

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



**Aplikace metody Source-Jerk s  
využitím neutronového generátoru  
na reaktoru VR-1**

**Application of the Source-Jerk  
Method Using a Neutron  
Generator at VR-1 Reactor**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:      Jakub Mátl  
Vedoucí práce:  Ing. Jan Rataj, Ph.D.  
Rok:                2022





Katedra jaderných reaktorů

Akademický rok: 2021/2022

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Mátl**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Aplikace metody Source-Jerk s využitím neutronového generátoru na rektoru VR-1**

Název práce anglicky: Application of the Source-Jerk Method Using a Neutron Generator at the VR-1 Reactor

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s experimentálními metodami stanovení reaktivity na výzkumných jaderných reaktorech a tyto metody ve své práci stručně popište.
2. Podrobně se věnujte metodě Source-Jerk, která se využívá ke stanovení reaktivity v podkritických stavech jaderného reaktoru. Metodu detailně popište, včetně odvození používaných vztahů. Zaměřte se také na podmínky realizace metody, její omezení a nejistoty.
3. Navrhněte, připravte a realizujte na rektoru VR-1 experimenty zaměřené na aplikaci metody Source-Jerk s využitím neutronového generátoru.
4. Získané výsledky přehledně zpracujte, včetně odhadu nejistot a srovnajte je s výsledky, které byly získány standardní metodou Source-Jerk na rektoru VR-1.
5. V závěru diskutujte výhody, nevýhody a omezení aplikace metody Source-Jerk s využitím neutronového generátoru na rektoru VR-1.

### Doporučená literatura:

- [1] Rataj J., Huml O., Sklenka L.: Experimentální neutronová a reaktorová fyzika: laboratorní cvičení, České vysoké učení technické v Praze, 2016, ISBN 978-80-01-05904-3
- [2] Profio A. E.: Experimental Reactor Physics, John Wiley and Sons, 1975, ISBN 978-0471700951
- [3] Stacey W. M.: Nuclear reactor physics. 2nd ed., completely rev. and enlarged. Weinheim: Wiley-VCH, 2007, ISBN 978-3-527-40679-1
- [4] Ryves T. B., Scott M. C.: Subcritical reactivity measurement by a source-jerk method. Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology, 16(9), 455–463, (1962), [https://doi.org/10.1016/0368-3230\(62\)90198-2](https://doi.org/10.1016/0368-3230(62)90198-2)
- [5] Thermo Fisher Scientific Inc.: P 385 Neutron Generator Operation Manual, 2010, Tech. Rep. Manual P/N 120006-A 062907

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

**Ing. Jan Rataj, Ph.D.**  
KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání bakalářské práce:

11.10. 2021

Datum odevzdání bakalářské práce:

7.7. 2022

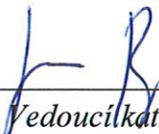
Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 11.10. 2021

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

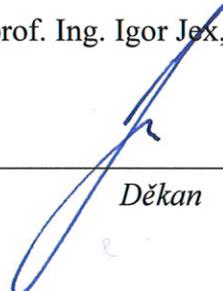
  
\_\_\_\_\_  
Garant oboru

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.

  
\_\_\_\_\_  
Děkan

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....  
Jakub Mátl

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce Ing. Janu Ratajovi, Ph.D. za neocenitelné rady a veškerou pomoc. Také děkuji Lindě Zadinové za jazykovou korekturu a psychickou podporu.

Jakub Mátl

*Název práce:*

**Aplikace metody Source-Jerk s využitím neutronového generátoru na reaktoru VR-1**

*Autor:* Jakub Mátl

*Studijní program:* Aplikace přírodních věd

*Obor:* Jaderné inženýrství

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Jan Rataj, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

*Abstrakt:* Tématem bakalářské práce je aplikace metody Source-Jerk s využitím neutronového D-D generátoru na školním reaktoru VR-1. Zaměřuje se na teoretický popis metod měření reaktivity, experimentální aplikaci metody Source-Jerk a porovnání výsledků se standardními metodami měření reaktivity používanými na školním reaktoru VR-1. V této práci byly popsány metody používané převážně na experimentálních a výzkumných reaktorech. Jako vnější zdroj neutronů pro měření metodou Source-Jerk byl použit neutronový D-D generátor P 385. Výsledné hodnoty byly diskutovány a srovnány s numerickým výpočtem pomocí kódu Serpent 2. Tato práce může dále sloužit jako podklad pro další studie měření reaktivity metodou Source-Jerk na podkritických reaktorech.

*Klíčová slova:* reaktivita, Source-Jerk, metody měření reaktivity, experiment, podkritický reaktor

*Title:*

**Application of the Source-Jerk Method Using a Neutron Generator at VR-1 Reactor**

*Author:* Jakub Mátl

*Study programme:* Applied sciences

*Branch of study:* Nuclear Engineering

*Type of Project:* Bachelor's Project

*Supervisor:* Ing. Jan Rataj, Ph.D.  
Czech Technical University in Prague  
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering  
Department of Nuclear Reactors

*Abstract:* The topic of this bachelor thesis is the application of the Source-Jerk method using a neutron generator at VR-1 reactor. This thesis deals with the theoretical description of reactivity measurement methods, experimental application of the Source-Jerk method with different conditions and comparison of the results obtained with the Source-Jerk method and conventional methods used at VR-1 reactor. The thesis describes most of the reactivity measurement methods used at experimental and research reactors. The neutron D-D generator was used as an external source of neutrons for the Source-Jerk method. The obtained results were discussed and compared with values computed via the Serpent 2 code. This thesis can be used as a basis for further studies on reactivity measurement using the Source-Jerk method on subcritical reactors.

