



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Použití jazyka R v ložiskovém inženýrství

Bakalářská práce

Studijní program: B2646 – Informační technologie
Studijní obor: 1802R007 – Informační technologie
Autor práce: **Tomáš Kracman**
Vedoucí práce: doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Application of R language in reservoir engineering

Bachelor thesis

Study programme: B2646 – Information Technology
Study branch: 1802R007 – Information Technology
Author: **Tomáš Kracman**
Supervisor: doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Použití jazyka R v ložiskovém inženýrství

Jméno a příjmení: **Tomáš Kracman**
Osobní číslo: M15000028
Studijní program: B2646 Informační technologie
Studijní obor: Informační technologie
Zadávající katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami analýz provozních dat používaných pro vyhodnocení provozu podzemního zásobníku plynu Háje. Konkrétně se jedná o analýzu poklesu/nástupu tlaku po vtlačení/těžbě plynu, analýzu vývoje měrné skladovací kapacity, korelaci mezi průměrným ložiskovým tlakem a měrnou skladovací kapacitou, případně další.
2. Tyto metody implementujte pomocí jazyka R a frameworku Shiny do vizualizačního nástroje vytvořeného v rámci bakalářského projektu.
3. Implementované metody otestujte na provozních datech zásobníku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] Zangl, G., Hanner, J.: Data mining – applications in the petroleum industry. Road Oak Publishing, 2003. ISBN 0-9677248-1-8
- [2] Shi, G.: Data mining and knowledge discovery for geoscientists. Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-410437-2
- [3] Severýn, O.: Analýza provozních dat PZP Háje při zvyšování ložiskového tlaku na 12.5 MPa. Technická zpráva, RWE Gas Storage s.r.o., Brno, 2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání práce: 10. října 2017
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2018

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

2. 5. 2019

Tomáš Kracman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ottu Severýnovi Ph.D. za pomoc při častých konzultacích, cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.

Anotace

Cílem bakalářské práce „Použití jazyka R v ložiskovém inženýrství“ je vytvoření webové aplikace umožňující analýzu dat měřených na podzemním zásobníku plynu Háje. Teoretická část práce je zaměřena na problematiku skladování plynu, vývoj skladování, důvody ke skladování a dále na konkrétní podzemní zásobník plynu Háje a metody použité pro analýzu dat včetně seznámení s jazykem R. Praktická část se poté věnuje popisu metod, použitých pro analýzu měřených dat, návrhu, specifikaci a implementaci aplikace a také vytvoření dokumentace pro uživatele. Aplikace pracuje s daty měřenými na zásobníku a počítá s nimi. Nejpodstatnější část spočívá v analýze vývoje tlaku. Výstupem aplikace jsou grafy a tabulky.

Klíčová slova

skladování plynu, podzemní zásobníky plynu, PZP Háje, jazyk R, Shiny, ložiskové inženýrství

Abstract

The aim of the bachelor thesis „Use of R language at reservoir engineering“ is to create web application that can be used for analysis of the measured data at underground gas storage Háje. The teoretical part is dedicated to problematics of gas storage, history of storaging, reasons to storage and underground gas storage Háje and the methods used for data analysis and familiarization with R language. The practical part is dedicated to description of methods, that are used for data analysis, proposal, specification and implementation of application and creation of documentation for user. Application works with measured data and calculates with them. The most important part is the analysis of pressure developement. The application's output are plots and data tables.

Key words

gas storage, underground gas storage, PZP Háje, R language, Shiny, reservoir engineering

Obsah

Seznam obrázků, grafů a tabulek	1
1 Úvod	2
2 Skladování zemního plynu.....	3
2.1.1 Dovoz zemního plynu.....	3
2.1.2 Vývoj spotřeby zemního plynu v ČR	3
2.2 Jak skladovat zemní plyn.....	5
2.3 Historie skladování plynu	5
2.4 Podzemní zásobníky plynu.....	7
2.4.1 Dělení zásobníků.....	7
2.5 Zásobník plynu Háje.....	7
2.5.1 Historie zásobníku	7
2.6 Stavová rovnice ideálního a reálného plynu.....	10
3 Programovací jazyk R	13
3.1 Package Shiny	13
4 Hysterezní křivka a její projekce.....	14
4.1 Hysterezní křivka.....	14
4.2 Projekce hysterezní křivky.....	16
5 Analýza vývoje tlaku v čase.....	18
5.1 Hledání optimální funkce.....	19
5.1.1 Sledování vývoje koeficientů.....	21
6 Vývoj koeficientu Alpha	22
7 Specifikace programu.....	25
8 Návrh programu.....	26
9 Implementace programu.....	29
9.1 filterCalmDays	29
9.2 filterDate.....	29
9.3 linRegression	30
9.4 countCoefA.....	30
9.5 getCalmIntervals.....	30
9.6 func.....	31
9.7 setParams	31
9.8 saveData	31

9.9	loadData.....	32
9.10	changeDataValues.....	32
9.11	countD.....	32
9.12	getCondition	32
9.13	Optimization.....	33
9.14	getSeasonOptimization	33
9.15	uploadDataFromFile	34
9.16	Další funkce	34
10	Dokumentace k programu	35
10.1	Instalace a spuštění programu	35
10.2	Vstupní soubor programu	35
10.3	Načtení / uložení dat	36
10.4	Projekce hystereze.....	37
10.5	Analýza vývoje tlaku v čase	39
10.6	Grafy vývoje v čase.....	41
10.7	Upravit tabulku záznamů.....	43
	Závěr.....	44
	Seznam použité literatury.....	45
	Obsah příloženého CD	47

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázky:

Obrázek 1: Schéma podzemního zásobníku plynu Háje. Převzato z [4].....	9
Obrázek 2: Katz-Standingův graf faktoru stlačitelnosti. Převzato z [16].....	12
Obrázek 3: Vlastní návrh aplikace	26
Obrázek 4: Vlastní návrh programu - zobrazení a úprava záznamů	28
Obrázek 5: Náhled vstupního souboru I/II	36
Obrázek 6: Náhled vstupního souboru II/II.....	36
Obrázek 7: Náhled aplikace – Načíst/Uložit data	37
Obrázek 8: Náhled aplikace – Projekce hystereze:	38
Obrázek 9: Náhled aplikace - Analýza vývoje tlaku v čase	40
Obrázek 10: Náhled aplikace – Grafy vývoje v čase.....	42
Obrázek 11: Náhled aplikace – Tabulka záznamů.....	43

Grafy:

Graf 1: Závislost spotřeby zemního plynu na prům. teplotě. Převzato z [12] 4	4
Graf 2: Porovnání maximálních denních spotřeb plynu. Převzato z [12].....	4
Graf 3: Ilustrace hysterezní křivky porézního zásobníku.....	14
Graf 4: Ilustrace vývoje hysterezní křivky	15
Graf 5: Hysterezní křivka zásobníku Háje	16
Graf 6: Projekce hysterezní křivky	17
Graf 7: Vývoj tlaku zásobníku v průběhu jednoho roku	18
Graf 8: Nástup tlaku po těžbě ze zásobníku.....	19
Graf 9: Průběh nalezené optimální funkce	20
Graf 10: Vývoj měrné skladovací kapacity	22
Graf 11: Ukázka nechtěného vývoje Alpha.....	23
Graf 12: Vývoj koeficientu Alpha	24

Tabulka:

Tabulka 1: Tabulka koeficientů optimalizace	21
--	----

1 Úvod

Práce se zabývá analýzami podzemního zásobníku plynu Háje, konkrétně analýzou poklesů a nástupů tlaku po těžbě / vtláčení do zásobníku, dále analýzou vývoje měrné skladovací kapacity a korelací mezi průměrným ložiskovým tlakem a měrnou skladovací kapacitou. Dosud bylo sledování vývoje a dělání závěrů řešeno pomocí tabulek MS Excel. Takový přístup je méně pohodlný, má omezené možnosti a malou automatizaci. V rámci řešení bakalářské práce byla vyvinuta aplikace za účelem nahrazení dosavadních metod jednotnou univerzální aplikací, specifickou pro podzemní zásobník plynu Háje.

Začátek práce bude věnován motivaci skladování zemního plynu, dále pak jakými způsoby je možné skladovat zemní plyn a seznámení s historií skladování. Dále se práce bude věnovat konkrétně podzemním zásobníkům a jejich rozdělení. Bude popsán podzemní zásobník plynu Háje, jakožto zásobník, ke kterému se aplikace vztahuje a budou popsány veličiny, které jsou spojeny se skladováním podzemního plynu a jeho měřením. V další části se bude práce věnovat krátkému seznámení s jazykem R, ve kterém je aplikace vyvíjena. V praktické části budou popsány konkrétní metody, které budou k analýze naměřených dat na zásobníku použity. Dále bude popsán návrh aplikace, její specifikace a implementace. V poslední řadě pak dokumentace pro použití aplikace uživatelem a implementace aplikace.

2 Skladování zemního plynu

2.1.1 Dovoz zemního plynu

Česká republika patří mezi státy závislé na dovozu energií ze zahraničí. Naprostá většina zemního plynu je do České republiky dovážena a to převážně z Ruska, menší část poté z Norska.

V České republice se spotřebuje okolo 12 miliard Sm^3 za rok, z toho pochází okolo 3 miliard Sm^3 (25% z celkového množství) od norských dodavatelů a 9 miliard Sm^3 (75% z celkového množství) z Ruské federace. [8][9]

Při skladování plynu neuvádíme množství plynu v krychlových metrech, ale v jednotkách Sm^3 , což je takzvaný standardní metr krychlový - to je množství plynu za „standardního“ tlaku a „standardní“ teploty. Kubický metr plynu za jiné, než „standardní“ teploty a jiného tlaku, než „standardního“ bude mít vždy jinou hustotu a tudíž jiné látkové množství. Standardní metr krychlový je tedy jednotkou látkového množství.

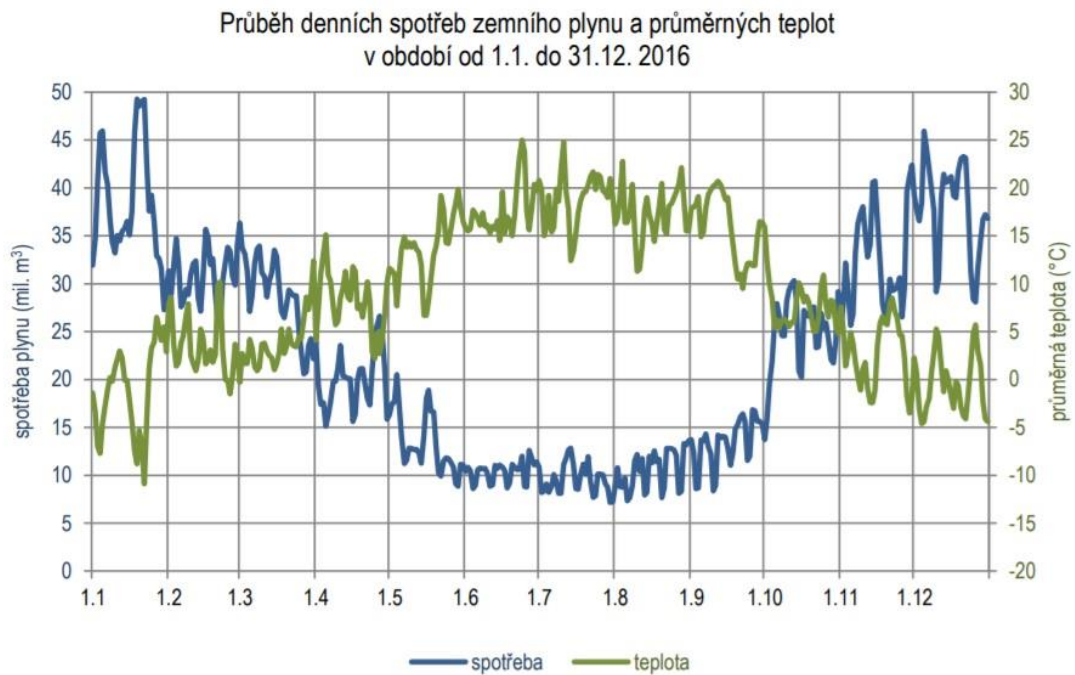
2.1.2 Vývoj spotřeby zemního plynu v ČR

Zemní plyn, který je do České republiky dodáván, je přepravován tranzitními plynovody. Je snaha, aby tranzitní plynovody byly provozovány optimálně a jejich kapacita byla co nejlépe využita. Množství dodávaného plynu poté není schopné pokrýt zvýšenou poptávku po plynu v průběhu zimní sezóny, naopak v letním období je odběr výrazně nižší. Spotřeba plynu je kvůli tomu výrazně nestabilní. Odběr plynu také závisí na fázi dne. Během dne je spotřeba plynu výrazně vyšší oproti nočním hodinám.

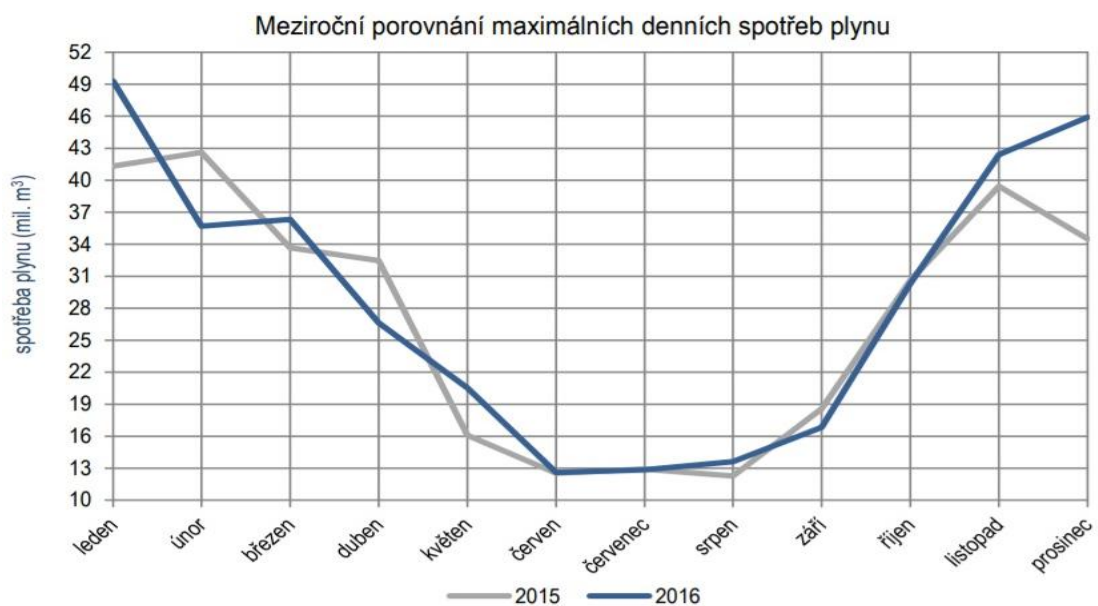
Denní a noční výkyvy spotřeby zemního plynu řeší kapacita potrubí. Dodávaný plyn v tranzitním plynovodu teče rychlostí cca 50 km/h. Z ruských nalezišť to tak trvá týden a stát nemůže odhadnout, jaká bude spotřeba za týden, například vzhledem k počasí. Podzemní zásobníky, které vznikly za účelem pokrytí těchto výkyvů, tak zajišťují stabilitu a spolehlivost celého systému v průběhu roku. Zásobníky jsou také schopné případně pokrýt kratší výpadky dodávky plynu.

