °C. Jako výchozí bylo bráno složení, které odpovídá plynu importovaného z Ruska (tabulka 2-1). Každá komponenta byla změněna o $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ a $\pm 20\%$ ze svého základu se zachováním původního poměru zbylých komponent.

Tabulka 3-1: Složení ruského plynu [% obj]

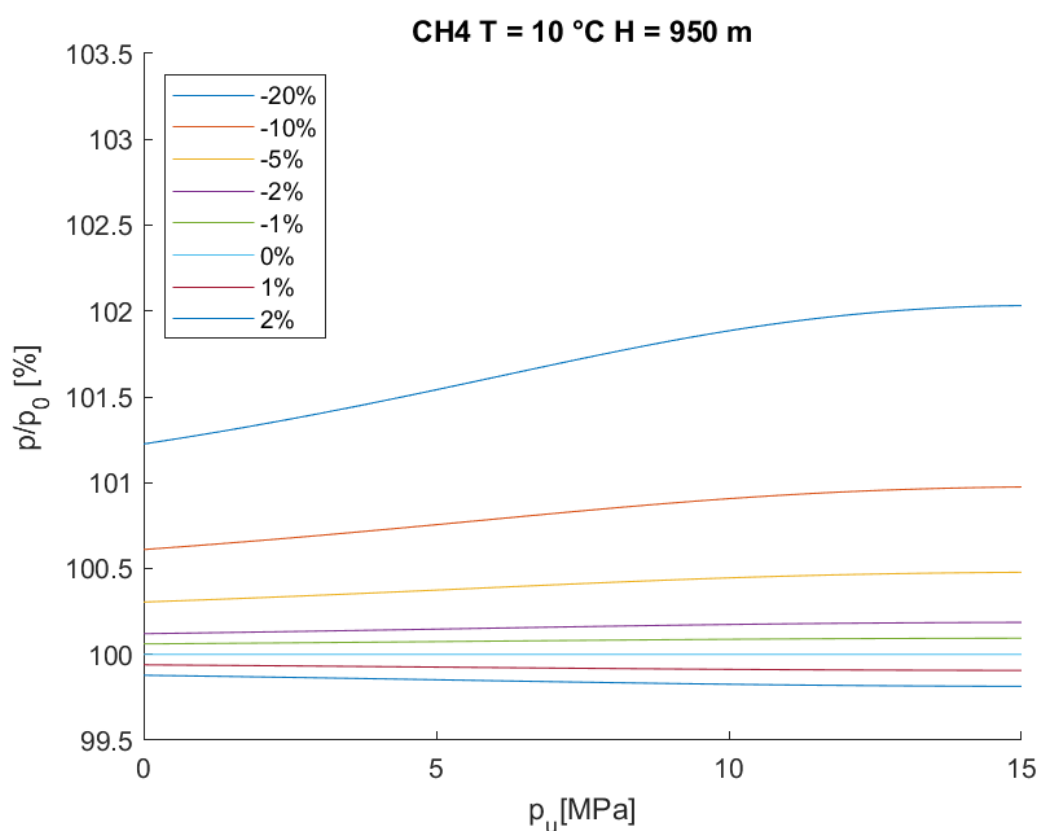
methan	ethan	propan	butan	vodík	dusík	kyslík	oxid uhelnatý	oxid uhličitý
97,59 %	0,78 %	0,35 %	0,03 %	0,00 %	1,09 %	0,01 %	0,00 %	0,15 %

Z analýzy vyplývá, že největší změnu kompresibilitního faktoru způsobila změna methanu při teplotě 10 °C (s klesající teplotou rozdíly rostou), kde se maximální relativní odchylka kompresibilitního faktoru plynu se změněným množstvím od ruského plynu pohybovala kolem 6,5 %. Vzhledem k tomu, že teplota se pohybuje v PZP Hájce v rozmezí 20 až 30 °C, jsou změny kompresibilitního faktoru menší (graf 3-1).



Graf 3-1: Relativní hodnoty kompresibilitního faktoru při teplotě 25 °C

Složení má také vliv na výpočet tlaku na dně zásobníku, který je závislý na hloubce zásobníku, tlaku na ústí, teplotě na ústí a teplotě na dně. Pomocí programu *zustinadno.exe* (interní program přepočítávající tlak na dně v závislosti na veličinách zmíněných výše) byly vypočteny tlaky pro různé hloubky v rozsahu 300 až 1500 m s krokem 100 m a složení plynu se měnilo obdobně jako při zkoumání kompresibilitního faktoru. Teplota na ústí byla stanovena na 10 °C, teplota na dně byla určena pomocí teplotního gradientu 25 °C/km, tlak na ústí byl v rozsahu 0 až 15 MPa s krokem 0,1 MPa. Největší změna tlaku se projevila opět při změně methanu pro hloubku 1500 m (s větší hloubkou rozdíly narůstají), kde relativní odchylka tlaku modifikovaného plynu a ruského plynu byla v maximu kolem 3 %. Vzhledem k tomu, že v PZP Háje je v hloubce asi 950 m, jsou změny tlaku na dně menší (graf 3-2).

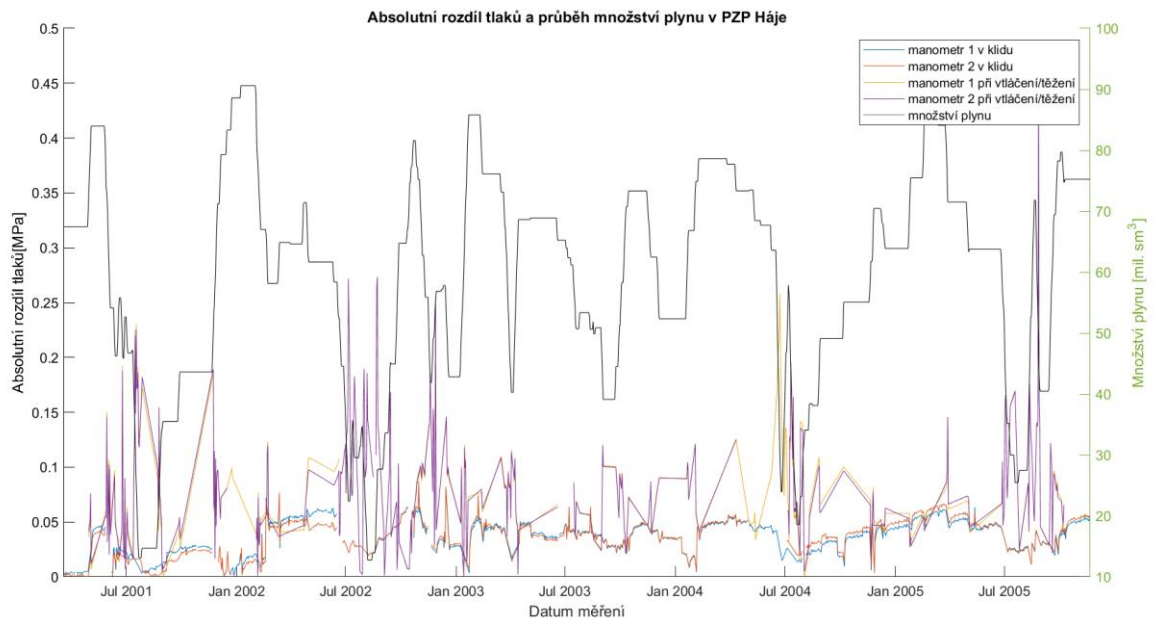


Graf 3-2: Relativní hodnoty tlaku na dně v hloubce 950 m a při teplotě na ústí 10 °C.

Z této analýzy vyplývá, že složení plynu má nezanedbatelný vliv na výsledek. Maximální odchylky lze díky relativnosti vztáhnout i na objem plynu, kde tedy dosahovaly pro parametry PZP Háje maximálně 5 %, což odpovídá při skladovacím objemu 620 000 m³ odchylce ± 31 000 m³.

3.3 Porovnání naměřených a vypočtených tlaků

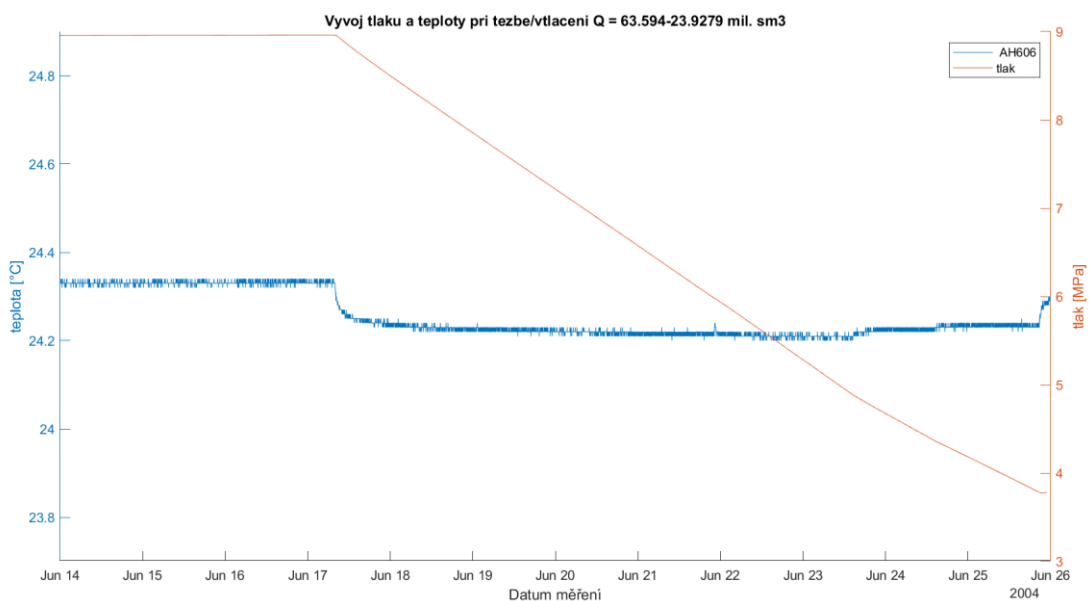
Za účelem zjištění současné přesnosti vypočtených tlaků byla provedena porovnání tlaků přepočtených pomocí programu *zustinadno.exe* a naměřených pomocí manometrů. V grafu (graf 3-3) jsou uvedeny rozdíly těchto tlaků v souvislosti s množstvím plynu v zásobníku. Z grafu vyplývá, že jsou odchylky statických tlaků podstatně nižší než u těch dynamických. Největší odchylka dosahuje 0,5 MPa, nicméně většina se pohybuje kolem 0,06 MPa.