*Key words:* reactivity, Source-Jerk, reactivity measurement methods, experiment, subcritical reactor

# Obsah

Seznam použitých veličin	11
Seznam použitých zkratk	13
Seznam obrázků	14
Úvod	17
<b>1 Teorie</b>	<b>19</b>
1.1 Reaktivita . . . . .	19
1.1.1 Zavedení reaktivity . . . . .	19
1.1.2 Vztahy a jednotky . . . . .	20
1.1.3 Hodnoty reaktivity . . . . .	21
1.2 Metody měření reaktivity . . . . .	23
1.2.1 Metody založené na časové analýze hustoty toku neutronů . . . . .	24
1.2.2 Statistické metody . . . . .	28
1.3 Metoda Source-Jerk - okamžitý skok . . . . .	30
1.4 Metoda Source-Jerk - integrálně . . . . .	31
<b>2 Experimentální měření reaktivity metodou Source-Jerk</b>	<b>35</b>
2.1 Úvod . . . . .	35
2.2 Vybavení . . . . .	35
2.2.1 Neutronový generátor P 385 . . . . .	35
2.2.2 Reaktor VR-1 . . . . .	36
2.2.3 Detektory neutronů . . . . .	36
2.3 Metodika . . . . .	38
2.4 Přípravný experiment . . . . .	39
2.4.1 Popis měření . . . . .	39
2.4.2 Výsledky metody Source-Jerk s generátorem . . . . .	39
2.4.3 Výsledky metody Source-Jerk s AmBe zdrojem . . . . .	42
2.4.4 Diskuze a srovnání . . . . .	44
2.5 Hlavní experimenty . . . . .	45
2.5.1 Popis měření . . . . .	45
2.5.2 Výsledky s neutronovým generátorem a časovým krokem sběru dat 1 s . . . . .	45
2.5.3 Výsledky s AmBe zdrojem a časovým krokem sběru dat 1 s . . . . .	48
2.5.4 Výsledky s neutronovým generátorem a časovým krokem sběru dat 100 ms . . . . .	52
2.5.5 Výsledky s AmBe zdrojem a časovým krokem sběru dat 100 ms . . . . .	56
2.5.6 Diskuze a závěr . . . . .	60
<b>3 Experimentální měření metodou pulsního zdroje</b>	<b>65</b>
3.1 Úvod . . . . .	65
3.2 Příprava . . . . .	65
3.3 Simmonsova metoda . . . . .	65

3.3.1	Výsledky . . . . .	66
3.4	Sjöstrandova metoda . . . . .	67
3.4.1	Výsledky . . . . .	68
3.5	Diskuze a srovnání . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Výpočet</b>	<b>69</b>
4.1	Úvod . . . . .	69
4.2	Popis . . . . .	69
4.3	Kinetické parametry reaktoru . . . . .	69
4.4	Kritičnost reaktoru . . . . .	70
4.5	Rozložení hustoty toku neutronů . . . . .	71
	<b>Závěr</b>	<b>75</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>81</b>
A	Přípravný experiment . . . . .	81
A.1	Bórové detektory v poloze S & neutronový generátor . . . . .	81
A.2	Bórové detektory v poloze V & neutronový generátor . . . . .	81
A.3	Detektory PMV & neutronový generátor . . . . .	82
A.4	Bórové detektory v poloze V & AmBe zdroj . . . . .	83
A.5	Detektory PMV & AmBe zdroj . . . . .	84
B	Hlavní experimenty . . . . .	84
B.1	Bórové detektory s časovým krokem 1 s & neutronový generátor . . . . .	84
B.2	Detektory PMV s časovým krokem 1 s & neutronový generátor . . . . .	85
B.3	Bórové detektory s časovým krokem 1 s & AmBe zdroj . . . . .	86
B.4	Detektory PMV s časovým krokem 1 s & AmBe zdroj . . . . .	87
B.5	Bórové detektory s časovým krokem 100 ms & neutronový generátor . . . . .	88
B.6	Detektory PMV s časovým krokem 100 ms & neutronový generátor . . . . .	89
B.7	Bórové detektory s časovým krokem 100 ms & AmBe zdroj . . . . .	90
B.8	Detektory PMV s časovým krokem 100 ms & AmBe zdroj . . . . .	91

# Seznam použitých veličin

$\beta_{\text{ef}}$	Efektivní podíl zpožděných neutronů (-)
$\beta_{\text{ef},i}$	Efektivní podíl i-té skupiny zpožděných neutronů (-)
$c_i$	Koncentrace mateřských jader i-té skupiny zpožděných neutronů ( $\text{cm}^{-3}$ )
$D$	Koeficient difuze (cm)
$k_{\text{ef}}$	Efektivní koeficient násobení (-)
$l$	Střední doba života okamžitých neutronů (s)
$\bar{l}$	Střední doba života jedné generace neutronů (s)
$n$	Hustota neutronů ( $\text{cm}^{-3}$ )
$t$	Čas (s)
$v$	Rychlost neutronů ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$\alpha$	Konstanta charakterizující úbytek okamžitých neutronů ( $\text{s}^{-1}$ )
$\beta_{\text{ef}}$	Efektivní podíl zpožděných neutronů (-)
$\lambda_i$	Rozpadová konstanta i-té skupiny zpožděných neutronů ( $\text{s}^{-1}$ )
$\Lambda$	Střední doba vzniku okamžitých neutronů (s)
$\rho$	Reaktivita ( $\beta_{\text{ef}}$ , %, pcm)
$\Sigma_a$	Makroskopický účinný průřez pro absorpci ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\Sigma_f$	Makroskopický účinný průřez pro štěpení ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\phi$	Hustota toku neutronů ( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$\nu$	Průměrný počet neutronů uvolněných při jednom štěpení (-)



# Seznam použitých zkratk

**AZ** Aktivní zóna

**SJ** Source-Jerk

**HRK** Horizontální radiální kanál

**PMV** Provozní měření výkonu

**DKP** Dolní koncová poloha

**NG** Neutronový generátor

**MCNP** Transportní kód Monte Carlo - Monte Carlo N-Particle Transport Code

# Seznam obrázků

1.1	Srovnání hodnot reaktivity vypočítané zjednodušenými vztahy. . . . .	21
1.2	Popis metody násobení zdroje. . . . .	24
1.3	Popis Sjöstrandovy metody. . . . .	25
1.4	Popis Simmonsovy metody. . . . .	26
1.5	Popis metody Rod-Drop. . . . .	28
1.6	Popis metody Source-Jerk. . . . .	30
2.1	Řez reaktorem VR-1 se zavedeným neutronovým generátorem P385 v HRK. . . . .	36
2.2	Urychlovací trubice neutronového generátoru P 385. . . . .	36
2.3	Urychlovací trubice v HRK před plným zasunutím. . . . .	36
2.4	Schéma konfigurace AZ C-18. . . . .	37
2.5	Odezva bórových detektorů v poloze S s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	39
2.6	Odezva bórových detektorů v poloze V s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	40
2.7	Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	41
2.8	Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	41
2.9	Odezva bórových detektorů v poloze V s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	42
2.10	Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	43
2.11	Odezva bórových detektorů s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	45
2.12	Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátor. . . . .	46
2.13	Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	47
2.14	Hodnoty reaktivity - detektory PMV 1 a 2 & neutronový generátor. . . . .	47
2.15	Hodnoty reaktivity - detektory PMV 3 a 4 & neutronový generátor. . . . .	48
2.16	Odezva bórových detektorů s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	48
2.17	Hodnoty reaktivity - bórové detektory & AmBe zdroj. . . . .	49
2.18	Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem. . . . .	50
2.19	Hodnoty reaktivity - detektory PMV 1 a 2 - AmBe zdroj. . . . .	50
2.20	Hodnoty reaktivity - detektory PMV 3 a 4 - AmBe zdroj. . . . .	51
2.21	Odezva bórových detektorů s generátorem - logaritmicky a semilogaritmicky. . . . .	52
2.22	Hodnoty reaktivity - detektor B5 & neutronový generátor. . . . .	52
2.23	Hodnoty reaktivity - detektor F3 & neutronový generátor. . . . .	53
2.24	Hodnoty reaktivity - detektor H4 & neutronový generátor. . . . .	53
2.25	Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	54
2.26	Hodnoty reaktivity - detektor PMV1 & neutronový generátor. . . . .	55