Na území České republiky se nachází 8 podzemních zásobníků plynu. Celkem jsou zásobníky schopny pojmout kolem 3 miliard Sm³. [9]

Na následujícím grafu vidíme vývoj spotřeby plynu během celého roku, v našem případě máme údaje z roku 2016. Z grafu je možné vyčíst nepřímou úměrnost mezi spotřebou plynu a průměrnou denní teplotou.



Graf 1: Závislost spotřeby zemního plynu na prům. teplotě. Převzato z [12]



Graf 2: Porovnání maximálních denních spotřeb plynu. Převzato z [12]

2.2 Jak skladovat zemní plyn

Do určitého množství jsou ropa i zemní plyn skladovány ve strategických zásobnících. Nejběžněji se ropa ukládá do ocelových rezervoárů o celkovém objemu obvykle dosahujícím 20 až 100 tisíc m³. [2]

Za „normálních“ podmínek dosahuje hustota zemního plynu přibližně 0,7 kg/m³. To je výrazně nižší hodnota než hustota ropy a ropných produktů. Vyšší měrné hmotnosti zemního plynu lze dosáhnout jeho stlačením, uchovávat však větší množství plynu pod vysokým tlakem ve venkovních nádobách by však mohlo být pro okolí značně nebezpečné. [2]

Další variantou je zkapalnění plynu, přičemž 1 m³ zkapalněného plynu při uchování za teploty -162 °C obsahuje 625 Sm³. Taková forma přepravy a uskladňování plynu si vyžaduje větší finanční náklady a složitější technologii. [2]

Alternativní variantou pro uskladnění zemního plynu je také rozpouštění plynu v kapalném propanu. Tato varianta je značně neatraktivní především z důvodu nutné úpravy plynu před spotřebou a pro potřeby nosného média.

Vhodný plynový zásobník by proto měl mít jednak velkou skladovací kapacitu a zároveň být také bezpečný pro své okolí i navzdory vysokým tlakům.

2.3 Historie skladování plynu

V roce 1781 francouzský chemik Antoine Lavoisiere vynalezl pro uchovávání plyných paliv první plynojem. Jeho tzv. mokrý plynojem byl využit poprvé roku 1798 v plynárně na parné stroje Boulton a Watt v anglickém Soho pana W. Murdocka. Tento zásobník později zdokonalil anglický vědec S. Hutchinson a nechal si svůj tzv. teleskopický mokrý zásobník v roce 1833 patentovat. Tento zásobník byl poté poprvé využit v plynárně v Londýně v roce 1836. Kvůli větší distribuci plynu, rozvoji průmyslové výroby a zvýšení spotřeb svítiplynu kolem poloviny 19. století se začaly zvyšovat nároky na skladování plynu o větších objemech. Jedním z největších plynojemů byl plynojem vybudovaný v Chicagu, který dosahoval kapacity 600 tisíc m³. [2]

V prvopočátcích těžby ropy byl zemní plyn brán pouze jako vedlejší produkt a nebyl využíván. Až na začátku 20. století začal být pro potřeby neustále rozvíjejícího se průmyslu těžen i zemní plyn. Díky jeho energetickým přednostem došlo k lavinovému nárustu jeho spotřeby a možnosti jeho skladování užívané do té doby začaly být značně nedostatečné. Začalo se tedy uvažovat o nových možnostech jak zemní plyn skladovat a akumulovat.

V Kanadě, přesněji ve Welland Country, Ontario, byly prováděny první pokusy o podzemní skladování. Prvním podzemním zásobníkem plynu se ale stalo americké ložisko Zoar ve státě New York v té době s velkou kapacitou 62 milionů m³. Další významnější zásobníky v USA byly zásobník ve státě Iowa vzniknuvší v roce 1950 a pak zásobník Herscher s kapacitou 2 mld. m³ postavený v roce 1953.[2]

Prvním podzemním zásobníkem plynu v Evropě je zásobník Engelbostel, nacházející se u Hannoveru. Původním záměrem vzniku zásobníku bylo skladování svítiplynu. Zásobník se rozprostírá ve vodonosné vrstvě v celkové hloubce 200 metrů a do provozu roku byl uveden v roce 1954. V roce 1973 začal být využíván na skladování zemního plynu. [2]

Roku 1955 byla v Československu vypracována první komplexní studie týkající se zřízení podzemního zásobníku plynu. Svou strukturou byla vybrána, na základě geofyzikálních průzkumů, lokalita u Lobodic v okrese Přerov, jejíž hloubka dosahuje 400 až 500 metrů. Za účelem uskladňování svítiplynu byl roku 1965 uveden zásobník do pravidelného provozu.

2.4 Podzemní zásobníky plynu

2.4.1 Dělení zásobníků

Pro naše účely dělíme zásobníky do těchto kategorií:

1. V porézním prostředí
2. Kaverny
 - a. V kamenné soli
 - b. V pevné hornině

2.5 Zásobník plynu Háje

Podzemní zásobník plynu Háje, kterým se tato bakalářská práce zabývá, se nachází u Příbrami v místní části Jesenice a jeho provozovatelem je Innogy Gas Storage. Jedná se o typ zásobníku, kde je plyn skladován v uměle vytvořené kaverně.

Podzemní zásobník vznikl za účelem pokrytí největších špiček spotřeby zemního plynu hlavního města Prahy a průmyslových center v jejím okolí a také za účelem pokrytí případného krátkodobého výpadku dodávky plynu. Nejbližší zásobníky plynu byly do té doby pouze na Moravě, bylo proto zapotřebí najít pro pokrytí této oblasti bližší lokalitu.

Podzemní kavernový zásobník plynu Háje se skládá ze tří hlavních částí a to:

- Podzemní celek s akumulacním prostorem a tlakovými uzávěry
- Část propojovací s vrty
- Povrchová část s řídicím systémem, regulací a měřením plynu, úpravou plynu a kompresory [4]

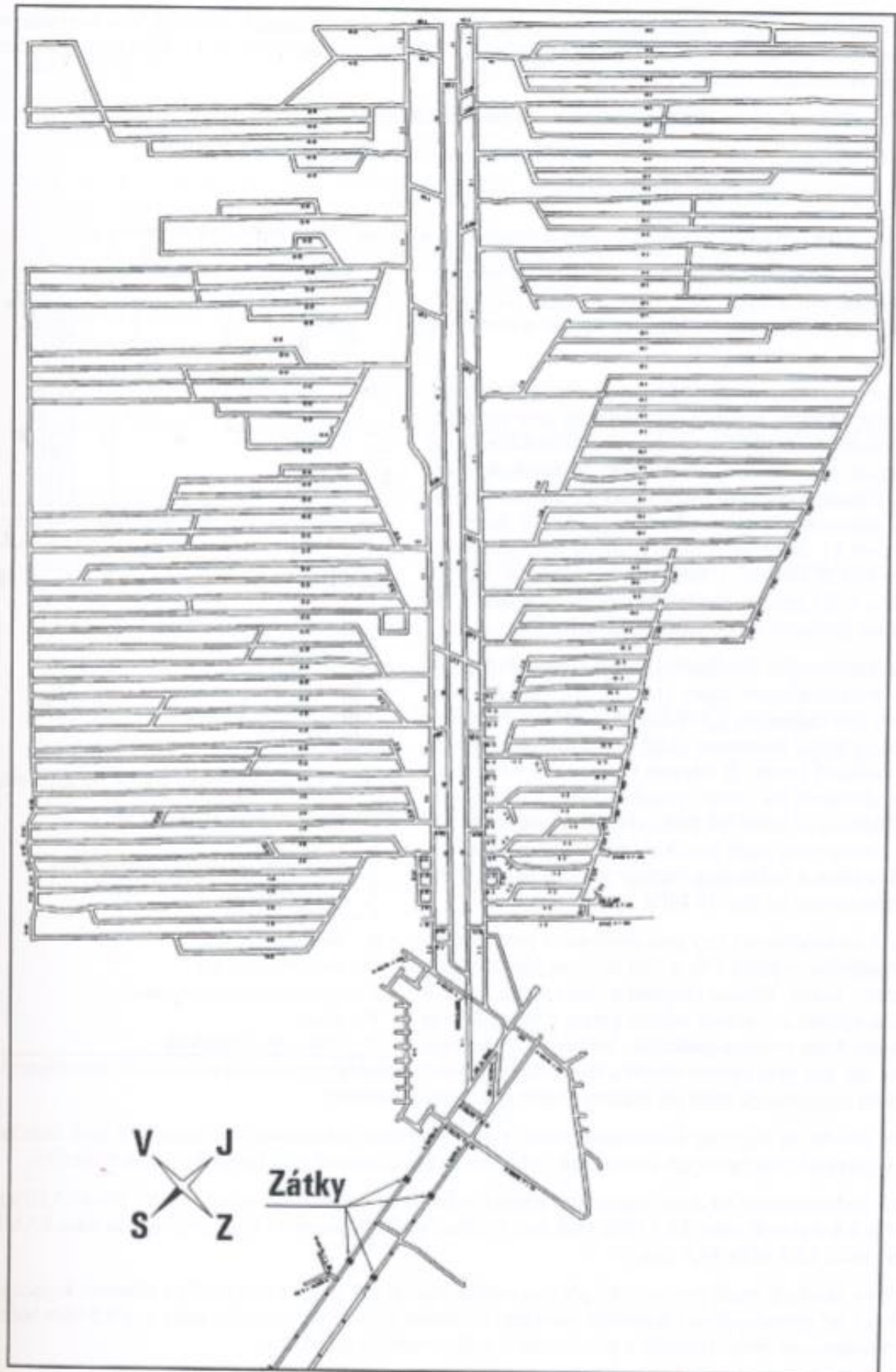
2.5.1 Historie zásobníku

Kvůli absenci klasických porézních zásobníkových struktur v blízkých lokalitách Prahy a průmyslových center v okolí, se začal v roce 1979 Plynoprojekt a.s. Praha zabývat ukládáním zemního plynu do podzemních zásobníků v kavernách, které byly uměle vrtány v pevné hornině. Z prozkoumaných lokalit se vhodným kandidátem stala oblast příbramského uranového rudného revíru a geologická struktura blízkého středočeského

plutonu. V místě rudných dolů byla následně vyražena pokusná kaverna Bohutín. Druhá kaverna s názvem Milín se poté nacházela v místě, které patřilo Uranovým dolům Příbram, v podzemní šachtě č. 68. Kaverna Bohutín se nacházela v hloubce 760 metrů pod povrchem. Roku 1980 měla objem 100 m³ a byla testována cyklickým tlakováním vodou do tlaku až 7,6 Mpa a docházelo ke zkoušení tlakových betonových hrazí o celkové tloušťce 3,5 metrů. Hornina v okolních důlních vrtech byla testována vystavením tlaku vzduchu 15Mpa. [4]

Roku 1984 byla následně testována kaverna Milín vzduchovým médiem do tlaku 7,5 Mpa. Tato kaverna dosahovala objemu celých 5000 m³ a nacházela se v celkové hloubce 511 metrů. Měření probíhalo podle mezinárodní metodiky plynovodních systémů TRANSGAS. Následné výsledky pokusů na kaverně byly podkladem pro vybudování podzemního kavernového zásobníku plynu v příbramské rudné oblasti o hloubce jednoho kilometru.

Po útlumu těžby uranu v příbramské oblasti a geologické rešerši byly plány na vybudování kavernového zásobníku v roce 1989 situovány do oblasti středočeského plutonu v celkové hloubce 950 metrů. V plánech se počítalo s využitím stávajících přístupových jam a technologického zařízení provozu dolů. Až do roku 1991 byly prováděny geologické a geotechnické průzkumy lokality. Následně se začalo s výstavbou zásobníku, jehož termín zahájení provozu byl naplánován začátkem roku 1997. V roce 1998 začalo plnění zásobníku do ložiskového tlaku 4,5 MPa, postupně byl tlak zvýšen na 9,5 MPa. Aktuální kapacita zásobníku je 64 milionů m³, což z něj činí nejmenší podzemní zásobník plynu v ČR. [4]



Obrázek 1: Schéma podzemního zásobníku plynu Háje. Převzato z [4]

2.6 Stavová rovnice ideálního a reálného plynu

Ideální plyn, je plyn, který je definován těmito zákony [1]:

1. Všechny molekuly jsou stejné hmotnosti a stejného objemu.
2. Molekuly se v plynu pohybují přímočaře a rovnoměrně, pokud nedojde k jejich vzájemné, nebo jiné srážce.
3. Pokud dojde ke střetu, chovají se molekuly jako dokonale pružné a hladké koule.
4. Mezi molekulami plynu nedochází k žádnému působení kohézních sil.
5. Pohyb molekul je dokonale neuspořádaný ve všech směrech, každý je zastoupen stejným počtem molekul.
6. Při stálé teplotě zůstává kinetická energie všech molekul izolovaného plynu konstantní.

V ideálním plynu platí, při konstantní teplotě, vzájemná závislost tlaku a objemu, která je dána vzorcem: $pV = konst.$ (podle Boyle-Mariottova zákona)

Pro ideální plyn pak platí rovnice:

$$pV = nrT$$

Kde p je tlak [Pa], V je objem [m^3], n je látkové množství [mol], r je molární plynová konstanta, kde $r = 8,315 \text{ [J} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}]$ a T je teplota v Kelvinech [K].