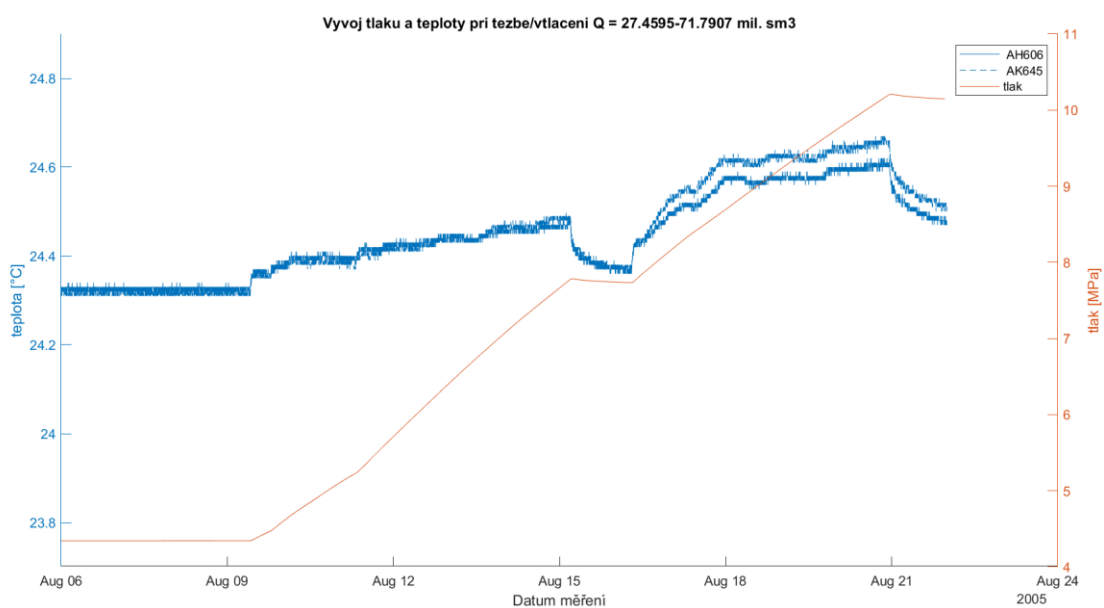
Graf 3-3: Absolutní rozdíl tlaků naměřených a vypočtených

3.4 Teplotní odchylky při vtláčení/těžbě plynu

Tato kapitola se věnuje teplotním odchylkám při vtláčení a těžbě plynu. Pro analýzu byly vybrány takové úseky, kde docházelo k intenzivní změně množství plynu, v grafech je tato změna zobrazena pomocí tlaku. Z grafů (graf 3-5 a graf 3-4) vyplývá, že při těžbě (resp. vtláčení) došlo k mírnému poklesu (resp. nárůstu) teploty, která se po ukončení procesu téměř navrátila do původního hodnoty. I v průběhu těžby/vtláčení můžeme považovat teplotu za konstantní, jelikož stavová rovnice obsahuje termodynamickou teplotu, která je oproti Celsiově stupnici posunuta o 273,15 K ($^{\circ}\text{C}$), změna teploty v řádu jednotek desetín $^{\circ}\text{C}$ je tedy v kontextu termodynamické teploty zanedbatelná (např. změna teploty o $0,35^{\circ}\text{C}$ odpovídá relativní změně objemu přibližně o 0,1%).



Graf 3-5: Vývoj teploty a tlaku při intenzivní těžbě plynu



Graf 3-4: Vývoj teploty a tlaku při intenzivním vtláčení plynu

3.5 Korekce měrné skladovací kapacity

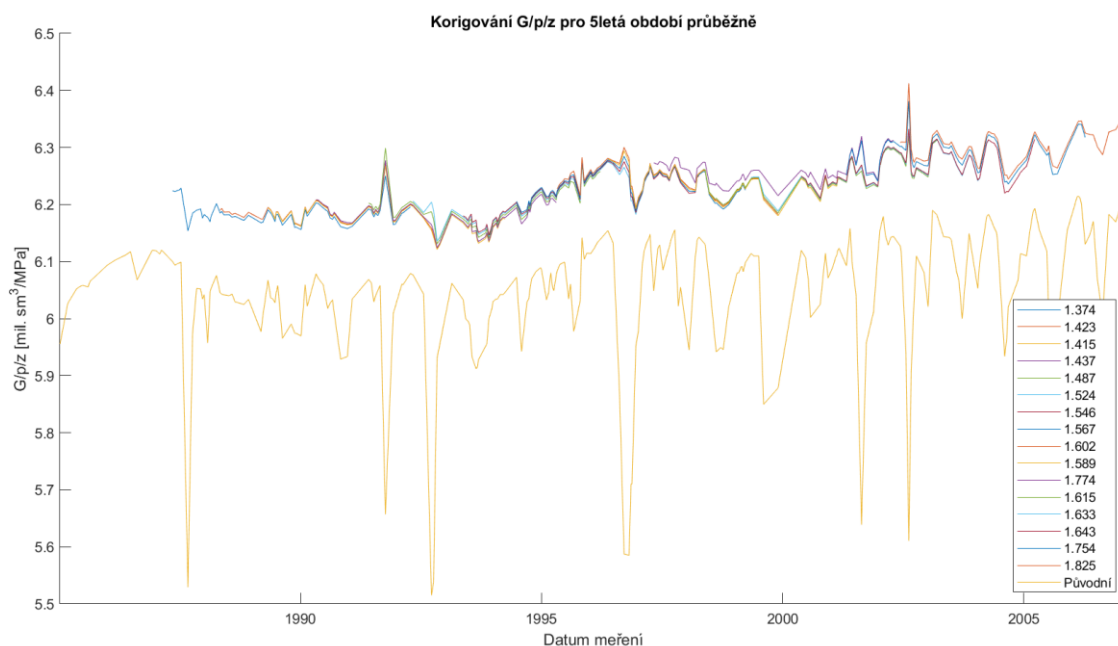
Měrná skladovací kapacita $G/p/z$ (veličina udávající, jaké množství plynu lze uložit při jednotkové změně redukovaného tlaku p/z) je v čase proměnná, to může být dle (3.6) vysvětleno buď změnou teploty nebo objemu (A je součin plynové konstanty R a konstanty přepočítávající množství plynu G na molární množství plynu n).

$$\frac{G}{\frac{p}{z}} = \frac{V}{AT} \quad (3.6)$$

Vzhledem k tomu, že teplota se v zásobníku téměř nemění (jak bylo zjištěno v kapitole 3.4), dochází ke změně měrné skladovací kapacity vlivem objemu (3.7) (výraz $\frac{1}{AT}$ lze tedy sloučit do jedné konstanty B).

$$\frac{G}{\frac{p}{z}} = BV \quad (3.7)$$

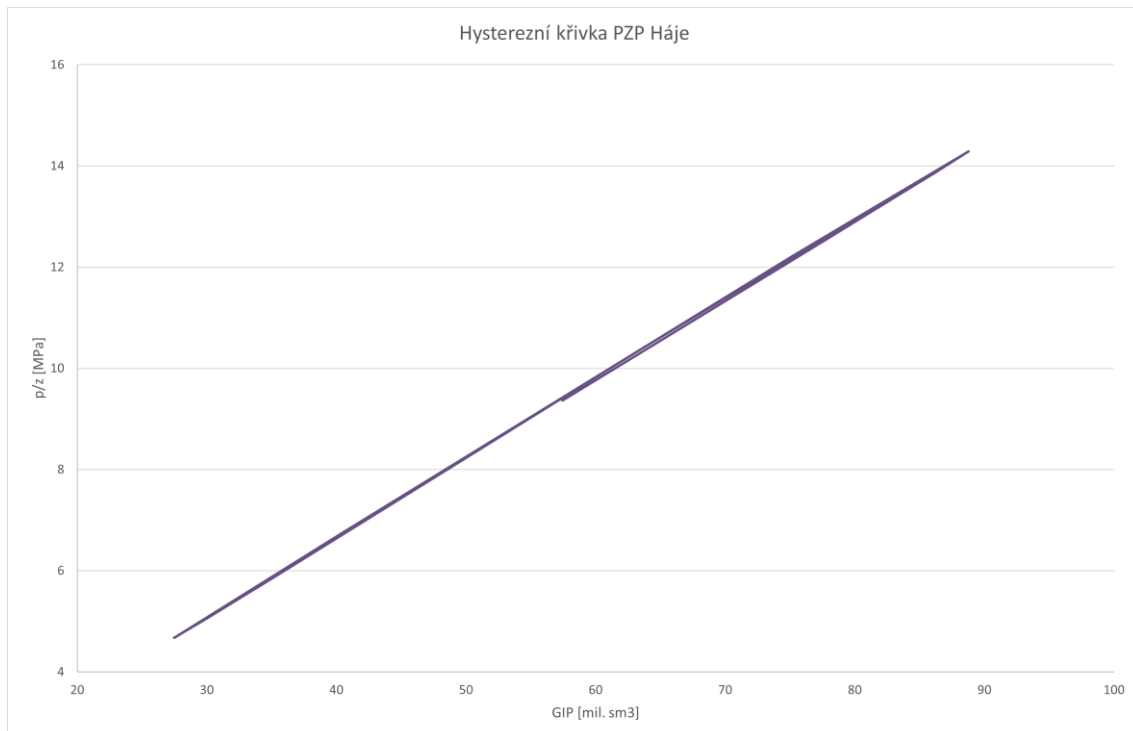
Hledalo se tedy takové množství plynu ΔG , které bylo třeba přičíst/odečíst k daným hodnotám, aby průběh měrné skladovací kapacity se konstantnímu průběhu blížil (V je neměnné). To bylo provedeno pomocí metody nejmenších čtverců. Analýza se skládá celkem ze tří částí, první část hledala ΔG pro celé období provozní historie, druhá část rozdělila toto období po pěti letech a třetí část ho rozdělila do průběžných pětiletých období. Nejzajímavější je poslední část analýzy, ze které vyplývá (graf 3-6), že měrná skladovací kapacita v čase narůstá, neboť se ΔG [mil. sm^3] (v legendě grafu) průběžně zvyšuje, s největší pravděpodobností dochází tedy k nárůstu objemu (při tlaku 8 MPa odpovídá změna objemu asi 19 000 m^3).