2.27	Hodnoty reaktivity - detektor PMV2 & neutronový generátor. . . . .	55
2.28	Hodnoty reaktivity - detektor PMV3 & neutronový generátor. . . . .	55
2.29	Hodnoty reaktivity - detektor PMV4 & neutronový generátor. . . . .	55
2.30	Odezva bórových detektorů s AmBe zdrojem - lineárně a semilogarit- micky. . . . .	56
2.31	Hodnoty reaktivity - detektor B5 & AmBe zdroj . . . . .	56
2.32	Hodnoty reaktivity - detektor F3 & AmBe zdroj. . . . .	57
2.33	Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky. . . . .	58
2.34	Hodnoty reaktivity - detektor PMV1 & AmBe zdroj. . . . .	59
2.35	Hodnoty reaktivity - detektor PMV2 & AmBe zdroj. . . . .	59
2.36	Hodnoty reaktivity - detektor PMV3 & AmBe zdroj. . . . .	59
2.37	Hodnoty reaktivity - detektor PMV4 & AmBe zdroj. . . . .	59
2.38	Hodnoty vážených průměrů reaktivity pro DD generátor při časovém kroku sběru dat 100 ms (tučně) a 1 s. . . . .	62
2.39	Hodnoty vážených průměrů reaktivity pro AmBe zdroj při časovém kroku sběru dat 100 ms (tučně) a 1 s. . . . .	63
3.1	Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem. . . . .	66
3.2	Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem - semilogaritmicky. . . . .	67
3.3	Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem - semilogartmicky. . . . .	68
4.1	Rozložení hustoty toku tepelných neutronů v AZ reaktoru při zapnu- tém neutronovém generátoru. . . . .	71
4.2	Rozložení hustoty toku tepelných neutronů v AZ reaktoru při AmBe zdroji v pracovní poloze. . . . .	72
4.3	Rozložení hustoty toku rychlých neutronů v AZ reaktoru při zapnu- tém neutronovém generátoru. . . . .	72
4.4	Rozložení hustoty toku rychlých neutronů v AZ reaktoru při AmBe zdroji v pracovní poloze. . . . .	73



# Úvod

Reaktivita je jedním z hlavních provozních parametrů jaderného reaktoru, a proto je potřeba rozvíjet metody, které jsou schopny reaktivitu stanovit v různých stavech jaderného reaktoru. Znalost této veličiny je zásadní pro řízení reaktoru a pro udržení štěpné řetězové reakce.

Na školním reaktoru VR-1 je reaktivita stanovována především experimentálními metodami Rod-Drop a Source-Jerk. Tyto metody jsou založeny na studiu odezvy reaktoru v případě vyvolání poruchy v aktivní zóně pomocí pádu absorpčních tyčí, resp. odstranění vnějšího neutronového zdroje. K výpočtům jsou používány stochastické výpočetní programy MCNP a Serpent 2.

Hlavním cílem této práce byla aplikace metody Source-Jerk s neutronovým generátorem na reaktoru VR-1. První kapitola se věnuje teoretickému zavedení koeficientu násobení a reaktivity. Dále je v této kapitole popsána většina metod měření reaktivity používaných na výzkumných a experimentálních reaktorech, přičemž hlavní důraz je brán na metodu Source-Jerk. V druhé kapitole jsou zpracována experimentální měření metodou Source-Jerk s využitím neutronového DD generátoru. Pro srovnání bylo realizováno také standardní měření metodou Source-Jerk s využitím radionuklidového zdroje typu Americium Berylium. Kapitola se věnuje metodice, vybavení, popisu samotného měření a diskuzi naměřených hodnot. Pro nezávislé ověření výsledků a rozšíření experimentálního měření je v třetí kapitole zpracováno měření metodou pulsního zdroje realizované na reaktoru VR-1. V poslední kapitole jsou uvedeny numericky napočítané provozní parametry reaktoru.



# Kapitola 1

## Teorie

### 1.1 Reaktivita

Reaktivita je jedním z klíčových provozních parametrů jaderného reaktoru. Charakterizuje schopnost jaderného reaktoru násobit neutrony. Dle vztahu ke koeficientu násobení představuje relativní odchylku od kritického stavu, tj.

$$\rho = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{k_{\text{ef}}}. \quad (1.1)$$

Z této rovnice je zřejmé, že se jedná o bezrozměrnou veličinu [1].

#### 1.1.1 Zavedení reaktivity

Pro lepší pochopení problematiky koeficientu násobení  $k$  a reaktivity  $\rho$  bude význam těchto veličin odvozen, a to za následujících předpokladů. Pro jednoduchost bude předpokládána jednogrupová aproximace a platnost Fickova zákona. Násobící systém bez vnějšího zdroje neutronů je popsán difuzní rovnicí:

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + \nu\Sigma_f\phi = \frac{1}{v}\frac{\partial\phi}{\partial t}, \quad (1.2)$$

kde  $D$  (cm) je koeficient difuze,  $\phi$  (cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) je hustota toku neutronů,  $\Sigma_{a,f}$  (cm<sup>-1</sup>) makroskopické účinné průřezy pro absorpci a štěpení,  $\nu$  (-) je průměrný počet neutronů uvolněných při jednom štěpení,  $v$  (cm·s<sup>-1</sup>) rychlost neutronů a  $t$  (s) čas. Jedná se o bilanční rovnici pro hustotu toku neutronů. První člen představuje únik neutronů ze systému, druhý člen představuje absorpci neutronů a třetí člen představuje štěpení a produkci nových neutronů. Člen na pravé straně popisuje časovou změnu hustoty toku neutronů. Všechny tyto úvahy stále platí pouze pro jednu skupinu neutronů. Využitím parametru  $k$  (zatím bez významu) k upravení členu  $\nu\Sigma_f\phi$  popisující vznik neutronů se difuzní rovnice převede do stacionárního stavu:

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + \frac{\nu}{k}\Sigma_f\phi = 0. \quad (1.3)$$

Z tohoto postupu je jasně vidět, že pokud by byl do původního systému s vydatností  $\nu\Sigma_f\phi$  vnesen zdroj neutronů o vydatnosti

$$\left(\frac{1}{k} - 1\right)\nu\Sigma_f\phi, \quad (1.4)$$

byl by systém kritický. Po vyjádření konstanty  $k$  z rovnice 1.3 nabude tento koeficient významu podílu produkce a zániku neutronů, kde zánik v představuje jak absorpci, tak i únik neutronů ze systému [2]:

$$k = \frac{\nu \Sigma_f \phi}{\Sigma_a \phi - D \nabla^2 \phi} = \frac{\text{produkce}}{\text{zánik}}. \quad (1.5)$$

Jelikož v reálném reaktoru dochází k rezonanční absorpci, štěpení rychlými neutrony a dalším interakcím, definuje se efektivní koeficient násobení  $k_{\text{ef}}$  jako podíl produkce a zániku neutronů v reálném systému [1].

Pro nekonečný reaktor, ve kterém neprobíhá rezonanční absorpce, platí předpoklad, že nedochází k úniku neutronů ze systému, tj.  $D \cdot \nabla^2 \phi = 0$ . Všechny neutrony jsou tedy nakonec absorbovány a způsobí štěpení. Rovnice 1.5 poté přejde do tvaru:

$$k_{\infty} = \frac{\nu \Sigma_f \phi}{\Sigma_a \phi}, \quad (1.6)$$

kde ze všech původních  $\Sigma_a \phi$  neutronů, které se absorbovaly, vznikne  $\nu \Sigma_f \phi$  nových neutronů. Koeficient násobení pro nekonečný reaktor  $k_{\infty}$  proto představuje podíl mezi počtem neutronů v  $N + 1$  a  $N$ -té generaci [2].

V kritickém stavu reaktoru nastává rovnováha mezi produkcí a zánikem neutronů, tedy koeficient násobení  $k = 1$ . Jelikož je reaktivita definovaná jako relativní odchylka od kritického stavu, tak z rovnice 1.5 platí:

$$\rho \equiv \frac{k - 1}{k} = \frac{\text{produkce} - \text{zánik}}{\text{produkce}}. \quad (1.7)$$

Reaktivita tedy představuje poměr rozdílu produkce a zániku neutronů vůči produkci neutronů. Pokud je produkce rovna zániku neutronů, je reaktor kritický a  $\rho = 0$  [2].

Reaktivita a koeficient násobení v reálném případě závisí na řadě parametrů jaderného reaktoru, například na složení a geometrii AZ reaktoru, výkonu reaktoru, teplotě, tlaku atd. Koeficient násobení také závisí na čase, neboť v jaderném reaktoru dochází k vyhořívání paliva, čímž se mění poměr absorbovaných neutronů a nově vznikajících štěpných neutronů [1].

Závislost reaktivity na některých z výše uvedených parametrů jako teplota, výkon či koncentrace kyseliny borité se dá kvantitativně vyjádřit pomocí tzv. koeficientů reaktivity. Ty tvoří nedílnou součást bezpečnostní analýzy jaderných reaktorů. Další veličinou nedílně spjatou s řízením jaderného reaktoru je váha absorpční tyče. Ta je definována jako změna reaktivity vyvolaná plným zasunutím tyče do aktivní zóny jaderného reaktoru [2].

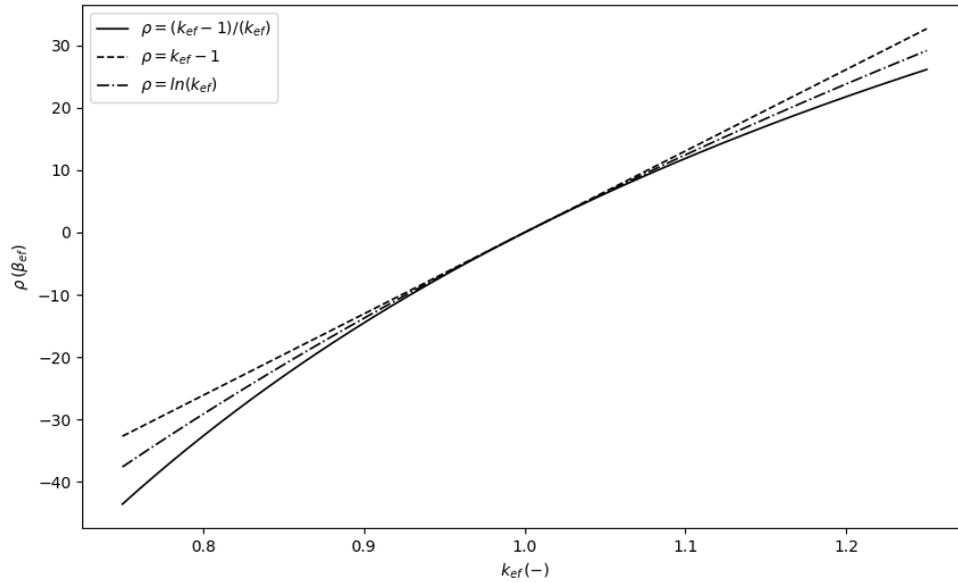
## 1.1.2 Vztahy a jednotky

Pro  $k_{\text{ef}} \in (0,95; 1,05)$  lze s odchylkou od standardní vztahu do 5% použít pro výpočet reaktivity zjednodušený vztah :

$$\rho = k_{\text{ef}} - 1. \quad (1.8)$$

Pro  $k_{\text{ef}} \in (0,90; 1,05)$  lze s chybou do 5 % použít vztah [3]:

$$\rho = \ln(k_{\text{ef}}). \quad (1.9)$$



**Obrázek 1.1:** Srovnání hodnot reaktivity vypočítané zjednodušenými vztahy.

Jak už bylo uvedeno, reaktivita  $\rho$  je bezrozměrnou veličinou nabývajícím pro reaktor v kritickém stavu hodnot  $\rho = 0$ , v nadkritickém, resp. podkritickém stavu hodnot  $\rho > 0$ , resp.  $\rho < 0$ . Její hodnoty bývají doplněny pomocnými násobky<sup>1</sup>:

$$\rho(\%) = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{k_{\text{ef}}} \cdot 100, \quad (1.10)$$

$$\rho(\text{pcm}) = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{k_{\text{ef}}} \cdot 10^5, \quad (1.11)$$

$$\rho(\beta_{\text{ef}}) = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{k_{\text{ef}}} \cdot \frac{1}{\beta_{\text{ef}}}, \quad (1.12)$$

kde  $\beta_{\text{ef}}$  představuje efektivní podíl zpožděných neutronů [3].