Kvůli zachování platnosti tohoto zákona také pro reálné plyny se v rovnici musí projevit také z -faktor:

$$pV = nZrT$$

Tento Z -faktor, neboli také faktor komprese [11], je korekční faktor, který vyjadřuje chování reálného plynu oproti plynu ideálnímu. Je definován jako poměr molárního objemu reálného plynu a ideálního plynu. Jedná se o užitečnou termodynamickou vlastnost pro modifikování fyzikálních zákonů ideálního plynu pro chování reálného, kde z -faktor je závislý na teplotě, tlaku a složení plynu.

Faktor komprese neboli z-faktor je tedy vyjádřen rovnicí:

$$Z = \frac{pV}{nrT}$$

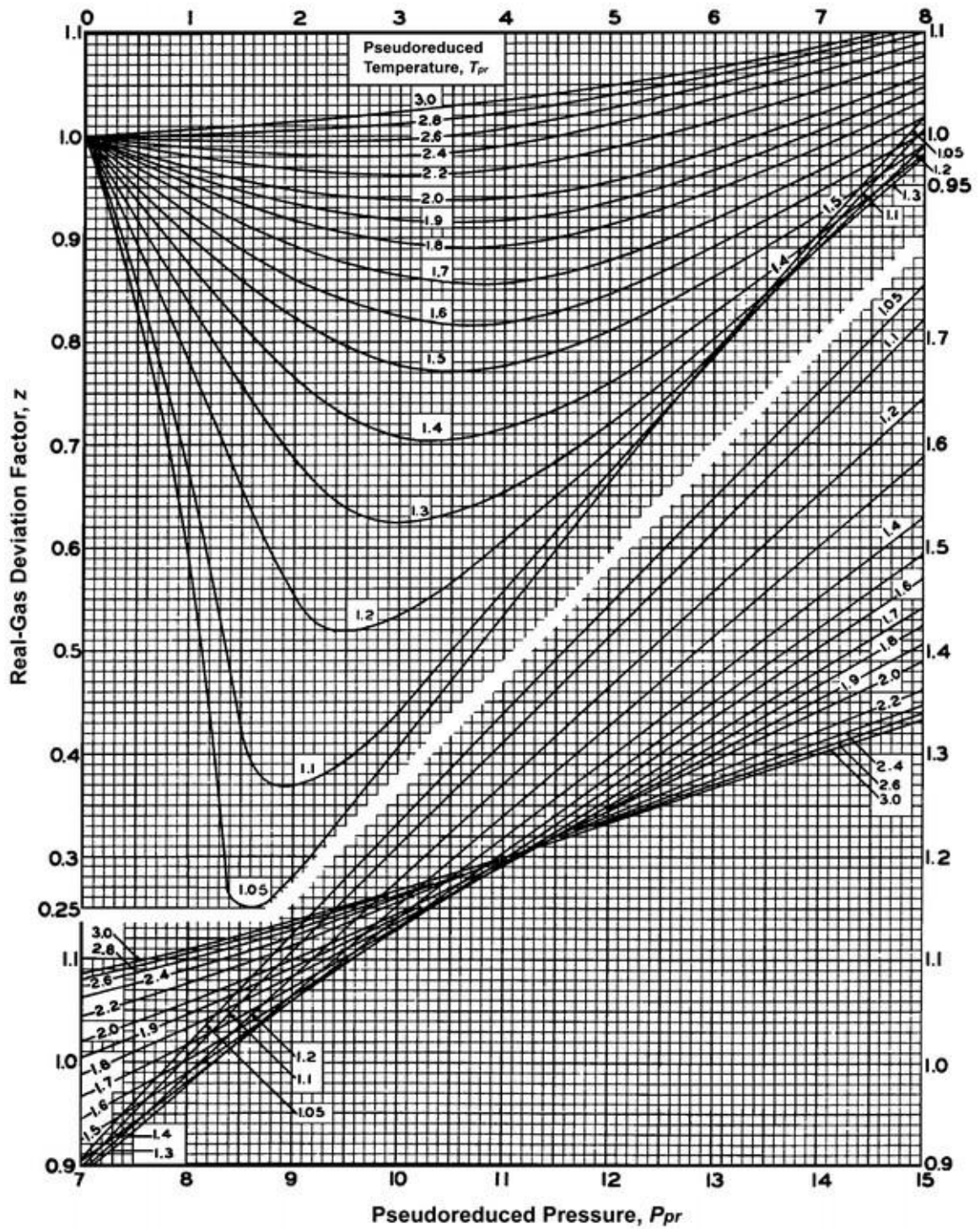
Z této rovnice vychází, že pro ideální plyn je Z rovno 1. Pro reálný plyn může z-faktor nabývat hodnot větších i menších než 1.

Rovnice reálného plynu pak píšeme v tomto formátu:

$$\frac{p}{Z}V = nrT$$

Kde p/Z bereme jako jednu veličinu.

S faktorem komprese budeme v práci ještě dále pracovat.



Obrázek 2: Katz-Standingův graf faktoru stlačitelnosti. Převzato z [16]

3 Programovací jazyk R

R je programovací jazyk, jehož užití se nachází především ve vědeckém a akademickém odvětví. Jedná se o implementaci programovacího jazyka S pod svobodnou licenci (GNU General Public License), kvůli čemuž samotný jazyk S rychle předčilo.

Jazyk R slouží zejména pro statistickou analýzu dat a její následnou grafickou interpretaci formou grafů. Ve standardní distribuci jazyka R se nalézají množství funkcí pro manipulaci a výpočty s daty a jejich grafické výstupy. Pomocí knihoven, v jazyce R označovaných jako `packages`, je možné funkce jazyka dále rozšířit. Mezi hlavní vývojová prostředí jazyka R patří například RStudio a Rkward.[14][15]

3.1 Package Shiny

Shiny je balík programovacího jazyku R. Jedná se o framework, který umožňuje jednoduchou tvorbu webových aplikací se základní šablonou bez nutnosti jakékoliv znalosti jazyku HTML či CSS.

Shiny aplikace je rozdělena do dvou částí. První část se nazývá UI neboli User Interface, což je prostředí, kterým je uživatel schopen komunikovat se systémem. Druhá je část serverová, kde jsou všechny funkce aplikace umožňující práci s daty. Funkce `shinyApp` spojuje následně obě části do aplikace. Části UI a Server mohou být od sebe odděleny ve dvou samostatných R souborech, nebo v jednom skriptu obsahujícím obě části.

4 Hysterezní křivka a její projekce

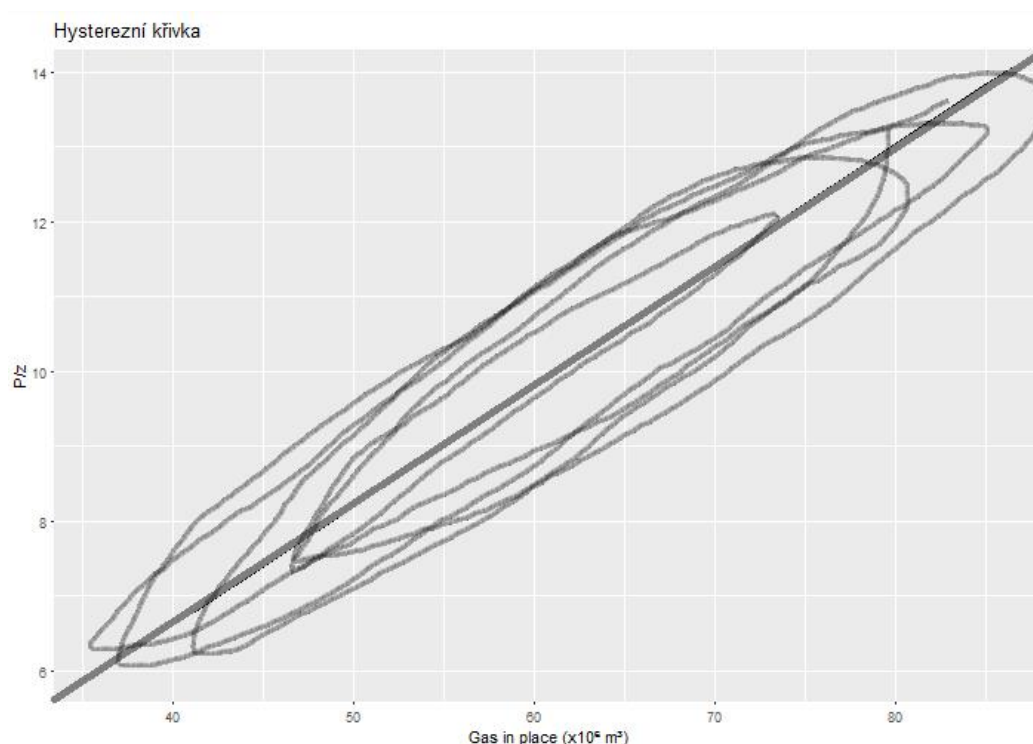
4.1 Hysterezní křivka

Hystereze je závislost stavu systému nejen na vstupní veličině, ale také na historii systému. Hysterezní křivka je v našem případě křivka znázorňující závislost veličiny P/z (tlak/z-faktor) na množství plynu.

V průběhu času se na zásobníku měřené veličiny vyvíjejí. Hlavním příčinou těchto změn je práce se zásobníkem a to konkrétně těžba plynu ze zásobníku, nebo jeho ukládání do zásobníku. Během ukládání plynu do zásobníku stoupá tlak v zásobníku, při těžbě ze zásobníku je tomu naopak.

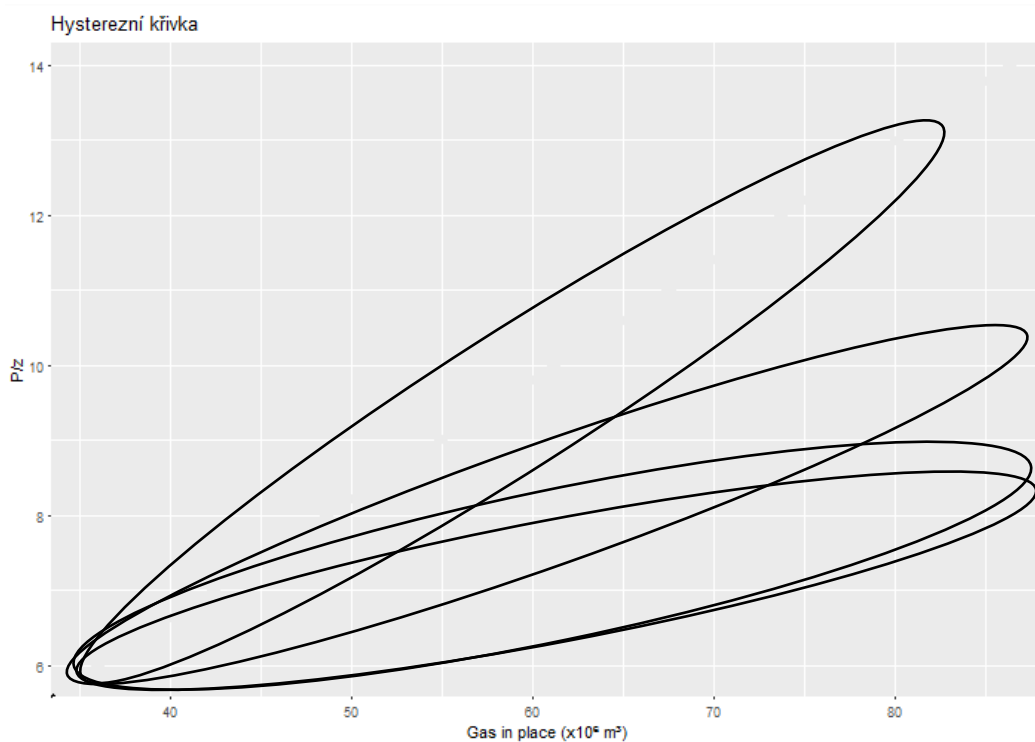
Hodnoty tlaku se pak během dalších dní opět vyrovnávají, kdy plyn reaguje na prostředí zásobníku a dochází k pronikání plynu do okolních puklin a vytlačování vody, která se v zásobníku vyskytuje.

Za pomoci hysterezní křivky se dá tento vývoj snadno sledovat. Pokud se jedná o pórzní typ zásobníku, projeví se na křivce výrazným způsobem postupné pronikání plynu do pórů a puklin horniny a vývoj křivky připomíná „smyčky“.



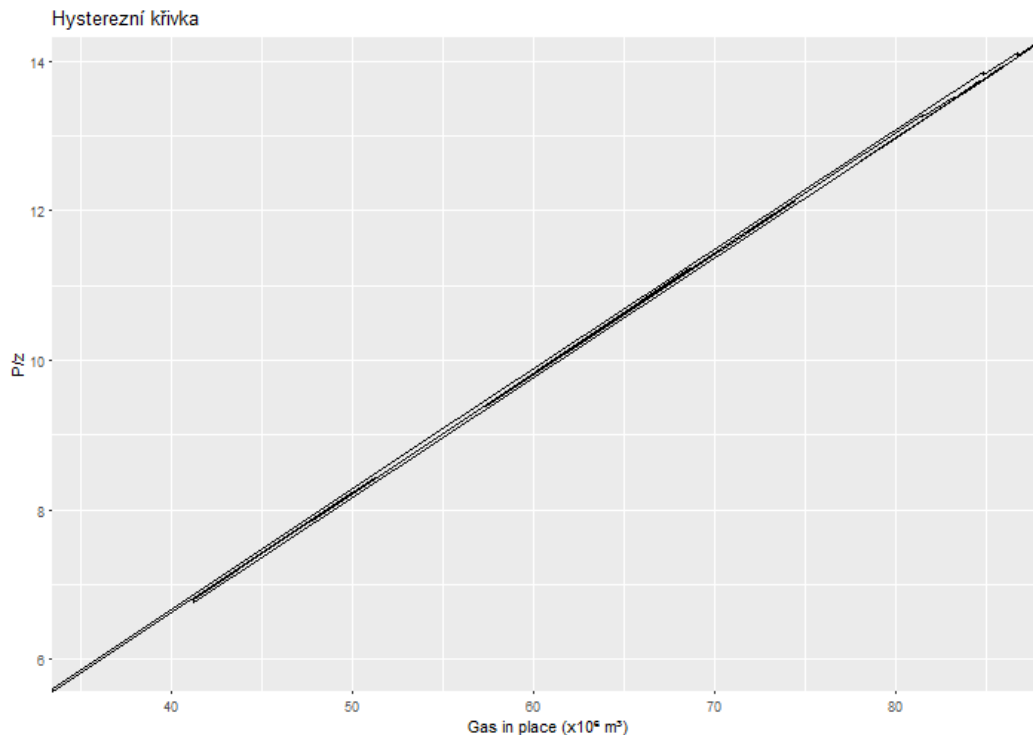
Graf 3: Ilustrace hysterezní křivky porézního zásobníku

Případný vývoj hysterezní křivky je vidět na následujícím grafu, kde se křivka postupem času vychyluje na pravý bok. Takový vývoj křivky by byl chtěný, protože by značil v průběhu času snížení tlaku za stejného množství plynu v zásobníku a to kvůli postupnému většímu využití pórů a puklin okolní horniny. To by znamenalo, že do zásobníku je možné uskladnit větší množství plynu.