Graf 3-6: Vývoj korigované měrné skladovací kapacity pro průběžná pětiletá období

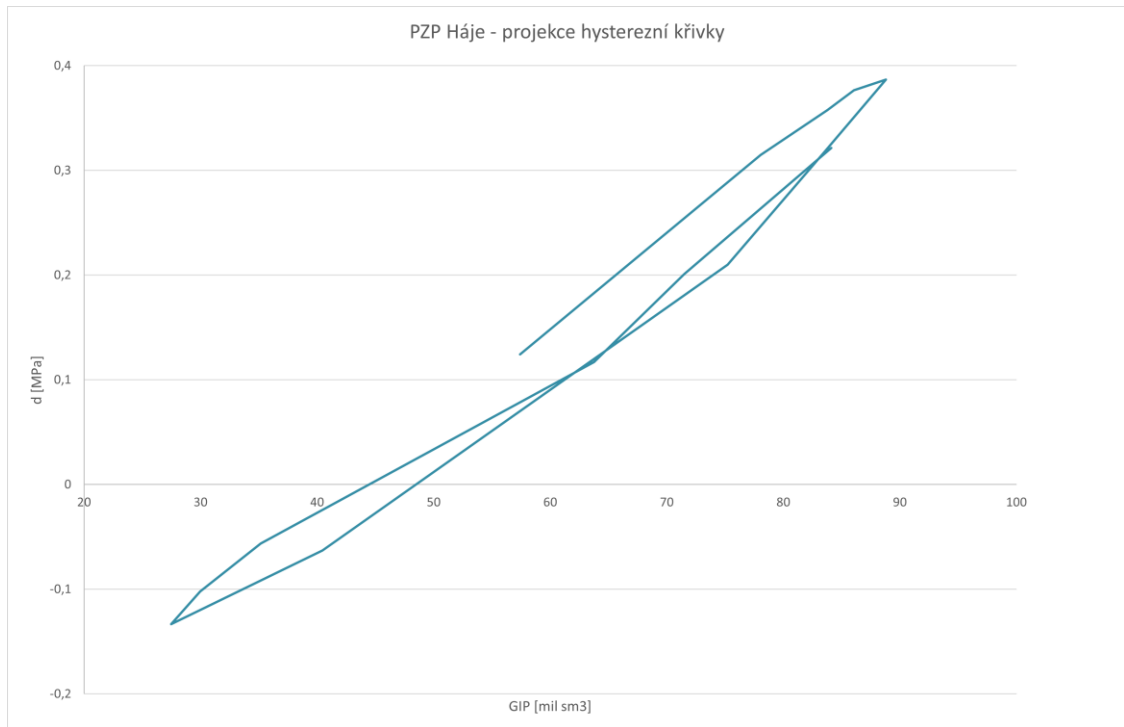
3.6 Provozní monitoring PZP Háje

Trend objemových změn zásobníku lze pozorovat v praxi dvěma hlavními způsoby, pomocí projekce tzv. hysterezní křivky, která vyjadřuje závislost tlaku p/z na množství plynu G (graf 3-7), nebo sledováním vývoje měrné skladovací kapacity $G/p/z$ (analýza v kapitole 3.5).



Graf 3-7: Hysterezní křivka PZP Háje

Vzhledem k tomu, že data hysterezní křivky téměř splývají s přímkou lineární funkce, nelze z dat vyčíst příliš mnoho informací. Používá se tedy její projekce, která vzniká odečtením lineárního trendu od dané hysterezní křivky (proložením dat lineární funkcí metodou nejmenších čtverců vznikají nové teoretické hodnoty p/z , které se následně odečtou od hodnoty p/z původní, daný rozdíl se značí d). Pokud mají vzniklé body narůstající trend v čase, dochází ke zvětšování objemu (graf 3-8), tuto změnu d v čase pak lze přepočítat na změnu množství plynu v zásobníku vydělením d směrnici dané lineární funkce, změna objemu je vypočtena dosazením do rovnice (3.6). (Severýn, 2012, s. 13–17)



Graf 3-8: Projekce hysterezní křivky PZP Háje

Ani jeden z těchto způsobů nicméně nedokáže přesně popsat, proč a jakým způsobem se aktivní objem mění, je tedy třeba vytvořit model zásobníku, který by byl schopný tyto změny popsat a zdůvodnit.

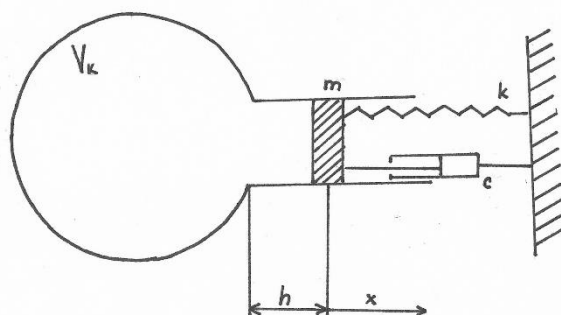
První simulátor využívaný v PZP Háje byl KavPool. Tento model, používaný především pro simulaci PZP v solných kavernách, simuluje výměny tepla mezi okolím a plynem u zásobníků, které jsou téměř dokonale hydraulicky izolované, je tedy pro využití v zásobníku v horninové struktuře podobné žule, kde podle analýz dochází k interakci plynu s puklinovým prostředím v okolí zásobníku a teplota plynu se mění minimálně (tedy nedochází k výrazné tepelné výměně), krajně nevhodný. Je tedy třeba vytvořit vlastní model, který by tento vliv interakce zohlednil, a naopak zanedbal tepelné výměny. Vzhledem k tomu, že o samotném prostředí kaverny (geometrie, velikost puklin atd.) není příliš mnoho informací, musí vzniknout bezrozměrný model, založený na obyčejných diferenciálních rovnicích. (Severýn, 2017; Severýn 2019)

4 Matematicko-fyzikální model změn aktivního objemu kaverny

Jak vyplývá z předchozí kapitoly 3, dochází v průběhu provozu zásobníku ke změnám aktivního objemu plynu, které nelze vysvětlit, pokud bude zásobník považován za tlakovou nádobu (s neměnným objemem). Jedním z možných důvodů změn objemu plynu může být interakce plynu s puklinovým prostředím v okolí zásobníku.

4.1 Fyzikální model

Kromě samotného prostoru zásobníku plyn vyplňuje i puklinové systémy v horninovém prostředí, nicméně je třeba vzít v úvahu, že dané pukliny jsou zvodnělé. Existuje zde tedy rozhraní voda-plyn. Plyn vytlačuje vodu z puklin směrem vzhůru, ta pak klade odpor vůči posunu rozhraní vlivem viskozity a třením o stěny, objevují se zde i projevy kapilarity. Aby vliv tohoto rozhraní bylo možné co nejlépe popsat, je nahrazeno fyzikálním modelem pístu se třením (resp. tlumením) a pružinou (obrázek 4-1).



Obrázek 4-1: Schéma fyzikálního modelu pístu se třením v zásobníku; V_k – vlastní objem zásobníku, m – hmotnost pístu, k – tuhost pružiny, c – součinitel tlumení, h – výchozí poloha pístu, x – posunutí pístu (převzato od doc. Severýna)

Tento model se tedy skládá ze setrvačného (hmotnost), deformačního (pružina) a tlumícího (tlumič, resp. tření) členu, které pak lze popsat pomocí pohybové rovnice (4.1), kde m [kg] je hmotnost pístu, x [m] je poloha rozhraní voda-plyn, p [Pa] je tlak plynu, S [m²] je obsah průřezu pístu v rovině kolmé na x , F_p [N] je síla pružiny a F_o [N] je odporová síla vyvolaná třením pístu.

$$m\ddot{x} = pS - F_p - F_o \quad (4.1)$$

Sílu lineární pružiny lze popsat pomocí rovnice (4.2), kde h [m] je počáteční poloha pístu, x [m] posunutí pístu a k [Nm⁻¹] je tuhost pružiny. Odporová síla je vyjádřena jako lineární funkce rychlosti (4.3), kde c [Nm⁻¹s] je koeficient tlumení.

$$F_p = k(x + h) \quad (4.2)$$

$$F_o = c\dot{x} \quad (4.3)$$

Pro zjištění tlaku se použije stavová rovnice reálného plynu (4.4), kde p [Pa] je tlak plynu, V [m³] je objem plynu spočtený jako součet objemu zásobníku V_k a objemu plynu v puklinách (4.5), n [mol] je molární množství plynu, z [-] je kompresibilitní faktor, který je závislý na tlaku, R [Jmol⁻¹K⁻¹] je molární plynová konstanta a T [K] je termodynamická teplota, kterou považujeme za konstantní.

$$pV = nz(p)RT \quad (4.4)$$

$$V = V_k + S(x + h) \quad (4.5)$$

4.2 Matematický model

Dosazením posledních čtyř rovnic (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) do první (4.1) vzniká diferenciální rovnice druhého řádu (4.6), kterou lze převést substitucí na soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu (4.7) a (4.8), kde u představuje rychlost pístu.

$$m\ddot{x} = \frac{Snz(p)RT}{V_k + S(x + h)} - k(x + h) - c\dot{x} \quad (4.6)$$

$$\dot{x} = u \quad (4.7)$$

$$\dot{u} = \frac{1}{m} \frac{Snz(p)RT}{V_k + S(x + h)} - \frac{k}{m}(x + h) - \frac{c}{m}u \quad (4.8)$$

Úpravou rovnic vznikne soustava (4.9), (4.10), (4.11) a (4.12) pro čtyři neznámé (x, u, V, p).

$$\dot{u} = \frac{1}{m} \frac{Snz(p)RT}{V_k + S(x + h)} - \frac{k}{m}(x + h) - \frac{c}{m}u \quad (4.9)$$

$$\dot{x} = u \quad (4.10)$$

$$V = V_k + S(x + h) \quad (4.11)$$

$$p = \frac{nz(p)RT}{V} \quad (4.12)$$

4.3 Numerické řešení modelu

Model chování plynu v zásobníku byl aplikován v programu HaSim v programovacím jazyce Java (popis programu v kapitole 5). Soustava rovnic (4.7) a (4.8) je zde řešena pomocí explicitní čtyřbodové Runge-Kuttovy metody čtvrtého řádu neboli standardní RK metody (obrázek 4-2) (Flaherty, 2004). Čtyřbodová metoda byla zvolena z důvodu stability, zatímco u této metody je maximální dosažitelný čtvrtý řád, pro dosažení pátého řádu (resp. lepší stability) by bylo potřeba implementovat již metodu alespoň šestibodovou. Dalším důvodem pro zvolení této metody je nižší výpočetní náročnost z důvodu vysokého obsahu nulových hodnot v tabulce. Krok metody byl experimentálně stanoven na $h = 1$ s, tato hodnota kroku zaručuje velké rozpětí změn parametrů se zachováním stability metody, z hlediska rychlosti dějů v PZP je tento krok dostatečný.

Počáteční podmínky soustavy rovnic jsou určeny v konfiguračním souboru programu (kapitola 5.1.1).