### 1.1.3 Hodnoty reaktivity

V následující tabulce jsou porovnány hodnoty reaktivity vypočtené pomocí vztahů 1.8 a 1.9.

<sup>1</sup>V 1.12 je reaktivita často značena místo  $\beta_{\text{ef}}$  v dollarech [ $\$$ ] (respektive centech [ $c$ ] = [ $\$ \cdot 100$ ]), jedná se však o stejnou jednotku.

**Tabulka 1.1:** Srovnání vypočtených hodnot reaktivity pro různá vyjádření.

$k_{\text{ef}}$	$\rho = \frac{k_{\text{ef}}-1}{k_{\text{ef}}}$	$\rho = \ln(k_{\text{ef}})$	odch. od klas. def. (%)	$\rho = k_{\text{ef}} - 1$	odch. od klas. def. (%)
0,9	-0,111	-0,105	5,458	-0,1	11,1
0,95	-0,052	-0,051	2,609	-0,05	5,3
0,98	-0,020	-0,020	1,016	-0,02	2,0
0,99	-0,010	-0,010	0,504	-0,01	1,0
0,995	-0,005	-0,005	0,251	-0,005	0,5
1	0	0	0	0	0
1,005	0,004	0,005	-0,249	0,005	-0,5
1,01	0,009	0,010	-0,496	0,01	-1,0
1,02	0,019	0,020	-0,984	0,02	-2,0
1,05	0,047	0,048	-2,400	0,05	-4,8
1,1	0,091	0,095	-4,618	0,1	-9,1

Pro představu jsou v Tab. 1.2 uvedeny vypočtené hodnoty koeficientu násobení a reaktivity pro různé polohy absorpčních tyčí na reaktoru VR-1, kde

- B1,2,3 značí bezpečnostní tyče,
- E1, E2 značí experimentální tyče,
- R1, R2 značí regulační tyče.

K výpočtu byl použit výpočetní program Serpent 2 a 8-grupová knihovna Jeff 3.3. Tučně označené hodnoty značí kritický stav reaktoru. Podíl zpožděných neutronů  $\beta_{\text{ef}}$  byl napočítán pro kritický stav reaktoru [4].

**Tabulka 1.2:** Vypočtené hodnoty  $k_{\text{ef}}$  a  $\rho$  pro různé polohy řídicích tyčí v AZ C18 školního reaktoru VR-1.

polohy řídicích tyčí [mm]					$\beta_{\text{ef}} = 7,887 \cdot 10^{-3}$				
B1,2,3	E1	E2	R1	R2	$k_{\text{ef}}$	$\rho [\beta_{\text{ef}}]$	$\rho [-]$	$\rho [\%]$	$\rho [\text{pcm}]$
0	0	0	0	0	0,929	-9,633	-0,076	-76	-76
680	680	0	680	680	1,014	1,756	0,014	14	14000
680	335	0	680	680	1,005	0,580	0,005	0,5	500
680	335	0	414	680	<b>0,999</b>	-0,012	$-9,5 \cdot 10^{-5}$	-0,095	-9,5
680	335	0	680	404	<b>1,000</b>	0,000	0,000	0,00	0

Z provozní zkušenosti plyne, že pro optimální řízení reaktoru je limit pro vnos kladné reaktivity 20 c ( $0,2 \beta_{\text{ef}}$ ). Maximální povolená rychlost vnosu kladné reaktivity pro reaktor VR-1 je 10 c za s.

## 1.2 Metody měření reaktivity

Metody měření reaktivity se obvykle dělí do dvou skupin [5]:

- a) Metody založené na časové analýze hustoty toku neutronů,
- b) Metody statistické.

V této práci budou rozebrány metody z první skupiny a statistická metoda Rossi- $\alpha$ . Veškeré metody založené na časové analýze hustoty toku neutronů jsou postaveny na tzv. modelu jednobodové kinetiky, který uvažuje konstantní rychlost neutronů a hustotu neutronů jako funkci pouze času  $t$ .

Hustota neutronů  $n$ , resp. koncentrace mateřských jader  $c_i$   $i$ -té skupiny zpožděných neutronů v reaktoru může být popsána nezávisle na poloze rovnicemi jednobodové kinetiky buď v produkčním tvaru:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) + S(t) \quad (1.13)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \cdot n(t) - \lambda_i c_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (1.14)$$

nebo v pozměněném tvaru v tzv. destrukčním tvaru:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{k_{\text{ef}} \cdot (1 - \beta_{\text{ef}}) - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) + S(t) \quad (1.15)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{\text{ef},i} \cdot k_{\text{ef}}}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (1.16)$$

kde

- $n(t)$  je hustota neutronů, ( $\text{cm}^{-3}$ )
- $\beta_{\text{ef}}$  je efektivní podíl zpožděných neutronů, (-)
- $\Lambda$  je střední doba vzniku okamžitých neutronů, (s)
- $\lambda_i$  je rozpadová konstanta  $i$ -té skupiny zpožděných neutronů, ( $\text{s}^{-1}$ )
- $S(t)$  je zdrojový člen neutronů, ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $l$  je střední doba života okamžitých neutronů, (s)
- $c_i(t)$  je koncentrace  $i$ -té skupiny mateřských jader zpožděných neutronů. ( $\text{cm}^{-3}$ )

V předchozích úvahách bylo uvažováno 6 skupin zpožděných neutronů. Rovnice 1.13, 1.14, 1.15 a 1.16 mohou být rovněž zjednodušeny např. vyloučením vnějšího zdroje neutronů  $S(t)$ , uvažováním pouze jedné skupiny zpožděných neutronů, či jejich úplným zanedbáním atd [2, 3].

Pro teoretický popis jednotlivých metod vycházejících z rovnic jednobodové kinetiky se využívá hustota neutronů  $n(t)$ . Ve skutečnosti se při měření získává odezva detektoru (imp./s), která je hustotě neutronů  $n(t)$  úměrná.