Graf 4: Ilustrace vývoje hysterezní křivky

V našem případě se však jedná o kavernový typ zásobníku, kde vývoj hysterezní křivky připomíná spíše přímku. Proto se pro její podrobnější analýzu využije projekce její hysterezní křivky, díky které je pak vývoj možné lépe pozorovat. Na dalším grafu je vidět vývoj hysterezní křivky právě kavernového zásobníku.



Graf 5: Hysterezní křivka zásobníku Háje

4.2 Projekce hysterezní křivky

Projekce hysterezní křivky nám umožní přehledněji sledovat malé změny vývoje hysterezní křivky.

Pro projekci hysterezní křivky musíme nejdříve spočítat lineární regresi hysterezní křivky. V jazyce R jsou již implementované matematické metody pro lineární regresi a to konkrétně funkce `lm()` (linear method), které předáme jako vstupní parametry naše data o vývoji času vůči tlaku a funkce vrátí koeficienty alpha a beta lineární regrese.

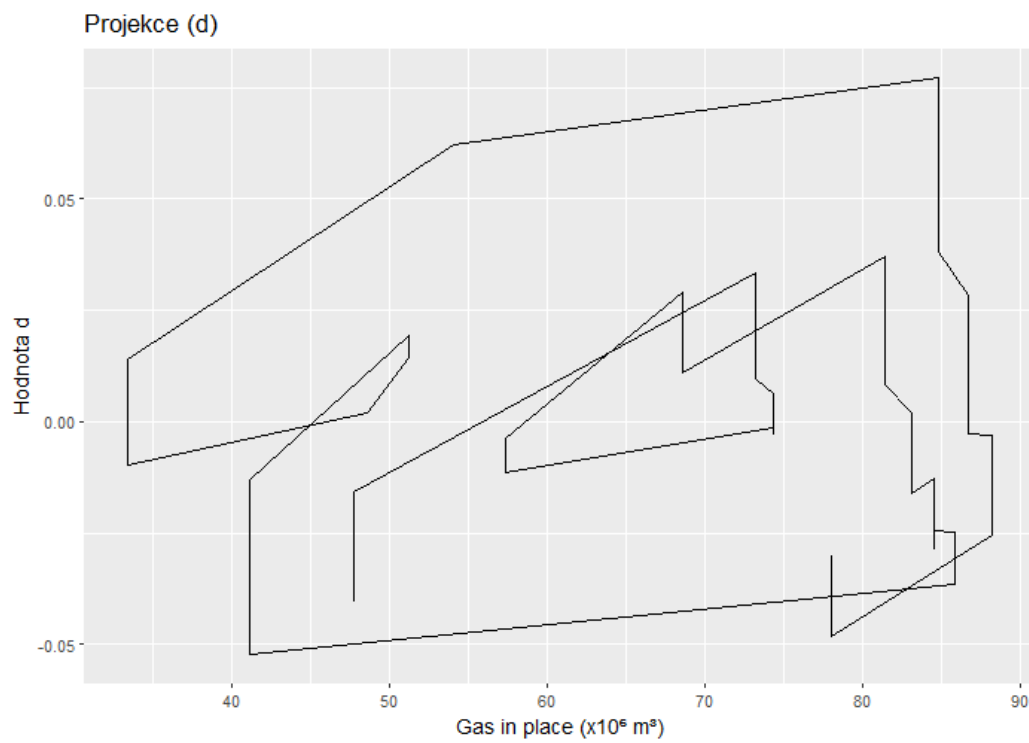
V dalším kroku se vypočítá ideální hodnota p/z v každém časovém bodě podle vzorce:

$$\frac{p}{z} = an + b$$

kde **a**, **b** jsou koeficienty lineární regrese a **n** je látkové množství.

Výsledná D-hodnota je pak rozdíl mezi reálnou hodnotou p/z a nově spočítanou hodnotou p/z . [3]

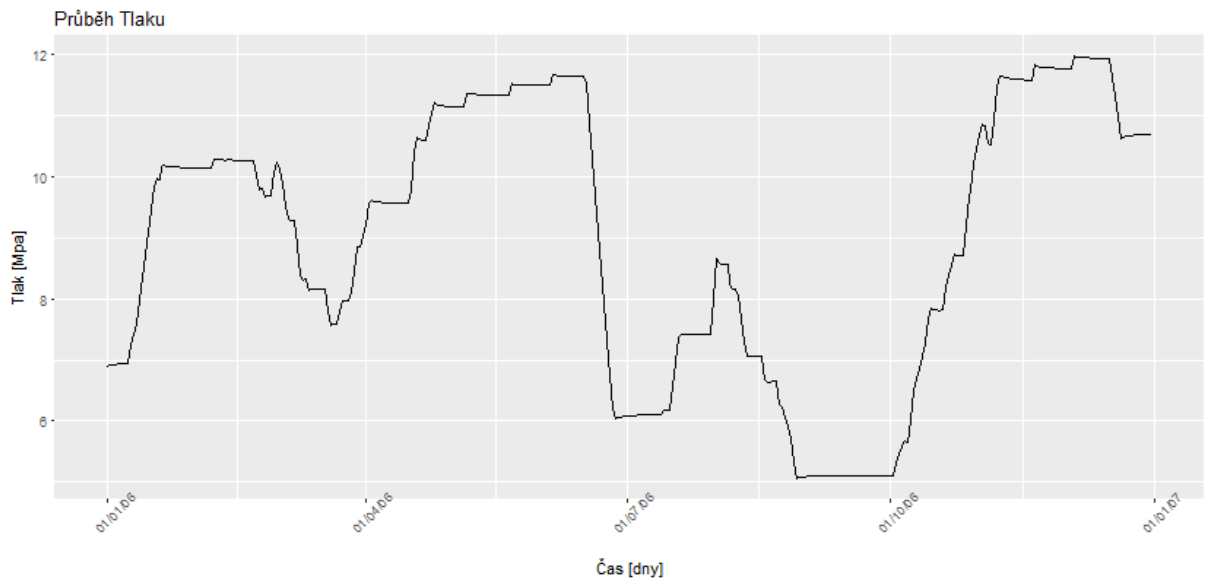
Výsledná projekce hysterezní křivky pak může vypadat takto:



Graf 6: Projekce hysterezní křivky

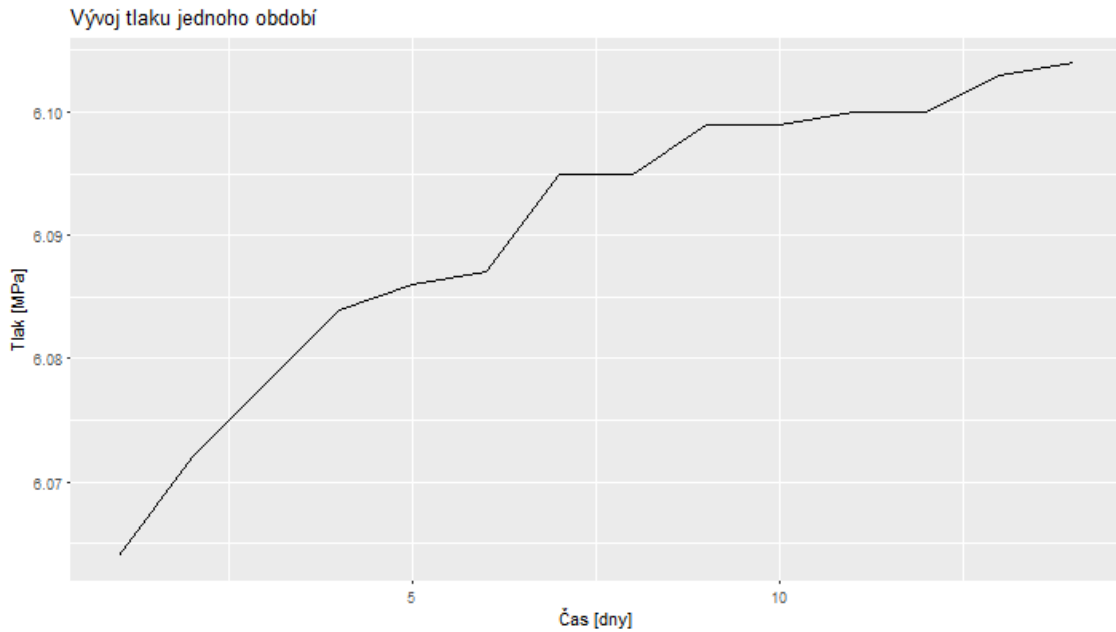
5 Analýza vývoje tlaku v čase

Na následující grafu je vidět vývoj tlaku zásobníku v průběhu celého roku.



Graf 7: Vývoj tlaku zásobníku v průběhu jednoho roku

Vývoje tlaku jsou zajímavé především v periodách odstávky zásobníku po těžbě plynu ze zásobníku a po vtlačení. Po těžbě dochází k mírnému nástupu tlaku. Tyto změny můžeme vidět na následujícím grafu.



Graf 8: Nástup tlaku po těžbě ze zásobníku

Tlak po těžbě ze zásobníku výrazně poklesne. Následujících několik dní pak dochází k opětovné stabilizaci tlaku v zásobníku. V případě zásobníků v pórzním prostředí by tyto změny byly dlouhodobější z důvodu pomalého proudění plynu.

5.1 Hledání optimální funkce

Pro analýzu vývoje tlaku je nutné sledovat vývoj tlaku vzhledem ke starým datům, ke změnám by mělo docházet vždy víceméně stejným způsobem.

Pro snazší analýzu vývoje je pak vhodné hledat matematický popis vývoje změn pomocí matematické funkce. Naměřený průběh tlaku pak touto matematickou funkcí proložíme - v našem případě exponenciálou. Tvar naší hledané matematické funkce tedy je:

$$p(t) = ke^{ct} + p_{lim}$$

Pro tuto funkci budeme hledat optimální koeficienty k , c a p_{lim} .

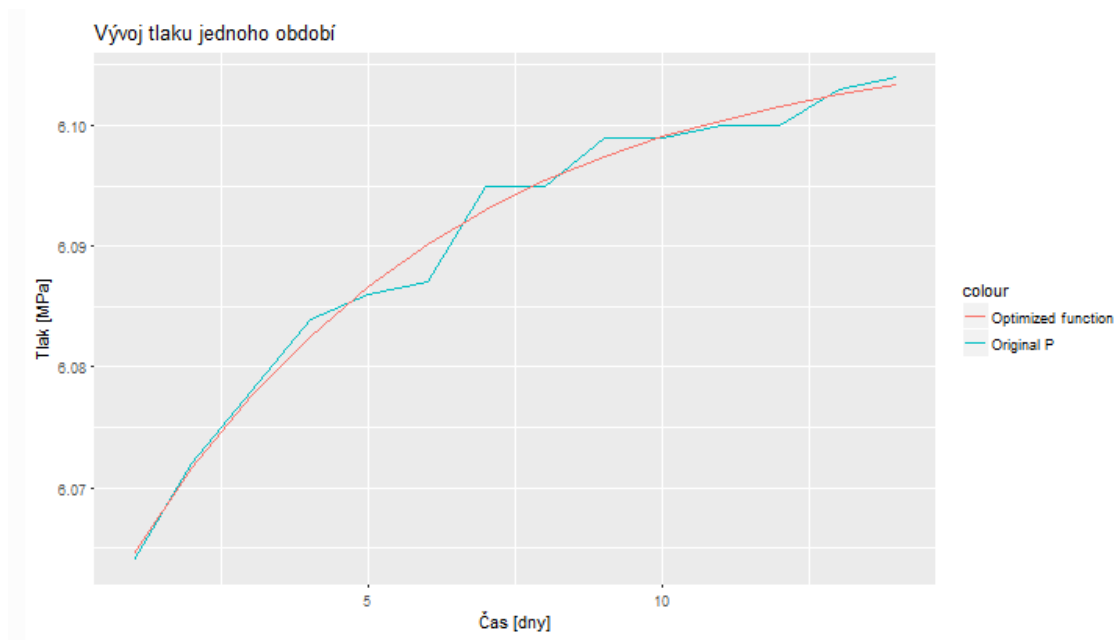
Pro nalezení optimální funkce je použito účelové funkce ve tvaru:

$$u(k, c, p_{lim}) = \sum_{i=1}^n k e^{ct_i} + p_{lim}$$

Cílem optimalizace je nalezení takových hodnot proměnných, pro které následně nabývá vstupní účelová funkce minimální nebo maximální hodnoty.

K nalezení optimální funkce je potom použito optimalizačního balíku optimx. Funkce balíku optimx nabízí možnost optimalizace pomocí algoritmů Nelder-Mead, quasi-Newton, nebo BFGS. Pro naši problematiku byl zvolen Nelder-Meadův algoritmus. [10]

Na následujícím grafu je vidět nalezená optimální funkce vzhledem k naměřeným hodnotám na zásobníku. Modrá křivka znázorňuje naměřené hodnoty tlaku na zásobníku v daném období, červená poté spočítané hodnoty optimální funkce.



Graf 9: Průběh nalezené optimální funkce

5.1.1 Sledování vývoje koeficientů

Výsledné koeficienty k, c a p_{lim} pro každé „období“ (obdobím je myšleno několik následujících dní po každé jednotlivé těžbě / vtlačení, kdy sledujeme vývoj veličin), k němuž jsme hledali optimalizovanou funkci, jsou vypsány v tabulce společně s přiřazeným pořadovým číslem období, jeho počátečním a koncovým datem a informací, zda danému období předcházela těžba, či vtlačení. Koeficienty k a c jsou v programu také pro lepší porovnání vykresleny do dvou grafů.