0				
1/2	1/2			
1/2	0	1/2		
1	0	0	1	
	1/6	1/3	1/3	1/6

Obrázek 4-2: Butcherova tabulka pro standardní RK metodu čtvrtého řádu (Flaherty, 2004)

Kompresibilitní faktor je v programu počítán pomocí iterační metody (je vypočten pomocí tlaku z předchozího kroku). Program ho počítá podle vstupu uživatele, buď pomocí interpolace ze souboru, nebo pomocí programu *zfactor.exe*, který používá rovnici AGA8-DC92 (3.5). Pokud uživatel zvolí výpočet pomocí souboru, program v něm vyhledá dané tlaky (p_0, p_1), mezi kterými se nachází tlak (p), pro který hledáme hodnotu kompresibilitního faktoru (z), a jejich odpovídající kompresibilitní faktory (z_0, z_1), pomocí těchto hodnot pak provede interpolaci pomocí vzorce (4.13).

$$z = z_0 + \frac{(p - p_0)(z_1 - z_0)}{p_1 - p_0} \quad (4.13)$$

Vzhledem k tomu, že v modelu je počítáno s molárním množstvím plynu, zatímco vstupní soubor uvádí množství plynu (GIP) v jednotkách sm^3 , program toto množství přepočítává na molární množství plynu pomocí konstanty uvedené v konfiguračním souboru (kapitola 5.1.1). Podobným způsobem dochází k přepočtu teploty t [$^{\circ}\text{C}$] na termodynamickou teplotu T [K].

5 Realizace matematicko-fyzikálního modelu v programu HaSim

Program HaSim vyvinutý v rámci řešení této BP počítá časový průběh množství, tlaku, kompresibilitního faktoru a objemu plynu, rychlost pohybu a polohu rozhraní voda-plyn v zásobníku, na základě počátečních parametrů plynu v zásobníku a údajích o vtláčení či těžbě plynu. Matematický model, který je v tomto programu realizován je vysvětlen v kapitole 3.5.

5.1 Vstupní soubory

Vstupem programu jsou tři, resp. čtyři soubory. První konfigurační soubor ve formátu JSON obsahuje informace o počátečních parametrech. Druhý soubor nese informace o provozu PZP (vtláčení či těžba plynu), třetí pak o naměřených tlacích v zásobníku v simulovaném časovém období. Oba tyto soubory jsou ve formátu CSV. Volitelným vstupem programu je také CSV soubor obsahující kompresibilitní faktory pro dané tlaky, pokud se při komunikaci s programem název souboru vynechá, program počítá kompresibilitní faktor pomocí programu *zfactor.exe*. Všechny čísla v těchto souborech jsou zapsána dle IEEE 754 (s desetinnou tečkou) a řetězce dle konvencí Javy.

5.1.1 Konfigurační soubor

Soubor obsahuje dva objekty; zásobník („*Cavern*“) a simulace („*Simulation*“).

Objekt zásobníku má celkem šest parametrů (níže je v závorkách uveden jejich skutečný titulek v konfiguračním souboru a za pomlčkou odpovídající datový typ);

- objem zásobníku V_k [m³] („*Volume*“) – double
- počáteční tlak p_0 [MPa] („*InitPressure*“) – double
- počáteční teplota t [°C] („*InitTemperature*“) – double
- složení plynu („*InitComposition*“) – objekt
 - procentuální podíl methanu [%] („*CH4*“) – double
 - procentuální podíl ethanu [%] („*C2H6*“) – double
 - procentuální podíl oxidu uhličitého [%] („*CO2*“) – double
 - procentuální podíl dusíku [%] („*N2*“) – double
- počáteční poloha rozhraní voda-plyn x_0 [m] („*InitDisplacement*“) – double
- počáteční rychlost pohybu rozhraní voda-plyn \dot{x}_0 [ms⁻¹] („*InitVelocity*“) – double

Objekt simulace je popsán pomocí devíti parametrů;

- jméno souboru s provozními daty PZP („*Qfile*“) – String
- jméno souboru s naměřenými tlaky („*HistoryFile*“) – String
- jméno výstupního souboru („*OutputFile*“) – String
- konstanty simulace modelu („*Constants*“) – objekt

- univerzální plynová konstanta („ R “) – double
- konstanta převádějící GIP na molární množství („ $GIPtoN$ “) – double
- hmotnost pístu [kg] („ m “) – double
- plocha průřezu pístu [m²] („ S “) – double
- tuhost pružiny [Nm⁻¹] („ k “) – double
- výchozí umístění pístu [m] („ h “) – double
- koeficient tlumení [Nsm⁻¹] („ c “) – double

Konfigurační soubor může dle parametrů výše vypadat následovně.

```
{
  "Cavern": {
    "Volume": 6.4e+5,
    "InitPressure": 7.558154,
    "InitTemperature": 23.951,
    "InitComposition": {
      "CH4": 97.16,
      "C2H6": 1.38,
      "CO2": 0.34,
      "N2": 1.12
    },
    "InitDisplacement": 0.0,
    "InitVelocity": 0.0
  },
  "Simulation": {
    "Qfile": "provoz.csv",
    "HistoryFile": "tlaky.csv",
    "OutputFile": "simulace.csv",
    "Constants": {
      "R": 8.31446,
      "GIPtoN": 41.82859,
      "m": 100000.0,
      "S": 0.01,
      "k": 0.1,
      "h": 1000000.0,
      "c": 1000.0,
    }
  }
}
```

Obrázek 5-1: Ukázka konfiguračního souboru

5.1.2 Soubor s provozními daty PZP

Každý řádek reprezentuje jeden den provozu zásobníku, musí tedy obsahovat následující prvky oddělené středníkem:

- datum ve formátu dd.mm.yyyy – String
- množství plynu [sm³], které se v daný den vtlačelo (kladná hodnota) či těžilo (záporná hodnota) – long (celé číslo)

Soubor neobsahuje záhlaví a může vypadat například jako na obrázku níže (obrázek 5-2).

```
12.01.2004;0
13.01.2004;0
14.01.2004;0
15.01.2004;0
16.01.2004;0
17.01.2004;0
18.01.2004;0
19.01.2004;2895536
20.01.2004;3680455
21.01.2004;3395243
22.01.2004;3379695
23.01.2004;1128249
24.01.2004;0
```

Obrázek 5-2: Ukázka souboru s provozními daty PZP

5.1.3 Soubor s naměřenými tlaky

Tento soubor je obdoba souboru s provozními daty PZP s rozdílem, že místo množství plynu je uveden naměřený tlak [MPa] v daný den – double. Slouží především k porovnání skutečného a simulovaného tlaku při ladění a testování programu, pro výpočty budoucích průběhů se do budoucna může stát volitelným. Musí mít shodný první sloupec jako Qsoubor (musí se jednat o stejné časové období). Vzorová ukázka je na obrázku níže (obrázek 5-3).

```
12.01.2004;7.577664
13.01.2004;7.577664
14.01.2004;7.577664
15.01.2004;7.577664
16.01.2004;7.578748
17.01.2004;7.579833
18.01.2004;7.579833
19.01.2004;7.578748
20.01.2004;8.08842
21.01.2004;8.588715
22.01.2004;9.018734
23.01.2004;9.418535
24.01.2004;9.448962
```

Obrázek 5-3: Ukázka souboru s naměřenými tlaky

5.1.4 Volitelný soubor s kompresibilitními faktory

Každý řádek obsahuje:

- Tlak [MPa] – double
- Kompresibilitní faktor [-] – double

Hodnoty jsou oddělené středníkem. Tlaky musí být uvedeny vzestupně. Soubor nemá záhlaví a může vypadat jako na obrázku (obrázek 5-4).

```
0.100; 0.99815
0.200; 0.99630
0.300; 0.99445
0.400; 0.99261
0.500; 0.99077
0.600; 0.98894
0.700; 0.98711
0.800; 0.98528
0.900; 0.98346
1.000; 0.98164
1.100; 0.97982
1.200; 0.97801
1.300; 0.97620
1.400; 0.97440
1.500; 0.97261
```

Obrázek 5-4: Ukázka souboru s kompresibilitními faktory

5.2 Výstupní soubor

Výstupem programu je CSV soubor, který obsahuje časovou řadu množství, tlaku, objemu a kompresibilitního faktoru plynu, skutečný tlak plynu a rychlost a posunutí rozhraní voda-plyn.

Soubor obsahuje záhlaví a každý řádek má následující položky:

- Datum ve formátu dd.mm.yyyy (*date*)
- Množství plynu (*GIP*)
- Vypočtený tlak (*p_sim*)
- Naměřený tlak (*p_m*)
- Kompresibilitní faktor (*z*)
- Objem plynu (*V*)
- Rychlost pohybu rozhraní voda-plyn (*u*)
- Poloha rozhraní voda-plyn (*x*)

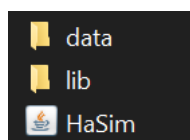
Všechny tyto prvky jsou odděleny středníkem. Soubor vypadá následovně (obrázek 5-5):

```
date; GIP[sm3]; p_sim[MPa]; p_m[MPa]; z[-]; V[m3]; u[m/s]; x[m]
24.12.2003; 5.428874e+07; 7.558; 7.558; 0.876; 6.500000e+05; 0.000000e+00; 0
25.12.2003; 5.428874e+07; 7.586; 7.558; 0.876; 6.475867e+05; -3.641330e-03; -241332
26.12.2003; 5.428874e+07; 7.586; 7.559; 0.875; 6.475833e+05; -5.168905e-06; -241675
27.12.2003; 5.428874e+07; 7.583; 7.560; 0.875; 6.475832e+05; -1.367159e-08; -241676
28.12.2003; 5.428874e+07; 7.583; 7.559; 0.875; 6.475836e+05; 5.166588e-07; -241642
29.12.2003; 5.428874e+07; 7.584; 7.561; 0.875; 6.475836e+05; 7.537885e-11; -241642
30.12.2003; 5.428874e+07; 7.584; 7.561; 0.875; 6.475836e+05; -5.166610e-08; -241645
31.12.2003; 5.428874e+07; 7.584; 7.560; 0.875; 6.475836e+05; -1.426637e-11; -241645
01.01.2004; 5.428874e+07; 7.584; 7.562; 0.875; 6.475836e+05; -1.426637e-11; -241645
02.01.2004; 5.428874e+07; 7.584; 7.562; 0.875; 6.475836e+05; -1.426637e-11; -241645
03.01.2004; 5.428874e+07; 7.584; 7.564; 0.875; 6.475836e+05; -1.426637e-11; -241645
04.01.2004; 5.428874e+07; 7.584; 7.562; 0.875; 6.475836e+05; -1.426637e-11; -241645
```

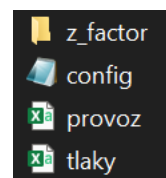
Obrázek 5-5: Ukázka výstupního souboru

5.3 Instalace a použití programu

Pro úspěšné spuštění programu je třeba mít v jedné složce (obrázek 5-7) soubor *HaSim.jar*, složku *lib* s externí knihovnou (soubor *json-simple-x*), složku *data* (obrázek 5-6) se všemi vstupními soubory a složkou *z_factor* s programem *zfactor.exe*.