### 1.2.1 Metody založené na časové analýze hustoty toku neutronů

V této práci budou kromě samotné metody Source-Jerk nastíněny některé z dalších metod používaných nejen na výzkumných reaktorech, a to:

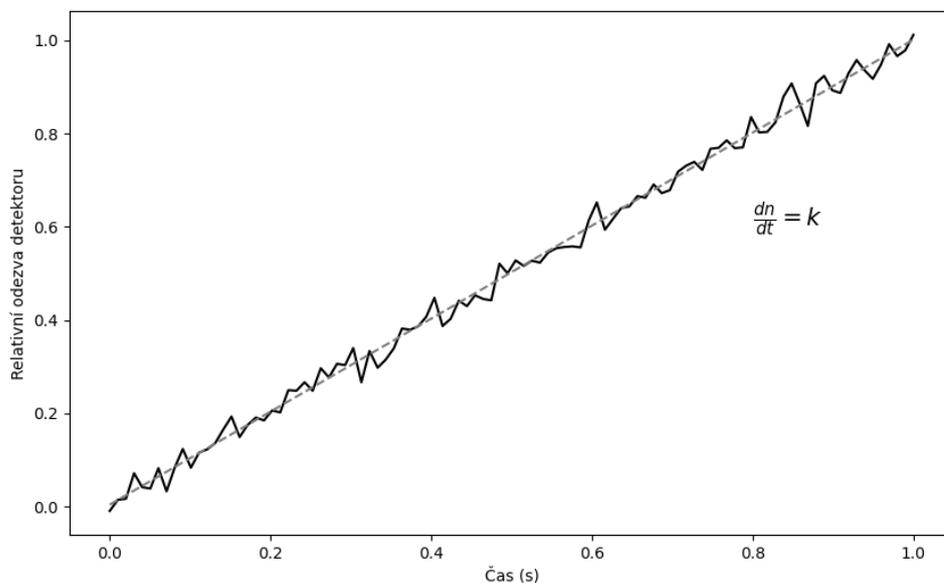
- Metoda násobení zdroje,
- Sjöstrandova metoda,
- Simmonsova metoda,
- Metoda kladné periody,
- Měření reaktivity pomocí reaktimetru,
- Metoda Rod-Drop.

Většina těchto metod je založena na zkoumání odezvy jaderného reaktoru v závislosti na čase  $t$ . Odezva reaktoru se zkoumá vytvořením poruchy (pádem absorpčních tyčí, odstraněním vnějšího zdroje neutronů), nebo zavedením vnějšího zdroje neutronů (metoda násobení zdroje), či pulsního zdroje neutronů (např. Sjöstrandova nebo Simmonsova metoda) [5].

#### Metoda násobení zdroje

Metoda násobení zdroje slouží k určování reaktivity podkritického reaktoru a je založená na měření odezvy násobícího systému v kritickém i podkritickém stavu s vnějším zdrojem neutronů [3].

Nejprve je reaktor uveden do kritického stavu a poté je zaveden vnější zdroj neutronů. Z řešení rovnic jednobodové kinetiky vyplývá, že hustota neutronů poroste lineárně se směrnici  $k$  viz Obr. 1.2 [3].



**Obrázek 1.2:** Popis metody násobení zdroje.

Lineární růst je popsán směrnicí  $k$ , tedy:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{S \cdot l}{\bar{l}} \equiv k. \quad (1.17)$$

Reaktor se poté uvede pomocí absorpčních tyčí do podkritického stavu s vnějším zdrojem neutronů a směrnicí  $k$  neutronů se dosadí do vztahu 1.18 pro reaktivitu  $\rho$ :

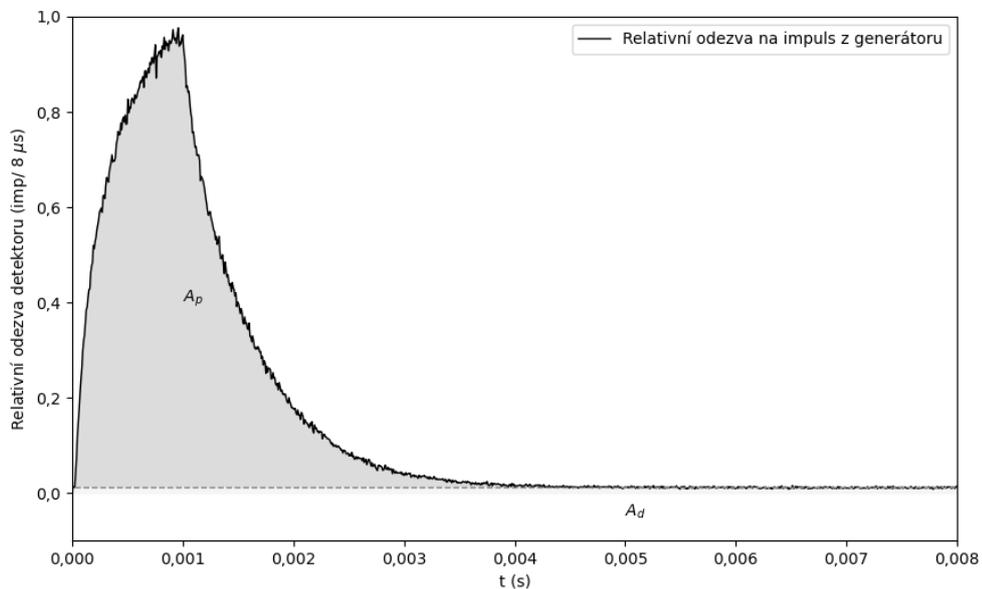
$$\rho(\beta_{\text{ef}}) = -\frac{\bar{l} \cdot k}{n_0 \cdot \beta_{\text{ef}}}, \quad (1.18)$$

kde  $l$  je střední doba života okamžitých neutronů,  $\bar{l}$  je střední doba života jedné generace neutronů,  $S$  je zdrojový člen a  $k$  je směrnicí [3].

### Metody pulsního zdroje

Metody pulsního zdroje stanovují reaktivitu podkritického systému zkoumáním odezvy na puls, resp. pulsy neutronů vyvolané vnějším zdrojem neutronů [6].

**Sjöstrandova metoda** Rozdělením odezvy detektoru na odezvu odpovídající okamžitým a zpožděným neutronům při pulsu vyvolaném vnějším zdrojem je možné získat plochy  $A_p$ , resp.  $A_d$  viz Obr. 1.3. Z těchto ploch je možné reaktivitu stanovit dle vztahu 1.19.



**Obrázek 1.3:** Popis Sjöstrandovy metody.

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{A_p}{A_d} \quad (1.19)$$

Výhodou této metody je její jednoduchost a také fakt, že  $A_p$  resp.  $A_d$  jsou integrály, tedy opakovaným měřením lze jejich hodnotu zpřesnit [7].