Tabulka 1: Tabulka koeficientů optimalizace

season	k	c	pLim	from	to	condition	
1	2	0.0339	-0.1737	10.1394	23. 1. 2006	5. 2. 2006	Vtlaceni
2	3	0.0219	-1.1969	10.2771	9. 2. 2006	20. 2. 2006	Vtlaceni
3	5	0.0273	-0.2487	9.5698	5. 4. 2006	15. 4. 2006	Vtlaceni
4	7	0.0455	-0.1734	11.1347	27. 4. 2006	4. 5. 2006	Vtlaceni
5	8	0.0238	-0.1470	11.3328	9. 5. 2006	20. 5. 2006	Vtlaceni
6	9	0.0166	-0.2272	11.4995	24. 5. 2006	3. 6. 2006	Vtlaceni
7	10	0.0188	-0.8580	11.6546	7. 6. 2006	15. 6. 2006	Vtlaceni
8	11	-0.0514	-0.1827	6.1073	29. 6. 2006	12. 7. 2006	Tezba
9	12	0.0141	-0.6279	7.4116	22. 7. 2006	29. 7. 2006	Vtlaceni
10	16	-0.0216	-0.0859	5.1058	31. 8. 2006	1. 10. 2006	Tezba
11	18	0.2659	-0.0231	11.3580	11. 11. 2006	18. 11. 2006	Vtlaceni
12	19	0.0452	-0.1321	11.7662	22. 11. 2006	2. 12. 2006	Vtlaceni
13	20	0.0421	-0.0639	11.9221	6. 12. 2006	15. 12. 2006	Vtlaceni
14	21	-0.0313	-0.3602	10.6975	23. 12. 2006	31. 12. 2006	Tezba

Showing 1 to 14 of 14 entries

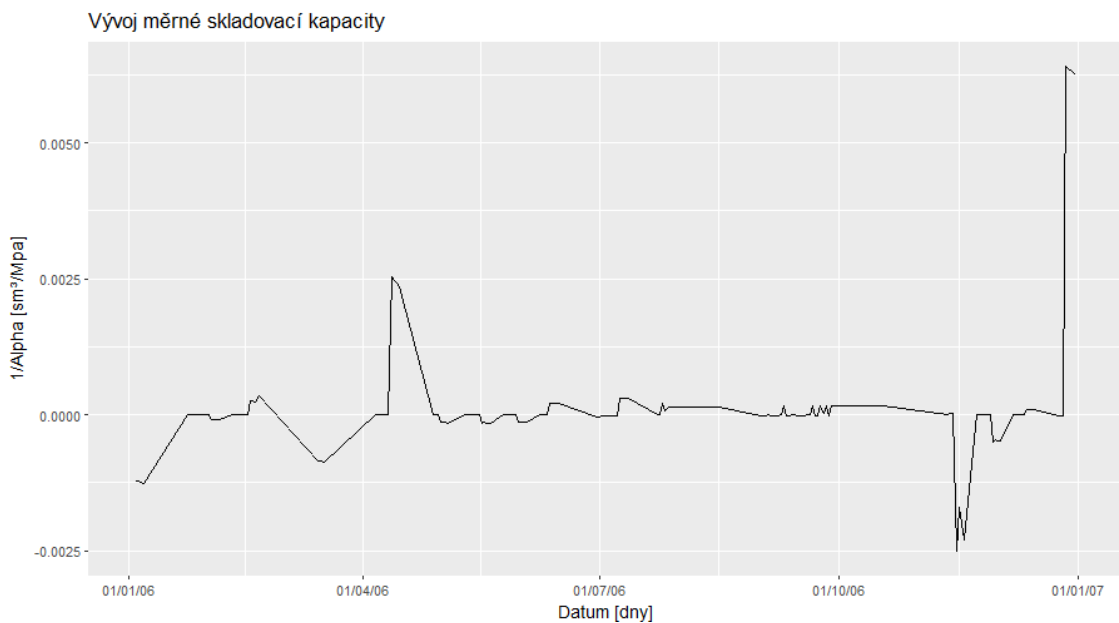
Previous 1 Next

6 Vývoj koeficientu Alpha

Měrná skladovací kapacita, která je daná vzorcem $G/(p/z)$, kde G je množství plynu [Sm^3], p je tlak [Pa] a z je z -faktor, udává, kolik plynu je potřeba dodat do zásobníku, aby se zvýšil tlak o jednu jednotku. Alpha je pak daná vzorcem jako převrácená hodnota měrné skladovací kapacity:

$$\alpha = \frac{1}{G/(p/z)}$$

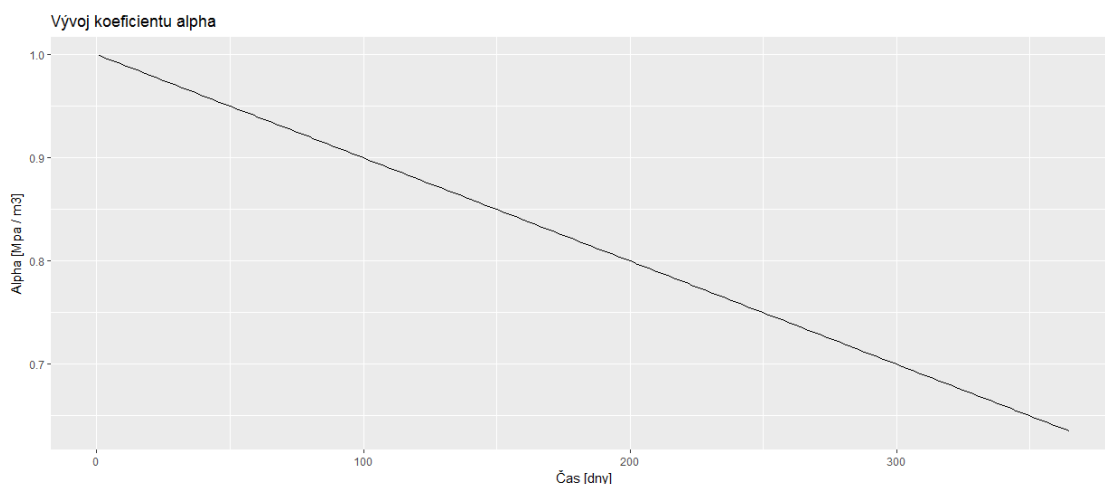
V aplikaci je vykreslena měrná skladovací kapacita zásobníku v jednotkách mil. Sm^3/Mpa . Pokud bychom chtěli zvýšit tlak v zásobníku o 1 Mpa, muselo by se v případě PZP Háje do zásobníku natlačit množství okolo 6,1 mil. Sm^3 zemního plynu.



Graf 10: Vývoj měrné skladovací kapacity

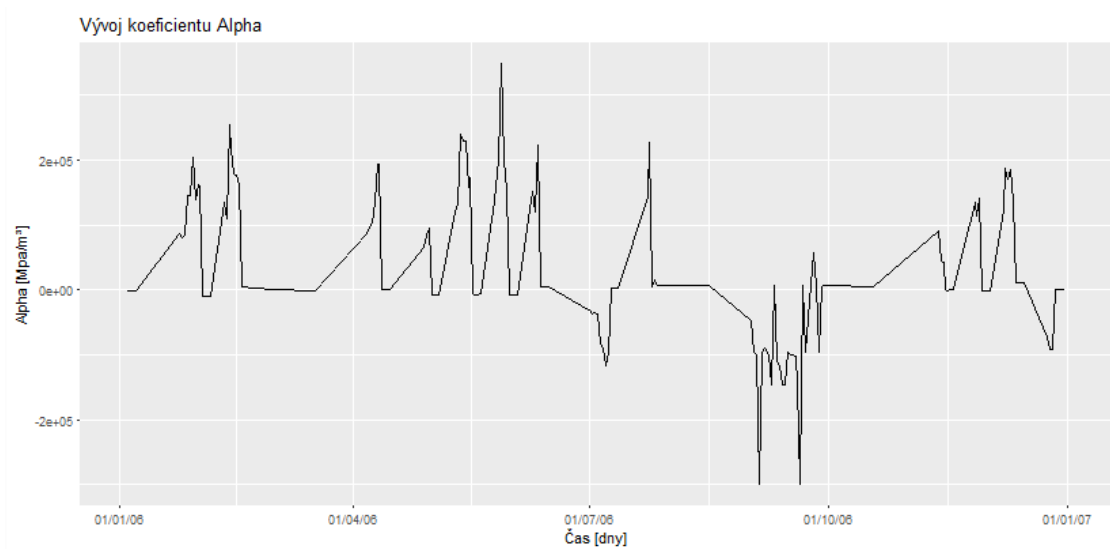
Vývoj koeficientu alpha sledujeme v průběhu času. Koeficient alpha je spočítán z vývoje tlaku. Pro výpočet jsou vzata období, ve kterých není ze zásobníku těženo, ani do něj vtláčeno. Z těchto klidových období je ještě vynecháno prvních několik dní (defaultně 4 dny), které se do výpočtu nezahrnou. Pro vypočtení koeficientu se poté hodnoty tlaku proloží přímkou. Sklon této přímky udává právě koeficient alpha.

Na následujícím grafu můžeme vidět nechtěný vývoj koeficientu, kde by takový vývoj značil „podezřelé“ zvětšování celkové kapacity zásobníku. To by mohlo značit, že plyn soustavně proniká do puklin kolem zásobníku a narůstá tím celkový objem zásobníku - takový vývoj je žádoucí, avšak pouze do určité míry, protože plyn také může unikat do míst, odkud již není možné jej vytěžit.



Graf 11: Ukázka nechtěného vývoje Alpha

Koeficient alpha by měl oscilovat kolem nějaké hodnoty. Zvýšená hodnota nastává, pokud byl zásobník plynu delší dobu pod nízkým tlakem. V takovém případě dochází ke snížení celkového objemu zásobníku, protože okolní voda se vrací zpět a zaplavuje pukliny. V obráceném případě, kdy je hodnota koeficientu snížena, byl zásobník delší dobu pod vysokým tlakem.



Graf 12: Vývoj koeficientu Alpha

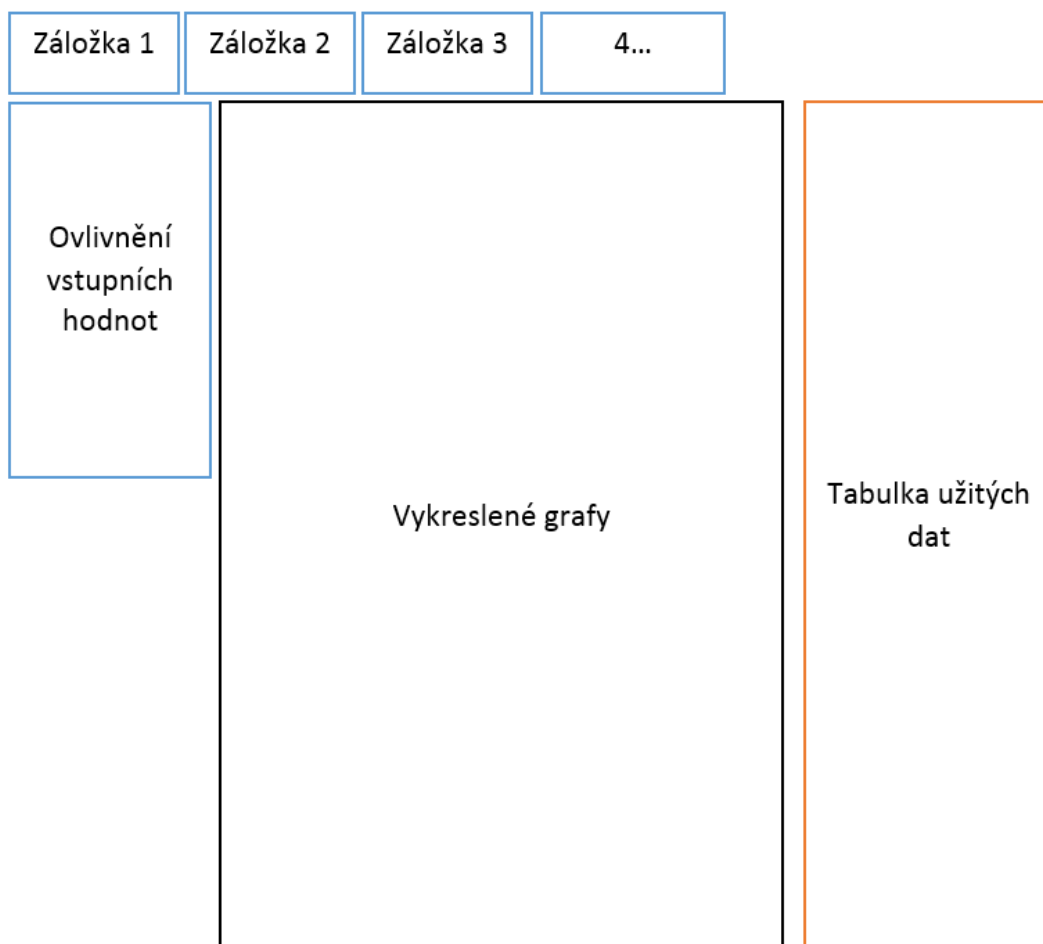
7 Specifikace programu

Cílem práce je vytvořit program v jazyce R, který vyhodnocuje provoz podzemního zásobníku plynu Háje. Program bude analyzovat poklesy a nástupy tlaku po jeho vtlačení / těžbě. Další funkcí programu bude analýza vývoje měrné skladovací kapacity. V poslední řadě korelace mezi průměrným ložiskovým tlakem a měrnou skladovací kapacitou.

8 Návrh programu

Samotný program k bakalářské práci bude vyvinut v jazyce R. Pro vytvoření webového rozhraní bude použito R balíku Shiny, který slouží jako Framework pro tvorbu webových aplikací. Vstupem programu budou měřená data na zásobníku, výstupem programu pak výsledky analýz vstupních hodnot ve formě grafů a tabulek.

Celý program bude strukturovaný do záložek podle jednotlivých funkcí. Záložky s výpočty a vykreslenými grafy pak budou stavěny podle následujícího schématu.