Obrázek 5-7: Povinné soubory pro spuštění programu



Obrázek 5-6: Povinné soubory ve složce data

Po spuštění programu v příkazovém řádku je třeba zadat název konfiguračního souboru včetně jeho přípony. Následně je uživatel vyzván k zadání názvu souboru s kompresibilitními faktory (obrázek 5-8), pokud název uživatel nezadá, počítají se kompresibilitní faktory pomocí programu *zfactor.exe* (obrázek 5-9). Program je ukončen hláškou o vytvoření souboru a jeho umístění. Program je také možné spustit přidáním parametrů příkazového řádku (obrázek 5-10) (pokud je zadán pouze konfigurační soubor, program počítá kompresibilitní faktory pomocí *zfactor.exe*).

```
java -jar "HaSim.jar"
Name of the config file:
config20.json
Name of the Zfile (leave blank for using z-factor.exe):
zData.csv
File successfully created ( \test\data\simulace2020.csv)
```

Obrázek 5-8: Ukázka komunikace s programem bez využití *zfactor.exe*

```
java -jar "HaSim.jar"
Name of the config file:
config20.json
Name of the Zfile (leave blank for using z-factor.exe):
File successfully created ( \test\data\simulace2020.csv)
```

Obrázek 5-9: Ukázka komunikace s programem s použitím *zfactor.exe*

```
test>java -jar HaSim.jar config.json
File successfully created ( test\data\simulace.csv)
```

Obrázek 5-10: Ukázka komunikace s programem pomocí parametru příkazového řádku

5.4 Programová dokumentace

Program je vytvořen ve vývojovém prostředí *NetBeans IDE 8.2* a skládá se ze tří balíčku (*ui,app,utils*).

V balíčku *ui* je vstupní metoda.

Druhý balíček *app* obsahuje třídy *ConfigData*, která slouží k uchování dat z konfiguračního souboru, *DateGIP*, uchovávající data z Qsouboru, *Sim*, která zpracovává data, řídí datové toky souborů a počítá navržený model, *SimInterface* slouží jako základ pro tvorbu rozhraní.

Třetí balíček *utils* obsahuje tři třídy. *CsvHandler* načítá (pomocí třídy *Scanner*) a vytváří (pomocí třídy *BufferedWriter*) soubory ve formátu CSV. *JsonHandler* načítá soubory ve formátu JSON pomocí externí knihovny *JSON.simple* (YourKit, 2012). *ZFactorHandler* vypočítává kompresibilitní faktor dle volby uživatele (více v kapitole 4.3).

Podrobný popis metod jednotlivých tříd je dokumentován v kódu programu (vygenerovanou dokumentaci *javadoc* lze nalézt na doprovodném CD ve složce *HaSim/javadoc*).

6 Ladění a analýza parametrů modelu

Některé parametry soustavy rovnic (počáteční poloha pístu h , tuhost pružiny k , koeficient tlumení c , obsah průřezu pístu S , objem zásobníku V_k) byly uměle stanoveny a nelze je přesně určit z reálných parametrů skutečného zásobníku. Za účelem ověření funkčnosti modelu byly pomocí programu HaSim pro různé parametry simulovány tlaky (p_s), které byly dále porovnávány s tlaky naměřenými (p_m). Parametry byly testovány na období v letech 2003 až 2005 (data jsou z důvodu obchodního tajemství časově posunuta). Každý parametr byl analyzován odděleně, ostatní parametry zůstávali zafixované, tedy například pro optimalizování hodnoty průřezu pístu byly ostatní hodnoty parametrů konstantní, optimalizovaná hodnota obsahu byla pak použita v analýzách dalších parametrů apod. V grafech jsou pro názornost uvedeny na ose y odchylky daných tlaků do 0,15 MPa (resp. 0,2 MPa u parametrů k a h), které jsou pro nás klíčové. Analýza je rozdělena na dvě části, analýza modelu bez puklinového prostředí a s vlivem puklinového prostředí. Pokud není řečeno jinak, byly parametry posuzovány především pomocí RMSE (z angl. „root-mean-square error“), který je obdobou směrodatné odchylky ve statistice. Všechny grafy v této kapitole byly zpracovány pomocí matematického softwaru MATLAB. V grafech níže lze vidět oblast kolem července 2004, kde jsou odchylky o něco vyšší (v jednom bodě dosáhla přes 0,5 MPa), to je způsobeno malým množstvím plynu v kaverně, kvůli kterému je model citlivý na změnu objemu.

Výstupní soubory včetně konfiguračních souborů programu jsou k dispozici na příloženém CD ve složce *Analýza parametrů modelu*.

6.1 Model bez puklinového prostředí

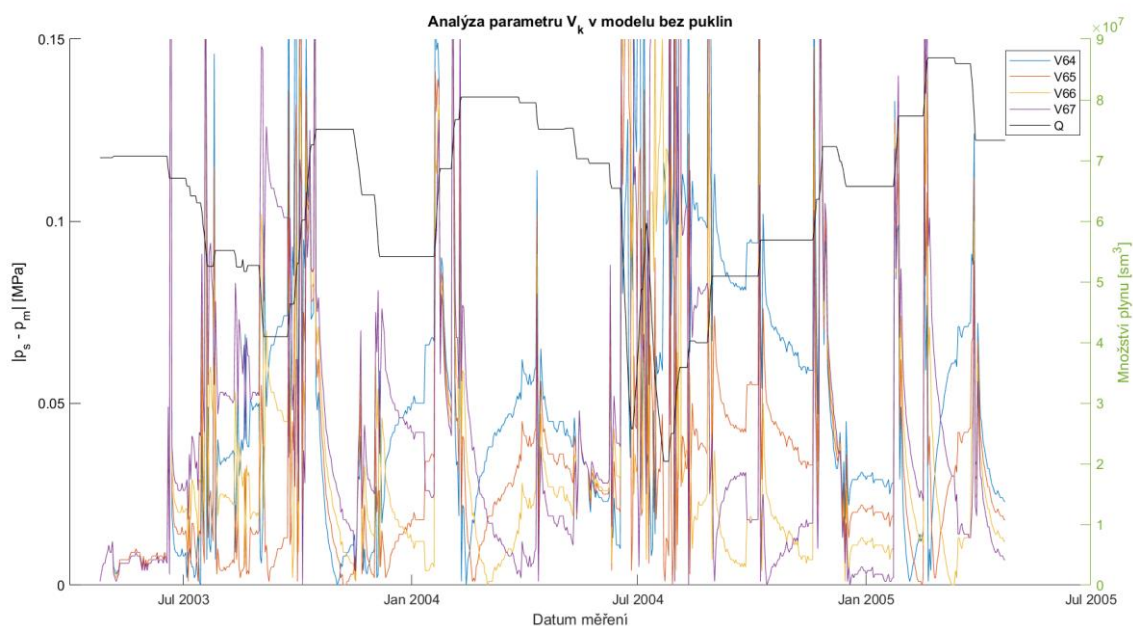
Z tabulky (tabulka 6-1) vyplývá, že v modelu lze potlačit vliv puklinového prostředí pomocí změny obsahu průřezu pístu. Pro analýzu byl zvolen obsah 10^{-5} m^2 , kde objem puklin je téměř nulový. Díky potlačení vlivu puklin je model závislý pouze na objemu kaverny, ten jsme volili v rozsahu 640 000 až 670 000 m^3 . Legenda grafu je zapsána ve tvaru VXX , kde XX je objem kaverny zapsaný ve tvaru $XX * 10^4 \text{ m}^3$. Z grafu (graf 6-1) a tabulky (tabulka 6-2) vyplývá, že nejlepší shoda tlaků je pro hodnotu objemu 650 000 m^3 .

Tabulka 6-1: Objem puklin pro různé S

$S [\text{m}^2]$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
$V_{puklin} [\text{m}^3]$	565049,86	8724,00	88,36	1,01	0,01

Tabulka 6-2: RMSE pro různé V_k

$V_k [\text{m}^3]$	640 000	650 000	660 000	670 000
RMSE [MPa]	0,068	0,053	0,056	0,072



Graf 6-1: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty V_k v modelu bez puklin

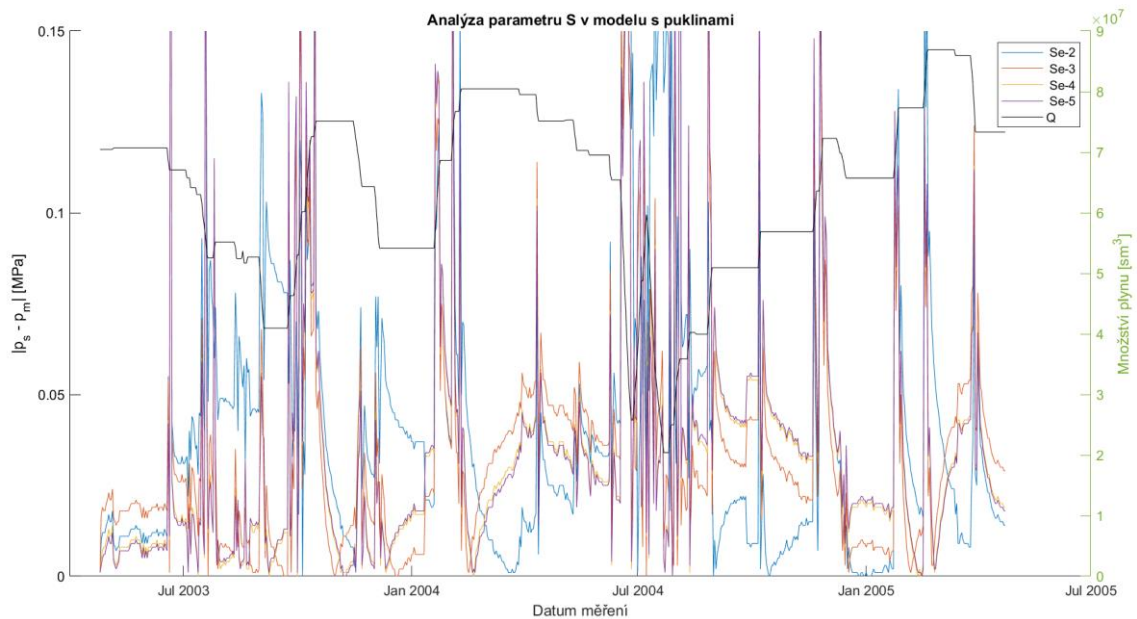
6.2 Model s puklinovým prostředím

6.2.1 Obsah průřezu pístu

Prvním zkoumaným parametrem byl obsah průřezu pístu S . Program byl testován pro hodnoty obsahu v rozsazích 10^{-1} až 10^{-5} m^2 , v grafu jsou v legendě hodnoty uvedeny pomocí S a vědecké notace. Z grafu (graf 6-2), ze kterého byl první testovaný parametr z důvodu velkých odchylek odebrán, a tabulky (tabulka 6-3) vyplývá, že až na první hodnotu mají všechny ostatní obsahy poměrně srovnatelné odchylky tlaků. Nicméně je třeba vzít v úvahu, že s nižším obsahem klesá i vliv puklinového prostředí na model. Pro nejmenší obsah je tedy vliv puklinového prostředí naprosto zanedbatelný, tento případ byl podrobně rozebrán v kapitole 6.1. Z dat vyplývá, že nejlepší shoda z hlediska objemu puklin, jejichž reálná hodnota se pohybuje v řádech tisíců až desetitisíců m^3 (Severýn, 2012, s. 23), je hodnota obsahu 10^{-2} m^2 .