**Simmonsova metoda** Druhá pulsní metoda je opět založena na zkoumání odezvy podkritického reaktoru na impuls, resp. impulsy vyvolané vnějším zdrojem neutronů. Při zanedbání vlivu zpožděných neutronů přejde rovnice jednobodové kinetiky 1.13 na tvar:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha \cdot n(t). \quad (1.20)$$

Řešením rovnice 1.20 je exponenciální funkce 1.21:

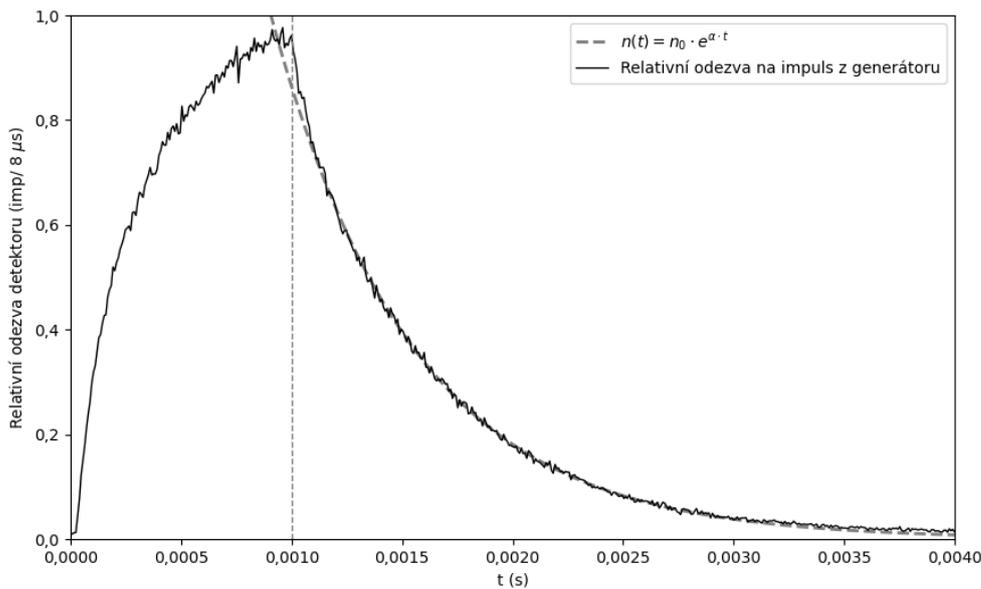
$$n(t) = n_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (1.21)$$

kde

$$\alpha = \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} \quad (1.22)$$

je konstanta charakterizující úbytek okamžitých neutronů. Naměřené četnosti odpovídající hustotě neutronů je možno proložit exponenciální funkcí a nalézt konstantu  $\alpha$ , a tedy i reaktivitu  $\rho$  [7].

Průběh odezvy je naznačen na 1.4.



**Obrázek 1.4:** Popis Simmonsovy metody.

Výhodou Simmonsovy metody je, že úpravou rovnice 1.22 na

$$\frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} - 1 \right) \quad (1.23)$$

lze nepřímo ověřit kinetické parametry  $\frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}}$ , které jsou většinou získávány pomocí numerických simulací. Nevýhodou obou těchto metod je jejich silná prostorová závislost [7].

### Metoda kladné periody

Předpokladem této metody je, že reaktor je v počátečním stavu kritický. Poté je do reaktoru zanesena co nejrychleji kladná reaktivita  $\Delta\rho$ , např. vytažením absorpční

tyče. Při zanedbání vlivu přechodových procesů bude hustota neutronů exponenciálně růst s charakteristickou asymptotickou periodou  $T_{as}$  (s) dle vztahu:

$$n(t) = A_0 \cdot e^{\frac{t}{T_{as}}}, \quad (1.24)$$

kde  $A_0$  je konstanta. Asymptotické periodě odpovídá reaktivita:

$$\rho = \frac{1}{T_{as}} \cdot \left( \Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ef,i}}{\frac{1}{T_{as}} + \lambda_i} \right), \quad (1.25)$$

kde  $\lambda_i$  je rozpadová konstanta  $i$ -té skupiny zpožděných neutronů. Bylo uvažováno 6 skupin zpožděných neutronů. Nevýhodou metody kladné periody je fakt, že vnesená kladná změna reaktivity je z bezpečnostních důvodů limitována [3].

### Metoda inverzní kinetiky

Určování reaktivity systému může probíhat i přímým řešením rovnic tzv. „inverzní“ kinetiky. Jedná se o přepis původních rovnic jednobodové kinetiky, kdy se reaktivita vyjádří jako funkce hustoty neutronů  $n(t)$  a vnějšího zdroje neutronů  $S(t)$ . Rovnice pro reaktivitu má tvar:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda \cdot \frac{dn}{dt} + \beta_{ef} - n_0 \cdot \sum_{i=1}^6 \beta_{ef,i} \cdot e^{-\lambda_i \cdot t}}{n(t)} - \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_{ef,i} \cdot \lambda_i \cdot \int_0^t n(u) \cdot e^{-\lambda_i \cdot u} du - \Lambda \cdot S(t)}{n(t)}, \quad (1.26)$$

kde člen  $S(t)$  představuje vnější zdroj neutronů a lze jej určit například metodou násobení zdroje. Metoda inverzní kinetiky se uplatňuje v reaktimetrech, zařízeních měřících reaktivitu. Ty se skládají z detektoru neutronů, vhodné aparatury pro zpracování signálu a počítače s numerickým algoritmem řešícím rovnici 1.26. Výhodou reaktimetru je jeho schopnost měřit reaktivitu systému v reálném čase [3].

### Metoda Rod-Drop

Metoda Rod-Drop (ať ve formě okamžitého skoku nebo v integrální formě) je jedna z nejpoužívanějších metod pro určování váhy absorpčních tyčí. Níže uvedené vztahy vychází z řešení rovnic jednobodové kinetiky.

Předpokladem je kritický stav reaktoru, kdy v čase  $t = 0$  je pádem absorpční tyče do systému skokově zanesena záporná reaktivita. Vztah pro výpočet reaktivity má tvar:

$$\frac{\rho}{\beta_{ef}} = 1 - \frac{n_0}{n_1}, \quad (1.27)$$

kde  $n_0$  a  $n_1$  jsou naměřené odezvy detektorů před a po pádu absorpční tyče [3].