Obrázek 3: Vlastní návrh aplikace

První - úvodní záložka programu bude sloužit k načtení dat a to ve dvou formách – z tabulky excelu ve formátu .xls / .xlsx, (jeho přesná struktura bude

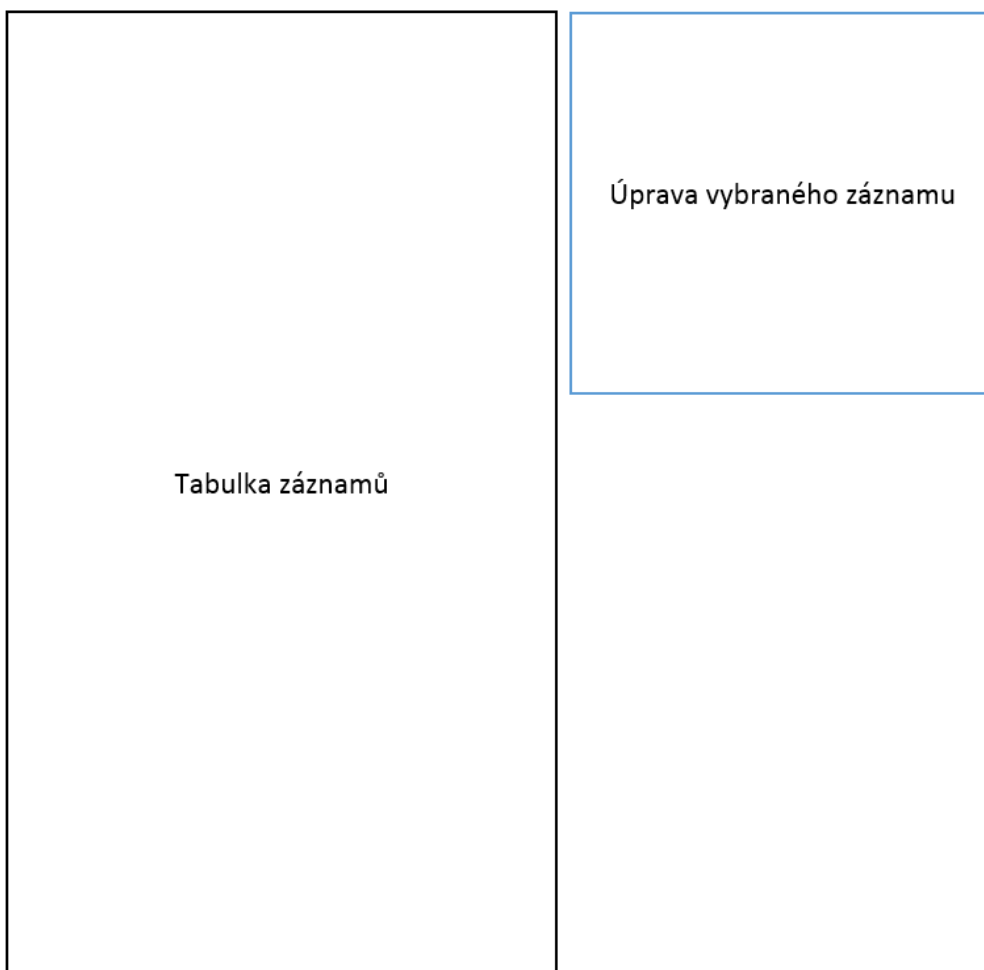
popsána v dokumentaci) a pak ze souboru, do kterého byla již dříve data z programu uložena.

V druhé záložce bude analýza hysterezní křivky a její projekce, které budou vykresleny do dvou grafů. Pro analýzu dat bude možné vybrat konkrétní časové období, které nás zajímá formou kalendáře a dále pak zvolení počtu dní po těžbě ze zásobníku / vtlačení do něj, které se do grafů nepromítanou. Výsledné grafy bude možné uložit do dokumentu ve formátu pdf, či v obrazovém formátu png. Dále zde bude tabulka se vstupními daty, se kterými se momentálně pracuje.

Třetí záložka bude analyzovat vývoj tlaku v čase, který vykreslí do grafu společně s proložením nalezenou optimální funkcí a v dalších grafech také vývoj dříve zmíněných koeficientů k a c . Analýzu bude možné ovlivnit opět výběrem časového období formou kalendáře a opět výběrem počtu „klidových“ dní. Spočítané koeficienty, které budou zaneseny do grafu budou také vypsané v tabulce.

V další záložce budou grafy vývoje základních měřených hodnot na zásobníku ve zvoleném časovém období a vývoj koeficientu α . Časové rozmezí bude opět možno zvolit formou kalendáře. Podle výběru bude umožněno vykreslit graf vývoje množství plynu v zásobníku, graf vývoje tlaku v zásobníku, graf vývoje hodnoty P/z a graf vývoje hodnoty $G/(P/z)$.

Poslední záložka bude umožňovat uživateli náhled do všech záznamů měření, které byly do programu načteny a umožní jejich úpravu a to pomocí rozkliknutí konkrétního záznamu z tabulky, který se zobrazí v pravé části.



Obrázek 4: Vlastní návrh programu - zobrazení a úprava záznamů

9 Implementace programu

V této části jsou popsány veškeré naprogramované funkce, které byly v programu použity.

9.1 filterCalmDays

Vstupy: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

 proměnná **calmDays** (číslo, které určuje počet dní v klidovém období, které budou vyfiltrovány)

Funkce: Pokud je vyfiltrování žádoucí, je nejprve inicializován prázdný vektor **rowsToDelete**, který bude obsahovat indexy pozic dat, která chceme vyfiltrovat a počet dní **days** se nastaví na 0. Následně funkce prochází celý Data Frame. Pokud v daném záznamu je množství vtlačného plynu a zároveň množství těženého plynu rovno 0, zvýší se počet dní **days** o 1. Pokud bude proměnná **days** menší než proměnná **calmDays**, zapíše se do vektoru **rowsToDelete** hodnota **TRUE** na index daného záznamu. Pokud je však rovna nebo větší, nastaví se k tomu ještě proměnná **days** opět na 0. Na konci forcyklu se ze vstupní proměnné **data** vyfiltrují všechny nehodící se záznamy jejichž pozice ke smazání je v proměnné **rowsToDelete** nastavena na **TRUE**.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující vyfiltrovaná data)

9.2 filterDate

Vstupy: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

 proměnná **fromDate** (datum od kterého chceme data pro výpočet získat)

 proměnná **toDate** (datum do kterého chceme data pro výpočet získat)

Funkce: Využívá funkci **filter** balíku **tidyverse**. Funkce **filter** nejprve porovná datum každého záznamu s proměnnou **fromDate** a pokud je datum záznamu nižší (starší) než proměnná **fromDate**, tak daný záznam vyfiltruje. Následně podobně porovná datum každého záznamu s proměnnou **toDate** a pokud je záznam vyšší (mladší), než proměnná **toDate**, tak daný záznam vyfiltruje.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame, obsahující vyfiltrovaná data v požadovaném časovém období)

9.3 linRegression

Vstupy: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

Funkce: Pomocí funkce **lm** (linear model) spočítá hodnoty regrese. Následně do vektoru **coef** uloží hodnoty koeficientů regrese.

Výstup: vektor **coef** (koeficienty alpha lineární regrese)

9.4 countCoefA

Vstupy: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření z vybraného období a vyfiltrovaným počtem dní v klidu).

proměnná **days** (číslo - počet dní, které mají vliv na výpočet koeficientu Alpha).

Funkce: Funkce si nejprve inicializuje vektor **a** o velikosti délky proměnné **data** mínus proměnné **days**. Následně pak prochází všechna data a volá funkci **linRegression** pro data na pozici **i** až **i+days**, pro které spočítá koeficient Alpha lineární regrese, který uloží do vektoru **alpha** na pozici **i**.

Výstup: vektor **alpha** (vypočítané hodnoty alpha)

9.5 getCalmIntervals

Vstupy: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

proměnná **calmDays** (číslo - počet klidných dní)

Funkce: Funkce rozděljuje data na období klidu. Tato funkce nejprve proměnné **data** ve formátu Data Frame přidá nový sloupec ‘**období**’ nulových hodnot, která bude nést informaci o pořadí klidného období. Forcyklem prochází každý záznam a pokud v daný záznam je naměřená hodnota těžby ze zásobníku a zároveň vtláčení do zásobníku rovna 0, zvýší se hodnota proměnné **days** o 1. Pokud již proměnná **days** bude rovna, nebo větší než vstupní proměnná **calmDays**, bylo nalezeno nové období, jehož číslo se uloží do proměnné data do sloupce ‘**období**’.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření, rozšířená o sloupec ,**období**’.)

9.6 func

Vstup: vektor **par** (čísla – parametry pro účelovou funkci)
proměnná **data** (Data Frame záznamů měření)

Funkce: Funkce spočítá hodnotu účelové funkce
 $\text{sum}(p \cdot (k \cdot \exp^{(c \cdot t)} + p_{\text{Lim}})^2)$ použitou pro optimalizaci.

Výstup: hodnota účelové funkce jako číslo

9.7 setParams

Vstup: vektor **vector** (obsahující hodnotu tlaků jako čísla)

Funkce: Funkce nejprve inicializuje proměnnou **par** ve formátu vector, která ponese informaci o parametrech pro optimalizační funkci. Následně funkce na základě vývoje tlaku přiřazuje výchozí parametry podle dříve popsaného pravidla. Hodnota koeficientu **k** je uložena v **par[1]**, koeficientu **c** v **par[2]**. Poslední koeficient **p_{lim}** je uložen do **par[3]** .

Výstup: vektor **par** (vektor tří parametrů)

9.8 saveData

Vstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

Funkce: Tato funkce uloží proměnnou **data** do souboru na serveru do složky „../saved/“ a zobrazí dialogové okno o výsledku operace.

9.9 loadData

Funkce: Funkce načte data ze serveru ze složky „../saved/“ do proměnné **data** a zobrazí uživateli dialogové okno o výsledku operace.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující tabulku všech záznamů měření)

9.10 changeDataValues

Vstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

proměnná **row_id** (index záznamu)

proměnná **vtlaceni** (denní hodnota vtláčení plynu)

proměnná **tezba** (denní hodnota těžby plynu)

proměnná **gip** (hodnota množství plynu v zásobníku)

zFaktor (denní hodnota z-faktoru)

Funkce: Funkce uloží do proměnné **data** na pozici **row_id** nová data ze vstupních proměnných.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame nově upravených záznamů)

9.11 countD

Vstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

Funkce: Lineární metodou funkce spočítá hodnoty regrese. Pro výpočet d-hodnoty odečte postupně každou jednotlivou hodnotu regrese od jednotlivé hodnoty p/z v danou chvíli.

Výstup: vektor **dValue** (vektor výsledných d-hodnot)

9.12 getCondition

Vstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření)

Funkce: Rozšíří tabulku záznamů o nový sloupec **stav**. Funkce u každého záznamu dodá novou informaci o stavu zásobníku a to buďto stav

„těžba“ nebo „vtlačení“ na základě hodnoty těžby / vtlačení. Funkce využívá lokální proměnné **last**, do které zaznamenává poslední stav zásobníku, aby bylo možné i u dní klidných, kdy nedochází ani k těžbě, ani vtlačení, zaznamenat předcházející stav zásobníku.

Výstup: proměnná **data** (Data Frame obsahující záznamy měření rozšířený o sloupec „stav“)

9.13 Optimization

Funkce: Globální proměnnou **globalTable** (Data Frame obsahující všechny záznamy měření) rozšíří o hodnoty pořadí intervalů a stavu zásobníku pomocí funkcí **getCalmIntervals** a **getCondition** a uloží do lokální proměnné **table**. Funkce prochází **table** od 1 po **seasons** (maximální hodnota období z tabulky) a pro každé období, delší než 5 dní, vezme vektor tlaků a zavolá funkci **setParams** pro nastavení parametrů optimalizace, poté nalezne koeficienty optimalizace rovnice funkcí **optimx** balíku **optimx** a hodnoty koeficientů uloží do nové tabulky **coefsTable**, společně s informací o prvním a posledním datu daného období, stavu zásobníku a pořadí období.

Výstup: proměnná **coefsTable** (Data Frame spočítaných koeficientů k, c, p_{lim} s datem, pořadím a stavem zásobníku)

9.14 getSeasonOptimization

Vstupy: proměnná **table** (Data Frame obsahující tabulku záznamů s údajem o rozdělení na období)

proměnná **season** (číslo období k optimalizaci)

Funkce: Funkce nejprve vyfiltruje požadované období z tabulky a vezme vektor tlaků **vecP**, který předá funkci **setParams** pro určení počátečních koeficientů optimalizace a následně nalezne optimalizovanou funkci pomocí funkce **optimx** balíku **optimx**.

Funkce dosazením koeficientů do rovnice optimalizace $p(t)=k*e^{(c*t)} + p_{lim}$ spočítá nové přepočítané hodnoty tlaku.

Výstup: proměnná **df** (Data Frame obsahující původní a nově spočítané hodnoty tlaku jednoho období)

9.15 uploadDataFromFile

Funkce: Funkce s využitím balíku **readxl** načte od uživatele soubor ve formátu .xls nebo .xlsx. Nejprve uloží první list souboru do proměnné **datQ** a druhý do **datP**. Tato data jsou následně propojena do jedné tabulky **dat** na základě Data a času. Poté funkce odstraní sloupce s daty, která aplikace nevyužívá a vhodně pojmenuje sloupce se záznamy. Všechny záznamy jsou následně převedeny na vhodný datový formát a zavolá funkci **getPZValue**, která spočítá podíl hodnot tlaku a Z-faktoru. Tabulka záznamů měření je poté uložena do globální proměnné **globalTable** pro pozdější využití.

Výstup: proměnná **dat** (Data Frame obsahující záznamy měření)

9.16 Další funkce

Dalšími funkcemi jsou reaktivační funkce, které se většinou starají o zpracování vstupů od uživatele, potom renderovací funkce, které zprostředkovávají výstup do aplikace ve formě grafů a tabulek a funkce pro ukládání grafů do souborů ve formátu png a pdf.

10 Dokumentace k programu

10.1 Instalace a spuštění programu

Ke spuštění programu je buďto nutné využít vzdáleného serveru využívající jazyka R, na kterém může program běžet a k programu se dostat skrze webový prohlížeč, nebo je nutné nainstalovat nějaké vývojové prostředí R, jako je například RStudio, ve kterém je to pak možné. Je také potřeba nainstalovat použité balíky jazyka R v programu.