Tabulka 6-3: RMSE tlaků a průměrný objem puklin pro různé S

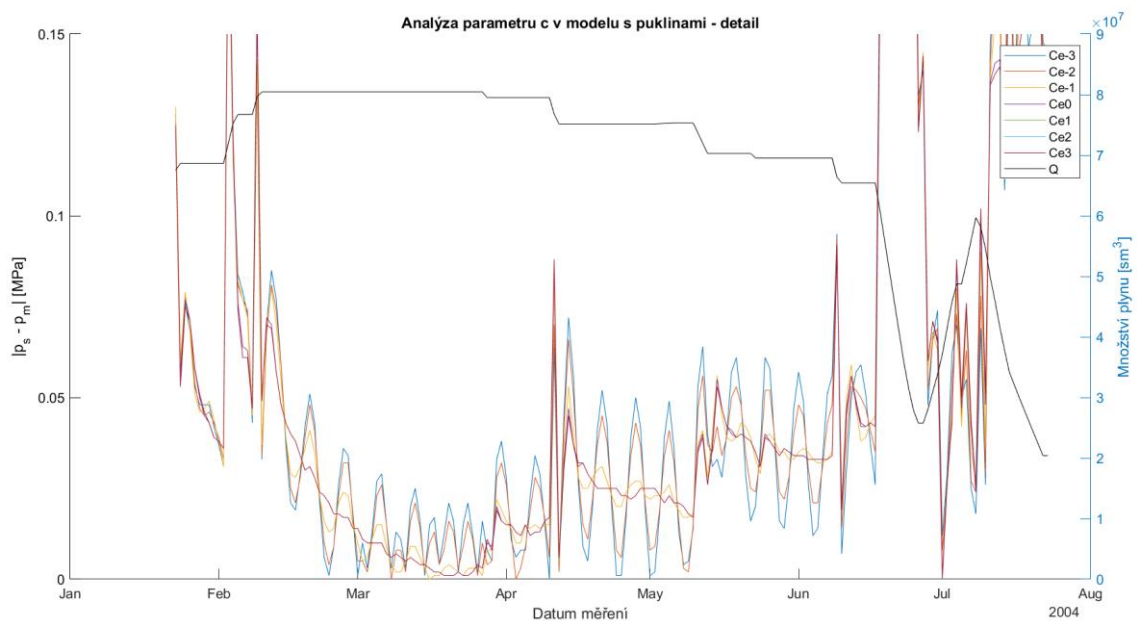
$S [m^2]$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
RMSE [MPa]	3,224	0,064	0,052	0,053	0,053
$V_{puklin} [m^3]$	565049,86	8724,00	88,36	1,01	0,01



Graf 6-2: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty S v modelu s puklinami

6.2.2 Koeficient tlumení

U analýzy koeficientu tlumení c byly zvoleny hodnoty v rozsahu 10^{-3} až 10^3 Nsm^{-1} . Zápisy legendy grafu je obdobný jako u analýzy obsahu. Z grafu (graf 6-3) vyplývá, že nižší hodnoty tohoto parametru pouze „zvlní“ odchylky tlaků, pro další analýzy byla tedy zvolena nejvyšší hodnota parametru 10^3 Nsm^{-1} .



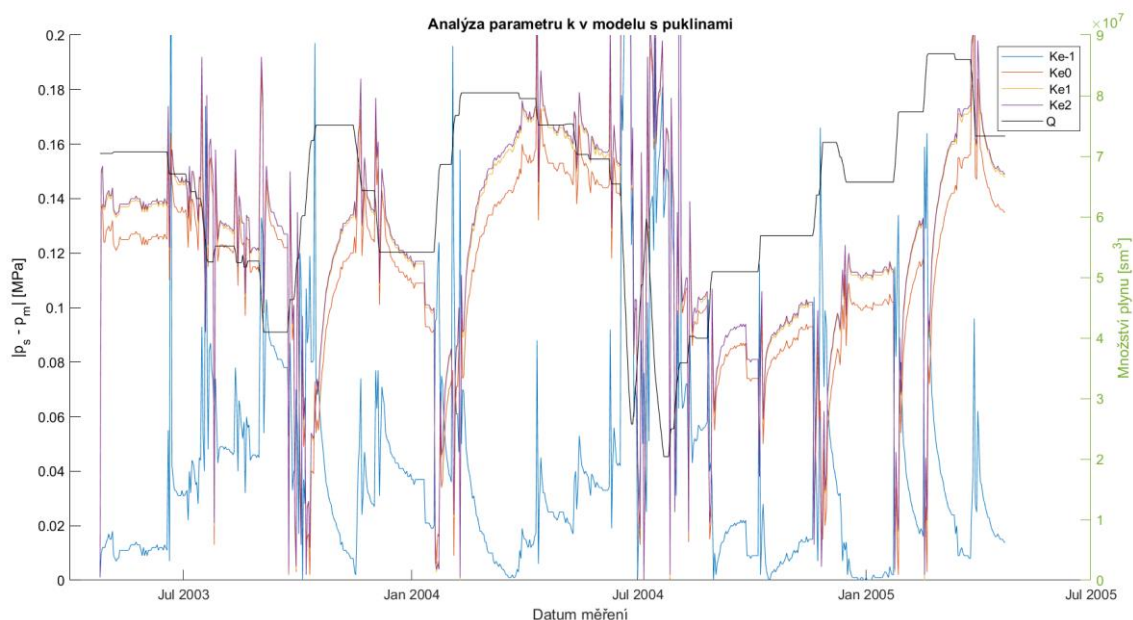
Graf 6-3: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty c v modelu s puklinami

6.2.3 Tuhost pružiny

Tuhost pružiny k byla analyzována v rozsahu 10^{-2} až 10^2 Nm^{-1} . Pomocí grafu (graf 6-4), ze kterého byla vynechána řada pro hodnotu 10^{-2} Nm^{-1} z důvodu velkých odchylek, a tabulky (tabulka 6-4) byla vybrána taková nejmenší hodnota tuhosti pružiny 10^{-1} Nm^{-1} , aby píst byl v každém časovém okamžiku v klidu. Tato hodnota zaručí, že píst bude v každém dni v ustáleném stavu a zároveň pružina neklade přílišný odpor změně polohy pístu.

Tabulka 6-4: Maximální rychlosti pístu pro různá k

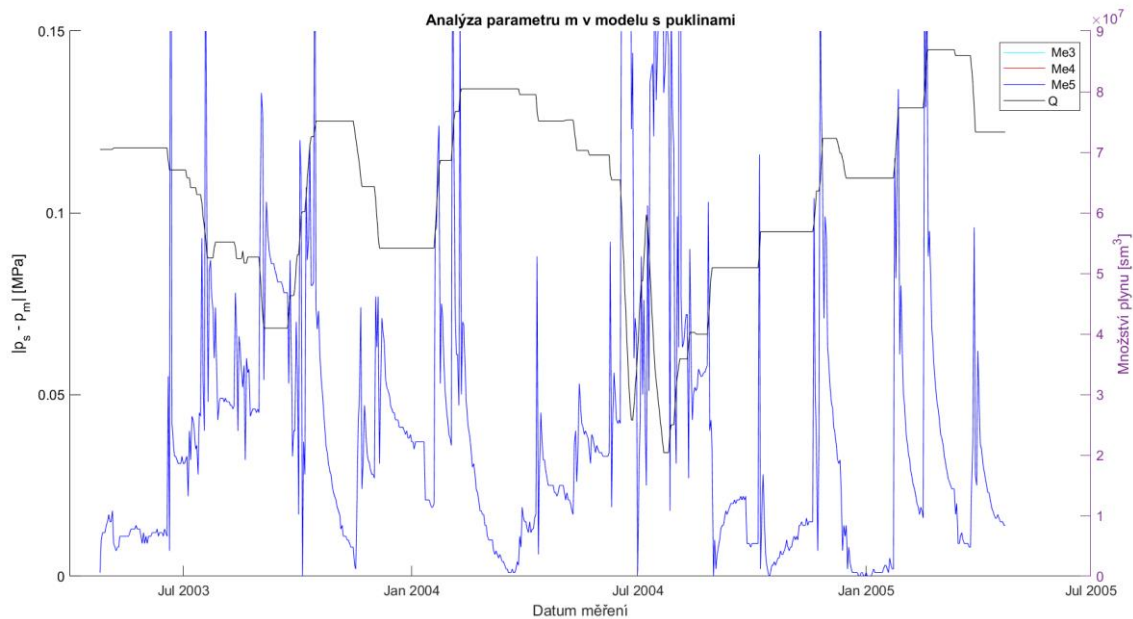
$k[\text{Nm}^{-1}]$	10^{-2}	10^{-1}	1	10^1	10^2
$u_{\max}[\text{ms}^{-1}]$	3,2e+1	1,0e-3	4,7e-11	5,8e-11	5,8e-11



Graf 6-4: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty k v modelu s puklinami

6.2.4 Hmotnost pístu

Hmotnost pístu byla testována pro hodnoty 10^3 až 10^5 kg . Z grafu (graf 6-5) vyplývá, že tento parametr simulaci v daném rozsahu neovlivňuje.