Seznam použitých balíků: Shiny, ggplot2, DT, tidyverse, readxl, optimx, shinyjs, shinythemes, scales

Instalace balíků se provádí řádkem: `install.packages('název balíku')`

10.2 Vstupní soubor programu

Na následujícím náhledu je vidět jakým způsobem musí být vstupní soubor ve formátu .xls nebo .xlsx strukturovaný.

Soubor v excelu musí být rozdělen do dvou listů pojmenovaných „P“ a „Q“. První dva řádky jsou vyhrazeny pro název veličin a jednotky. Další řádky již obsahují naměřená data.

Z prvního listu „P“ program potřebuje pouze sloupce A,C a H. Použité sloupce v prvním listu jsou seřazeny následovně:

- A. Datum ve formátu **datum** a to konkrétně **dd\mm\rrrr**
- C. BHP měřený (v jednotkách Mpa) ve formátu **číslo**
- H. Z-faktor BHP měřený ve formátu **číslo**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datum		BHP měřený	BHP přep. PZP	BHP přep. GS		Z-faktor THP	Z-faktor BHP měřený	Z-faktor BHP přep. PZP	Z-faktor BHP přep. GS
2		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		[-]	[-]	[-]	[-]
3	01.01.2006	6,320	6,890	6,780	6,896		0,878568	0,885569	0,887061	0,885484
4	02.01.2006	6,210	6,920	6,660	6,777		0,880390	0,885165	0,888706	0,887099
5	03.01.2006	6,080	6,930	6,520	6,637		0,882563	0,885030	0,890647	0,889030
6	04.01.2006	6,390	6,930	6,090	6,972		0,877416	0,885030	0,896751	0,884465
7	05.01.2006	6,380	6,940	6,100	6,961		0,877580	0,884896	0,896606	0,884611
8	06.01.2006	6,390	6,950	6,850	6,972		0,877416	0,884761	0,886110	0,884465

Obrázek 5: Náhled vstupního souboru I/II

Z druhého listu „Q“ pak program pracuje se sloupci A,B,C,D a použité sloupce postupně obsahují:

- A. Datum ve formátu **datum** a to konkrétně **dd\mm\rrrr**
- B. Vtláčení (v jednotkách Sm^3) ve formátu **číslo**
- C. Těžba (v jednotkách Sm^3) ve formátu **číslo**
- D. GIP (v jednotkách Sm^3) ve formátu **číslo**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datum	Vtláčení	Těžba	GIP	WGV					
2		[sm3]	[sm3]	[sm3]	[sm3]					
335	29.11.2006	0	0	86 662 759	73 962 759					
336	30.11.2006	0	0	86 662 759	73 962 759					
337	01.12.2006	0	0	86 662 759	73 962 759					
338	02.12.2006	0	0	86 662 759	73 962 759					
339	03.12.2006	1 495 821	0	88 158 580	75 458 580					
340	04.12.2006	0	0	88 158 580	75 458 580					
341	05.12.2006	0	0	88 158 580	75 458 580					

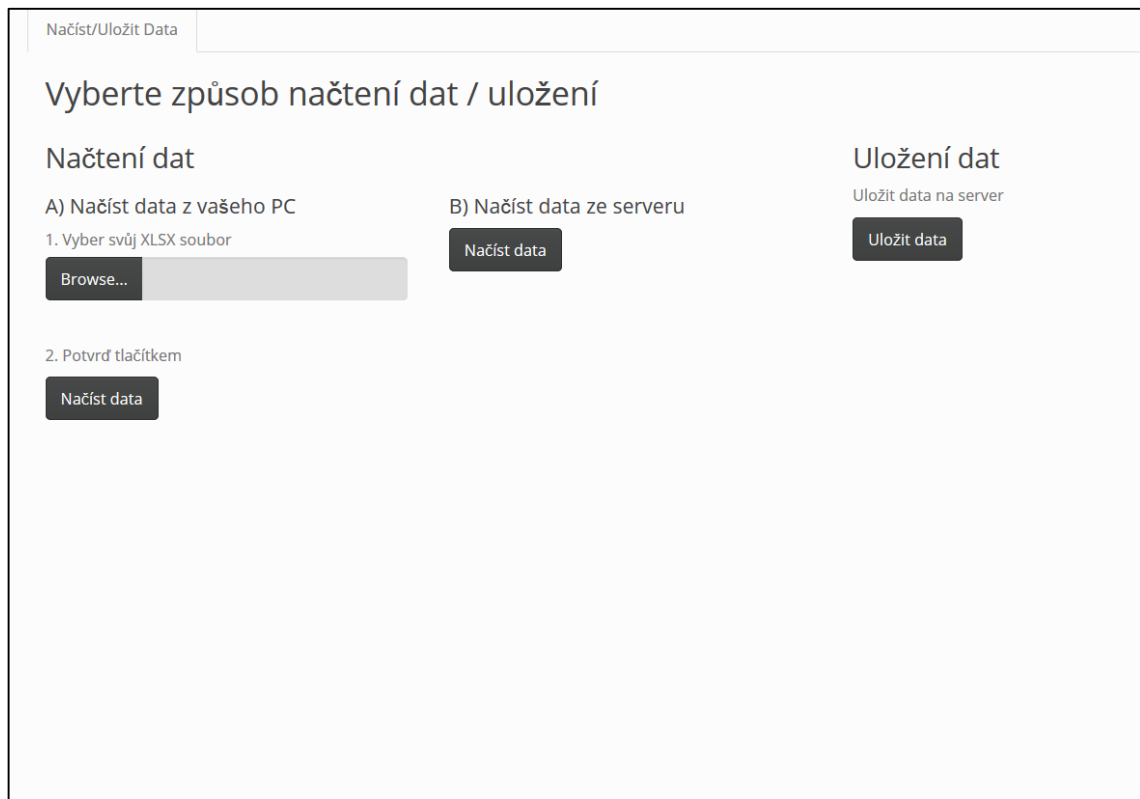
Obrázek 6: Náhled vstupního souboru II/II

10.3 Načtení / uložení dat

Po spuštění programu se uživatel nachází v první záložce, ve které je vyzván k načtení dat, se kterými se bude dále pracovat. Data je možné načíst z vlastního počítače z tabulek s koncovkou .xls nebo .xlsx, které odpovídají dříve zmíněné struktuře. Druhou variantou načtení dat je možnost opětovně nahrát data, která byla již dříve v programu uložena a se kterými se již pracovalo. V této záložce je také možné data, se kterými se bude pracovat

později, nebo budou v programu upravena, uložit pro příští již jednodušší práci s nimi.

O úspěšném načtení dat je uživatel informován formou dialogového okna. Následně se již zpřístupní další části programu.



Obrázek 7: Náhled aplikace – Načíst/Uložit data

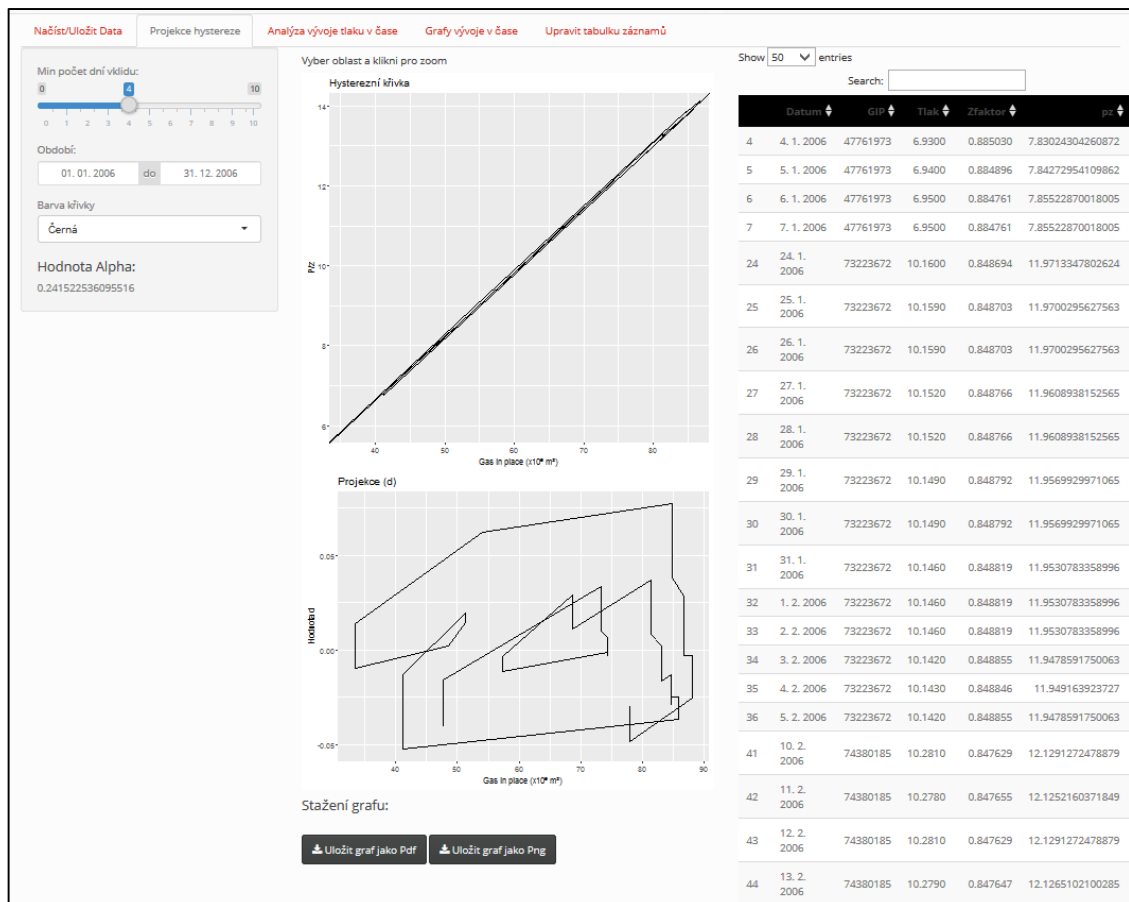
10.4 Projekce hystereze

Po načtení vstupních dat se v této záložce data měření vykreslí do dvou grafů, kterými jsou graf hysterezní křivky a graf projekce hystereze, se kterými se dá následně pracovat.

V levém sloupci se nachází sidebar, ve kterém je možné si zvolit konkrétní období, jehož data se vykreslí do grafů. Následně pod ním je posuvník s výběrem tzv. „klidového období“ – počet dní po těžbě ze zásobníku, resp. vtlačení plynu do zásobníku, které se do grafů nepromítnou. Jako další je pak možnost výběru barvy křivky pro lepší přehlednost grafů.

V hlavní části se nachází této záložky jsou vykresleny dva grafy. První je graf hysterezní křivky, obsahující vývoj naměřených hodnot P/z vůči množství plynu v zásobníku. V grafu je možné se posouvat a vybranou část přiblížit. Pro zvětšení části grafu je nutno oblast označit a dvojitým klikem na tuto oblast ji zvětšit. Obráceně poté pokud je pouze dvojitě kliknuto na graf, dojde k jeho opětovnému oddálení do výchozího zobrazení. V druhém grafu je samotná projekce hysterezní křivky. Pod grafy nalezneme dvě tlačítka „Uložit graf jako...“ pro možnost stažení grafů a to buďto ve formátu PNG, či PDF.

Pravý sloupec obsahuje data měření v tabulce ze souboru, se kterými se v tomto případě pracuje a jsou využita v grafech. Záznamy v tabulce je možné také řadit podle data, či jiné veličiny. Z tabulky je možné vybrat body, které se následně promítnou jako červený bod s datem do grafu hysterezní křivky pro lepší přehlednost, pokud se v něm dané body nachází.



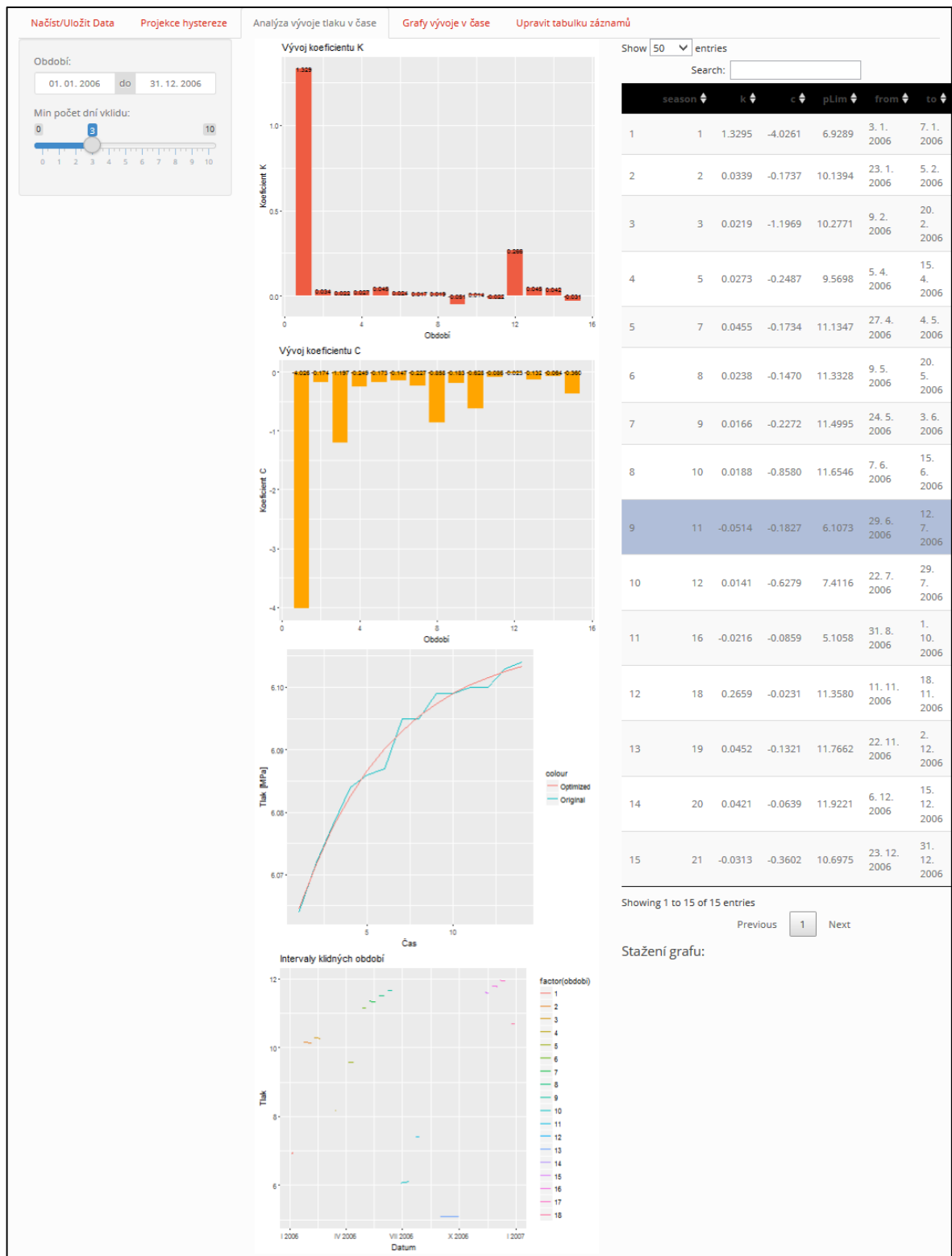
Obrázek 8: Náhled aplikace – Projekce hystereze:

10.5 Analýza vývoje tlaku v čase

V této záložce může uživatel sledovat vývoj tlaků měřených v zásobníku v čase. V levém sloupci se nachází výběr časového období pro sledování vývoje. Dále je zde posuvník s možným výběrem počtu dní klidového stavu zásobníku (kdy nebyl do zásobníku plyn vtlačěn, ani z něj těžen), které nebudou do výpočtů zahrnuty. Automatický předvýběr jsou v tomto případě 3 dny klidového stavu.