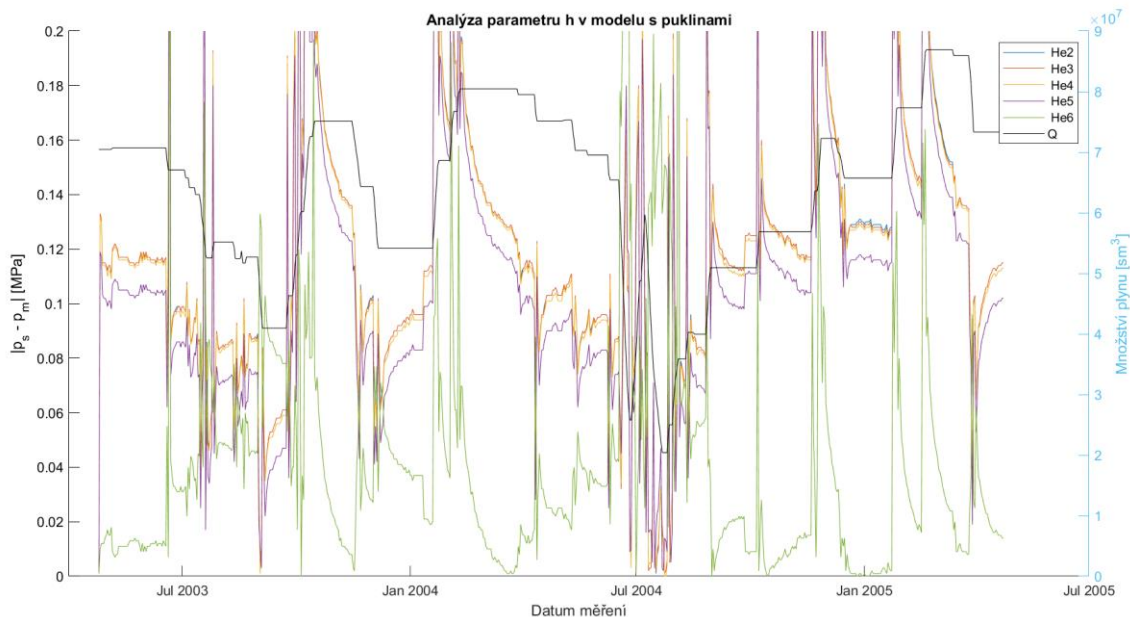
Graf 6-5: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty m v modelu s puklinami

6.2.5 Počáteční poloha pístu

Počáteční poloha pístu h byla analyzována v rozsahu 10^2 až 10^7 m. Z grafu (graf 6-6), ze kterého byla vyřazena řada poslední hodnoty parametru z důvodu velkých odchylek, a tabulky (tabulka 6-5) vyplývá, že nejlepší shoda tlaků je pro hodnotu počáteční polohy pístu 10^6 m.

Tabulka 6-5: RMSE tlaků pro různá h

h [m]	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
RMSE [MPa]	0,131	0,131	0,130	0,120	0,064	1,189



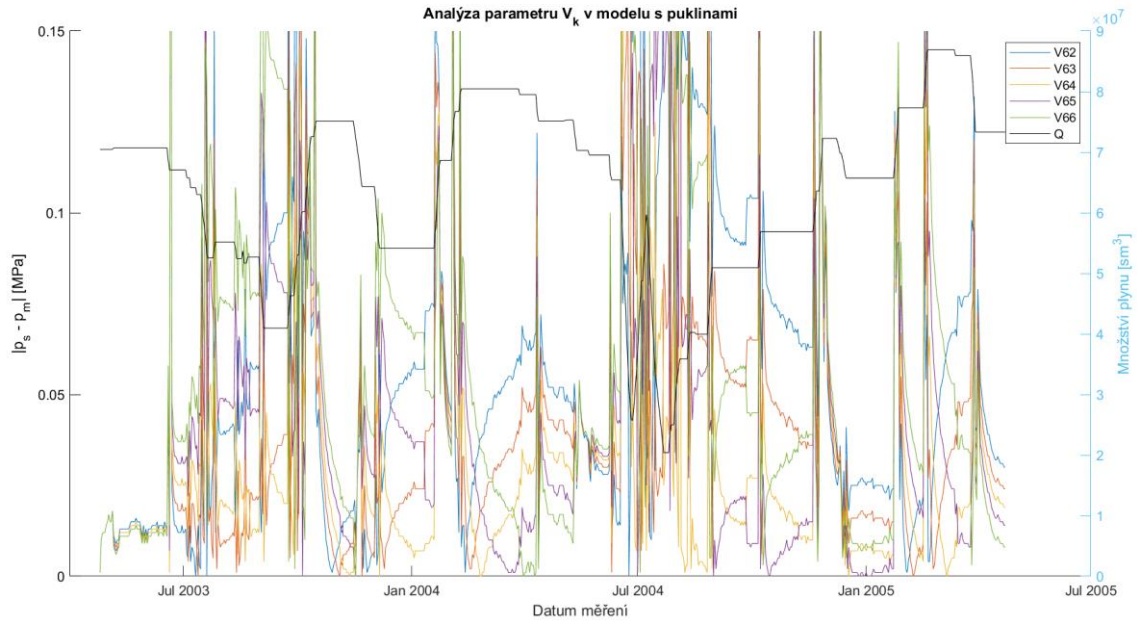
Graf 6-6: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty h v modelu s puklinami

6.2.6 Objem kaverny

Poslední parametr, objem kaverny, byl zvolen v rozsahu 620 000 až 660 000 m³. V legendě grafu jsou uvedeny jednotlivé hodnoty objemu ve tvaru VXX, kde XX je hodnota objemu zapsaná následovně: $XX \cdot 10^4 \text{ m}^3$. Z grafu (graf 6-7) a sumy čtverců odchylek (tabulka 6-6) vyplývá, že nejpřesnější jsou tlaky pro hodnotu 640 000 m³, což je o 10 000 m³ méně, než u modelu bez puklinového prostředí (v kapitole 6.1), tato hodnota odpovídá našemu přibližnému odhadu objemu puklin.

Tabulka 6-6: RMSE tlaků pro různá V_k

$V_k [\text{m}^3]$	620 000	630 000	640 000	650 000	660 000
RMSE [MPa]	0,077	0,057	0,052	0,064	0,085



Graf 6-7: Absolutní rozdíl naměřených a vypočtených tlaků v souvislosti s množstvím plynu pro různé hodnoty V_k v modelu s puklinami

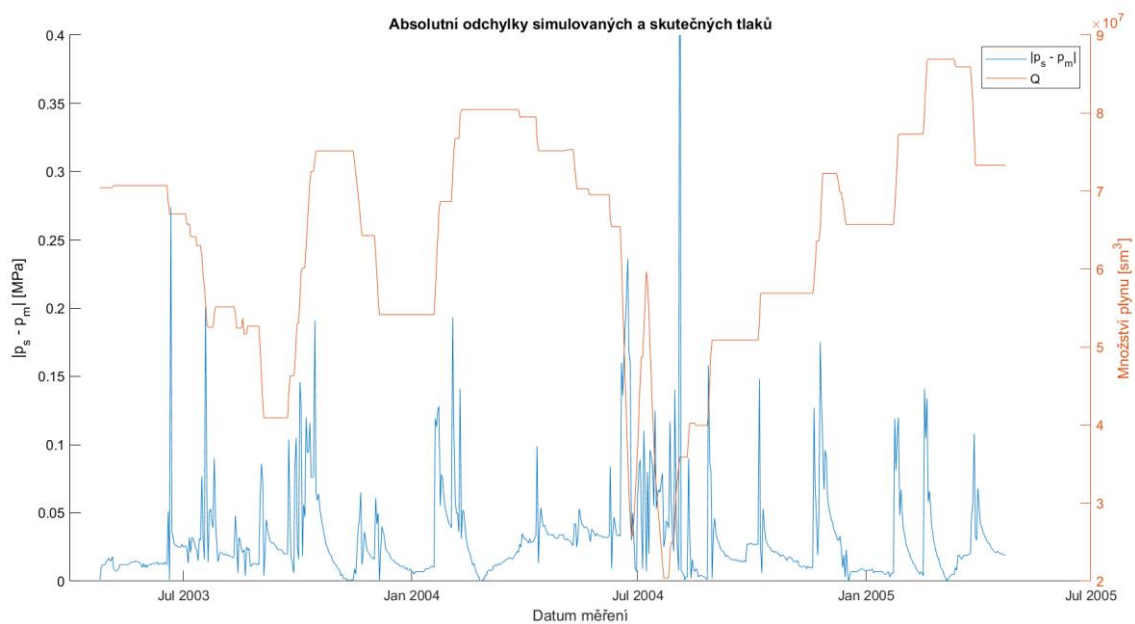
6.3 Test parametrů pro jiná období

Z předchozí kapitoly 6.2 vychází, že zatím nejlepších výsledků dosáhneme v daném období pomocí kombinace hodnot parametrů v tabulce (tabulka 6-7).

Tabulka 6-7: Parametry modelu

$S [m^2]$	$c [Nsm^{-1}]$	$k [Nm^{-1}]$	$m [kg]$	$h [m]$	$V_k [m^3]$
10^{-2}	10^3	10^{-1}	10^5	10^6	$6,4 * 10^5$

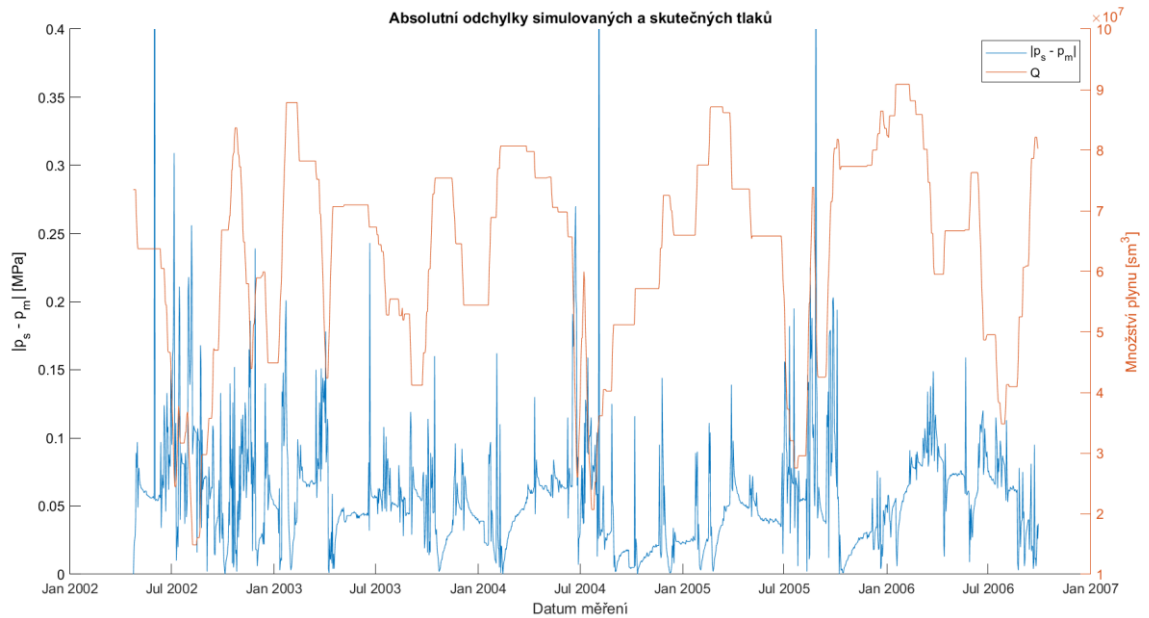
V prvním grafu (graf 6-8) je zobrazena nejlepší shoda modelu s realitou společně s množstvím plynu v zásobníku. Až na menší odchylky se zdá být model poměrně přesný.