Pro analýzu vývoje tlaku je použita metoda nalezení optimální funkce, jejíž koeficienty jsou následně vyneseny do grafů v prostřední části. Na prvním grafu je vidět vývoj koeficientu k , nalezeného pro každé období, na druhém pak koeficient c . Vypočtené koeficienty ke každému období jsou také zaneseny do tabulky na pravé straně. Z tabulky je pak možné vybrat období, které se následně vykreslí do grafu včetně vypočítané optimalizační funkce.

V dolním grafu v prostřední části jsou pak zobrazena všechna období ve vybraném časovém rozmezí.



Obrázek 9: Náhled aplikace - Analýza vývoje tlaku v čase

10.6 Grafy vývoje v čase

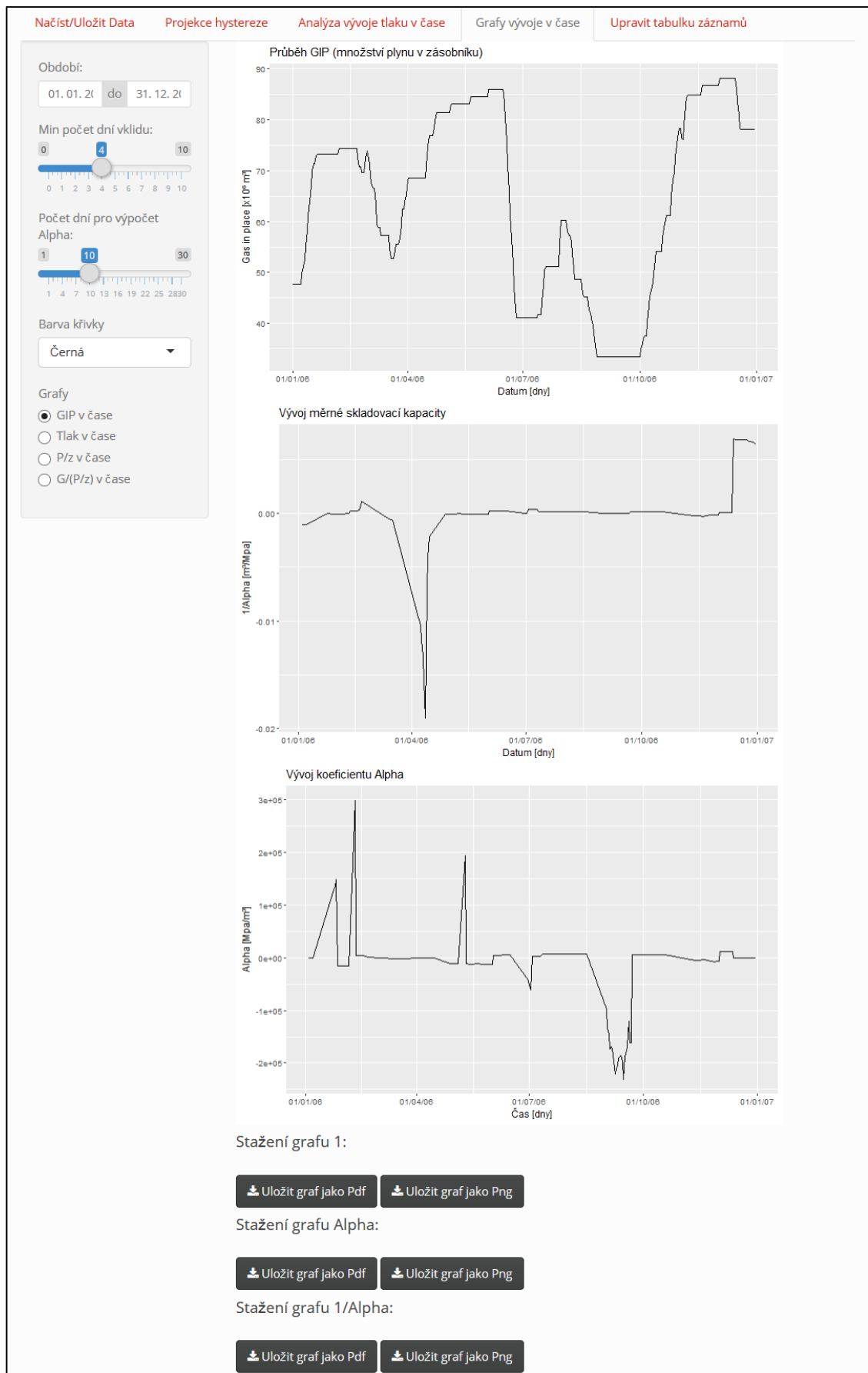
Sidebar v levém sloupci okna umožňuje uživateli výběr období, které je následně promítnuto do grafů a také výběr barvy křivky pro lepší přehlednost grafu v aplikaci, nebo kvůli stažení pro pozdější použití. Dále jsou pak v bočním panelu dva posuvníky, ovlivňující pouze graf vývoje koeficientu Alpha. První posuvník umožňuje uživateli výběr minimálního počtu dní v klidu, které ještě nebudou zaneseny do grafu. Druhým posuvníkem je pak určen počet dní, který slouží pro výpočet Alpha. Poslední v sidebaru je pak výběr grafu pro vykreslení v hlavní části obrazovky.

V hlavní části nalezneme postupně jeden z těchto čtyř grafů:

1. Průběh množství plynu v zásobníku v čase
2. Průběh tlaku v čase
3. Průběh P/z v čase
4. Průběh $G/(P/z)$

a poté dva grafy znázorňující vývoj měrné skladovací kapacity a vývoj koeficientu Alpha v čase.

Grafy je opět možné stáhnout pomocí tlačítek „Uložit graf jako...“ ve formátech PNG, či PDF.



Obrázek 10: Náhled aplikace – Grafy vývoje v čase

10.7 Upravit tabulku záznamů

V této záložce se nachází v hlavní části tabulka se všemi daty, se kterými aplikace pracuje, které uživatel načel. Tabulku je možné seřadit podle data a dalších hodnot. Označením řádku levým klikem se hodnoty daného záznamu zobrazí v pravé části v okně „Upravit záznam“, kde je možné hodnoty k vybranému datu z tabulky upravit, nebo opravit. Uložení změn záznamu do tabulky se provede kliknutím na tlačítko s popisem „Aktualizovat záznam“

The screenshot displays a web application interface. At the top, there are navigation tabs: "Načíst/Uložit Data", "Projekce hystereze", "Analýza vývoje tlaku v čase", "Grafy vývoje v čase", and "Upravit tabulku záznamů". The main content area is titled "Tabulka záznamů" and features a table with 19 visible rows. The table columns are: "Datum", "Vtláčení", "Těžba", "GIP", "Tlak", "Zfaktor", and "pr". To the right of the table is a search bar and a "Show 100 entries" dropdown. On the far right, there is a panel titled "Upravit záznam" containing input fields for "Datum", "Vtláčení", "Těžba", "Gas in place", and "Zfaktor", along with an "Aktualizovat záznam" button.

	Datum	Vtláčení	Těžba	GIP	Tlak	Zfaktor	pr	
1	1. 1. 2006	0	0	47761973	6.8900	0.885569	7.78030847963287	24
2	2. 1. 2006	0	0	47761973	6.9200	0.885165	7.81775149265956	48
3	3. 1. 2006	0	0	47761973	6.9300	0.885030	7.83024304260872	72
4	4. 1. 2006	0	0	47761973	6.9300	0.885030	7.83024304260872	96
5	5. 1. 2006	0	0	47761973	6.9400	0.884896	7.84272954109862	120
6	6. 1. 2006	0	0	47761973	6.9500	0.884761	7.85522870018005	144
7	7. 1. 2006	0	0	47761973	6.9500	0.884761	7.85522870018005	168
8	8. 1. 2006	1988611	0	49750584	6.9500	0.884761	7.85522870018005	192
9	9. 1. 2006	1389822	0	51140406	7.2300	0.881052	8.20609907247245	216
10	10. 1. 2006	1218974	0	52359380	7.4100	0.878720	8.43272032046613	240
11	11. 1. 2006	2869359	0	55228739	7.5800	0.876556	8.64747945368008	264
12	12. 1. 2006	3043588	0	58272327	7.9600	0.871858	9.12992712115964	288
13	13. 1. 2006	2900382	0	61172709	8.3500	0.867242	9.62822372532696	312
14	14. 1. 2006	2885576	0	64058285	8.7200	0.863060	10.1035849187774	336
15	15. 1. 2006	2909107	0	66967392	9.0900	0.859075	10.5811483281436	360
16	16. 1. 2006	2924989	0	69892381	9.4600	0.855292	11.0605500811419	384
17	17. 1. 2006	1502644	0	71395025	9.8300	0.851712	11.5414600240457	408
18	18. 1. 2006	0	0	71395025	9.9900	0.850228	11.7497894682368	432
19	19. 1. 2006	1534438	0	72929463	9.9600	0.850504	11.7107033006312	456
20	20. 1. 2006	294209	0	73233672	10.1800	0.848612	11.9874025269871	480

Obrázek 11: Náhled aplikace – Tabulka záznamů

Závěr

V rámci bakalářské práce jsem vyvinul program sloužící jako nástroj k analýze dat naměřených na podzemním zásobníku Háje.

Program vykreslí hysterezní křivku a projekci hysterezní křivky zásobníku pro vybraný časový interval. Naprogramoval jsem metody pro rozbor vývoje koeficientu α , ze kterého lze sledovat vývoj celkové kapacity zásobníku a měrnou skladovací kapacitu. Dále zkoumám každé období po vtlačení nebo těžbě a analyzuji tlak pomocí nalezení optimalizované funkce, kterou data proložím, vývoj lze sledovat pomocí grafu daného období a také pomocí nalezených koeficientů optimalizované funkce. Program také vykresluje vývoj měřených veličin v čase, jako je tlak, teplota, obsah zásobníku, nebo p/z a další. Data načtená do programu je také možné upravovat a změny uložit pro pozdější použití. Vykreslené grafy lze jednotlivě stáhnout a to vždy ve formátu png či pdf.

Seznam použité literatury

- [1] BUJOK Petr, DORDA Otakar. *Základy těžby a vtlačování plynu*. Ostrava: Katedra Ložiskové a průzkumné geologie HGF VŠE Ostrava. 1985. 166 Stran.
- [2] ZÁKOPČAN Marián. *Podzemní zásobníky plynu*. Hodonín: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2003. 75 Stran.
- [3] BUJOK Petr, GOTTVÁLD Bedřich, HOLÁŇ Jiří, KUMANOV Kyril. *Projektování výstavby a provozu podzemních zásobníků plynu*. Ostrava. 1985. 195 Stran.
- [4] Kolektiv autorů. *Plynárenská příručka*. Praha: GAS s.r.o. 1997. ISBN 80-902339-6-1. 1200 Stran.

Elektronické zdroje:

- [5] *Háje*. Innogy-gasstorage.cz [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.innogy-gasstorage.cz/cs/haje/>
- [6] *Podzemní zásobník zemního plynu Háje u Příbrami*. Wikipedia.org [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Podzemní_zásobník_zemního_plynu_Háje_u_Příbrami
- [7] *Česku zůstal jen ruský plyn, přesto je nezávislejší než dřív*. Idnes.cz [online]. 2016 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: https://ekonomika.idnes.cz/ceska-republika-plyn-rusko-zavislost-zasobniky-fup-/ekonomika.aspx?c=A160319_211823_ekonomika_ane
- [8] *Bývalá štola u Příbrami zásobuje plynem polovinu Česka*. Idnes.cz [online]. 2009 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z:

https://ekonomika.idnes.cz/byvala-stola-u-pribrami-zasobuje-plynem-polovinu-ceska-pil-/ekonomika.aspx?c=A090108_211931_ekonomika_abr

[9] *Plynárenství v ČR – dodávka plynu a základní statistiky*. Oenergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/plyn/plynarenstvi-v-cr-dodavka-plynu-zakladni-statistiky/>

[10] *Optimx*. www.rdocumentation.org [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.rdocumentation.org/packages/optimx/versions/2014.5.4/topics/optimx>

[11] *Compressibility Factor*. www.thermopedia.com [online]. 2011- [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/645/>

[12] *Gas Compressibility Factor*. www.study.com [online]. 2018- [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://study.com/academy/lesson/gas-compressibility-factor.html>

[14] *RStudio*. www.rstudio.com [online]. 2018- [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.rstudio.com/>

[15] *What is R?*. www.r-project.org. 2018- [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.r-project.org/about.html>

[16] *Standing and Katzs Compressibility Factor Chart*. www.researchgate.net. 2019- [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Standing-and-Katzs-compressibility-factor-chart_fig2_288141819

Obsah přiloženého CD

Struktura adresářů na přiloženém CD je následující:

/Dokumentace – text bakalářské práce ve formátu pdf

/Software – zdrojový kód vytvořené aplikace

/Data – vstupní soubor s daty ve formátu xlsx