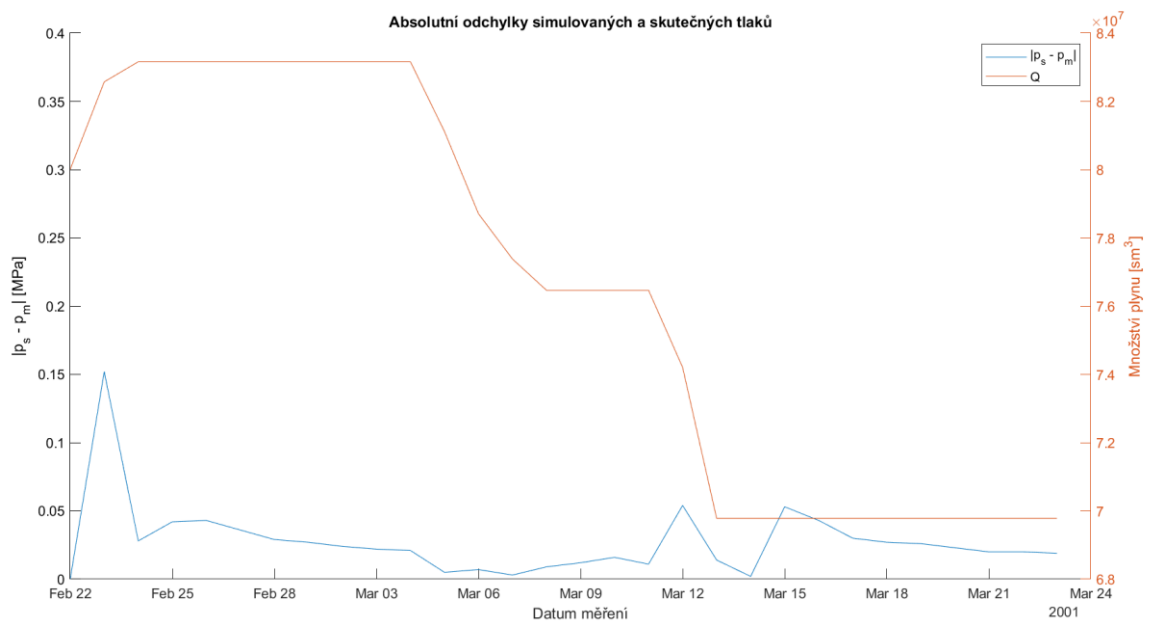
Graf 6-8: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků obou modelů v laděném období

Je třeba vzít v úvahu, že při hledání ideální hodnoty každého parametru byly ostatní hodnoty parametrů fixní, nelze tedy s jistotou tvrdit, že se jedná o nejlepší možnou kombinaci těchto parametrů. Tato část práce se zabývala pouze odhadem těchto parametrů za účelem ověření funkčnosti modelu a metodikou ladění parametrů. Pro zdokonalení modelu by tedy byla potřebná sofistikovanější analýza, ideálně víceparametrová optimalizace.

Vzhledem k tomu, že program byl laděn pouze na jedno období, bylo třeba jej otestovat i na různých jiných obdobích o různých délkách. Model byl otestován na delším období (graf 6-9), na období, které bylo několik let před (graf 6-10) a po (graf 6-11) laděném období.



Graf 6-9: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v období 2002-2006



Graf 6-10: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v roce 2001



Graf 6-11: Srovnání naměřených a vypočtených tlaků v roce 2006

Z grafů vyplývá, že na úsecích, kde dochází k výrazné změně množství plynu, nebo je v zásobníku malé množství plynu, jsou odchylky tlaků vyšší. Na obdobích, kde nedochází k velké těžbě či vtlačení je model až na fluktuace poměrně přesný.

Závěr

Hlavním výsledkem BP je program HaSim, který simuluje objem, tlak a množství plynu v kavernovém zásobníku Háje na základě interakce plynu s puklinovým systémem v okolí kaverny. Jeho funkčnost byla ověřena na reálných datech.

Z citlivostní analýzy vyplynulo, že pro přesné určení objemu jsou stěžejní přesné hodnoty kompresibilitního faktoru (resp. složení plynu), tlaku a množství plynu, u nich se přepočtená relativní změna objemu pohybovala v řádu jednotek procent, zatímco změnu teploty bylo možné zanedbat (zde se relativní změna objemu pohybovala kolem 0,1 %). Dále byl ověřen předpoklad, že se aktivní objem mění, což bylo zdůvodněno proplyňováním puklin v blízkém okolí zásobníku.

Na základě poznatků z analýzy byl navržen matematicko-fyzikální model, který bere v potaz vliv puklin v okolí zásobníku a je založen na principu pístu se třením a tlumením. Skládá se celkem ze čtyř rovnic (dvě jsou obyčejné diferenciální rovnice prvního řádu) pro řešení objemu a tlaku plynu, rychlosti pohybu a polohy rozhraní voda-plyn. Oproti parciálním diferenciálním rovnicím má tento model výhodu především v tom, že pro něj nemusíme znát přesnou strukturu a geometrii prostředí kaverny.

Model byl realizován v programovacím jazyce Java. Výsledný program umožňuje simulovat aktivní objem (včetně tlaku, množství plynu atd.) v minulosti nebo na několik let dopředu pouze ze znalosti počátečního stavu zásobníku a provozních dat.

Z analýzy parametrů modelu vyplynulo, že změnou průřezu pístu lze měnit citlivost modelu na pukliny. Hmotnost, koeficient tření a tuhost pružiny ovlivňují dynamiku modelu. Objem kaverny pak pouze posunuje tlaky ve směru osy y . Model s puklinovým prostředím má objem kaverny menší o předpokládaný objem puklin než u modelu bez puklin. Lze předpokládat, že ideální hodnota objemu kaverny u modelu bez puklin bude pro každé období různé. Při volbě parametrů je také třeba vzít v úvahu jejich vliv na stabilitu modelu. Průměrné odchylky se pro různá období pohybovaly v rozsahu 0,008–0,057 MPa, vyšší odchylky byly zaznamenány v místech, kde dochází k výrazné změně množství plynu v zásobníku, nebo je množství velmi nízké. Model prokazuje minimální schopnost akumulovat chyby u simulací delších období.

Vzhledem k tomu, že práce se zabývala pouze prvotním naladěním parametrů, nabízí se příležitost použít sofistikovanější a značně komplexnější víceparametrovou optimalizaci, která by mohla přinést zpřesnění výsledků. Dále by se dal model rozšířit o vliv deformace kaverny, či nelineární působení některých parametrů (nelineární pružina atd.).

Použitá literatura

1. BUDÍN, Jan. *Zemní plyn – těžba, vlastnosti a rozdělení* [online]. In.: 2015b [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni>
2. BUDÍN, Jan. *Plynárenství v ČR – dodávka plynu a základní statistiky* [online]. In.: 2015a [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/plynarenstvi-v-cr-dodavka-plynu-zakladni-statistiky>
3. DAKE, L.P., 1998. *Fundamentals of reservoir engineering*. Seventeenth impression. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE B.V. ISBN 0-444-41830-X.
4. ERÚ, Energetický regulační úřad, 2020a. *Národní zpráva Energetického regulačního úřadu o elektroenergetice a plynárenství v České republice za rok 2019* [online]. Jihlava [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/4561001/NZ_ERU_2019.pdf/528e4882-93b5-458b-8ada-061902ba290c
5. ERÚ, Energetický regulační úřad, 2020b. *Roční zpráva o provozu plynárenské soustavy ČR 2019* [online]. Jihlava [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5380768/Rocni_zprava_provoz_PS_2019.pdf/bf492c79-4f89-4aa3-8cb6-d819f676487a
6. FLAHERTY, Joseph. *Course Notes – Ordinary Differential Equations: Lecture 3* [online]. In.: 15. 8. 2004 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <http://www.cs.rpi.edu/~flaherje/pdf/ode3.pdf>
7. KOZA, V., 2004. *Zemní plyn* [online]. [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <http://zemniplyn.wz.cz>
8. SEVERÝN, Otto, 2012. *Analýza provozních dat PZP Háje při zvyšování ložiskového tlaku na 12.5 MPa*. Technická zpráva. Brno: RWE Gas Storage s.r.o.
9. SEVERÝN, Otto a Vladimír ONDERKA, 2013. *Aplikace numerického modelování v podzemním skladování plynu*. Liberec: RWE Gas Storage.
10. SEVERÝN, Otto a kol., 2017. *Konzultační práce a technická pomoc (III.2017 – XI.2017): Závěrečná zpráva o řešení zakázky, Technická zpráva*. FM TU Liberec.
11. SEVERÝN, Otto a kol., 2019. *Konzultační práce a technická pomoc (V.2019 – XII.2019): Závěrečná zpráva o řešení zakázky, Technická zpráva*. FM TU Liberec.
12. SVOBODA, Alexandr aj., 1997. *Plynárenská příručka: 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*. Praha: GAS. ISBN 80-902339-6-1.
13. WCE, World Energy Council, 2016. *World Energy Resources / 2016* [online]. Wales, England: World Energy Council [cit. 2021-04-06]. ISBN 978 0 946121 58. Dostupné z: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>
14. YOURKIT, json-simple [software]. 19. 2. 2012 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://code.google.com/archive/p/json-simple/>; velikost 23,18 KB.
15. ZÁKOPČAN, Marián, 2003. *Podzemní Zásobníky Plynu*. Hodonín: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.