Lze rovněž odvodit vztah uvažující změnu v koncentraci mateřských jader zpožděných neutronů. Reaktivita se určí dle rovnice 1.28:

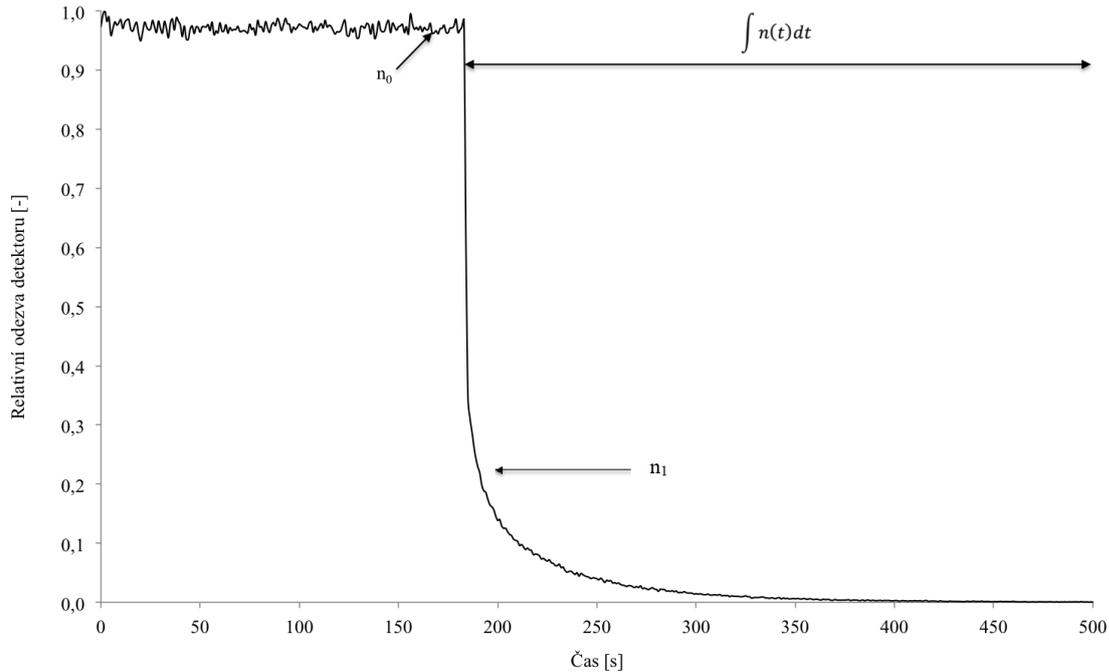
$$\frac{\rho}{\beta_{ef}} = -\frac{n_0}{\int n(t) dt} \left[ \frac{1}{\beta_{ef}} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ef,i}}{\lambda_i} + \frac{\Lambda}{\beta_{ef}} \right]. \quad (1.28)$$

Střední doba vzniku okamžitých neutronů  $\Lambda$  ovšem závisí na reaktivitě, která je hledaným parametrem. Jelikož je však  $\frac{\Lambda}{\beta_{ef}} \sim 10^{-2} \ll \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{ef,i}}{\lambda \beta_{ef}}$ , tak je možné rovnici

zjednodušit na explicitní tvar [3]:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{n_0}{\int n(t) dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right]. \quad (1.29)$$

Aplikace metody Rod-Drop je naznačena na Obr.1.5.



**Obrázek 1.5:** Popis metody Rod-Drop.

Aplikovatelnost této metody je limitována, neboť rychlost pádu absorpčních tyčí je vždy konečná. Při odvození obou vztahů 1.27 a 1.28 se ovšem předpokládá, že pád absorpčních tyčí je okamžitý. Proto je pro aplikaci metody Rod-Drop vhodné, aby doba potřebná pro zasunutí absorpčních tyčí byla kratší, než je nejkratší  $\lambda_i^{-1}$ . Za předpokladu 6 skupin zpožděných neutronů tedy kratší jak 0,33 s [3].

Tento předpoklad není ovšem na školním reaktoru VR-1 splněn, jelikož pád absorpční tyče trvá zhruba 0,7 - 0,8 s.

Nevýhodou metody je, že stejně jako většina z předešlých metod vykazuje silnou prostorovou závislost a umístění detektoru bude pro přesnost měření esenciální. Výhodou metody je její aplikovatelnost na většinu používaných reaktorů [6].

## 1.2.2 Statistické metody

Níže popsaná statistická metoda Rossi- $\alpha$  je stejně jako Simmonsova metoda závislá pouze na odezvě od okamžitých neutronů. V principu se sleduje korelace počtu detekovaných neutronů, díky které se získává informace o konstantě  $\alpha$ , pro kterou platí [5]:

$$\alpha = \frac{k_{\text{ef}} - 1}{l}. \quad (1.30)$$

## Metoda Rossi- $\alpha$

Metoda Rossi- $\alpha$  je založena na studiu fluktuace odezvy detektoru pro lehce podkritické reaktory. Předpokládá se zanedbatelnost teplotních a termo-hydraulických efektů. To znamená, že měřená četnost závisí pouze na počtu neutronů z jednoho štěpení, časem mezi jednotlivými srážkami a na makroskopických účinných průřezech pro štěpení, absorpci a rozptyl [8]. Z toho vyplývá, že metoda Rossi- $\alpha$  se využívá především na reaktorech nulového výkonu.

Cílem metody je experimentálně určit hodnotu konstanty  $\alpha$  charakterizující úbytek okamžitých neutronů. Ta se získá proložením četnosti detekovaných neutronů exponenciální funkcí [5].

Nechť v čase  $t_0$  dojde ke štěpení, při kterém jsou detekovány okamžité neutrony. Následně mohou být v čase  $t_0 + \Delta t$  detekovány buď zpožděné neutrony, neutrony vzniklé v jiném štěpení, anebo neutrony z vnějšího zdroje. Neutrony je možné rozdělit do dvou skupin: náhodné neutrony z jiných štěpení nebo vnějšího zdroje a zpožděné neutrony z původního štěpení. Šance, že bude zaznamenán náhodný neutron se v čase nemění, kdežto pravděpodobnost detekce neutronu z původního štěpení se v čase exponenciálně klesá. Potom pravděpodobnost detekce neutronu v časovém intervalu  $(t_0; t_0 + \Delta t)$  bude:

$$P(t)\Delta t = A\Delta t + Be^{-\alpha t}\Delta t, \quad (1.31)$$

kde  $A\Delta t$  je člen představující pravděpodobnost detekce náhodného neutronu. Konstanta  $B$  závisí na účinnosti detektoru, průměrné reakční rychlosti štěpení, průměrném počtu neutronů z jednoho štěpení a  $\beta_{ef}$ . Spolu s  $e^{-\alpha t}\Delta t$  představují pravděpodobnost detekce neutronu z původního štěpení [8].

Reaktivita se nakonec určí ze vztahu:

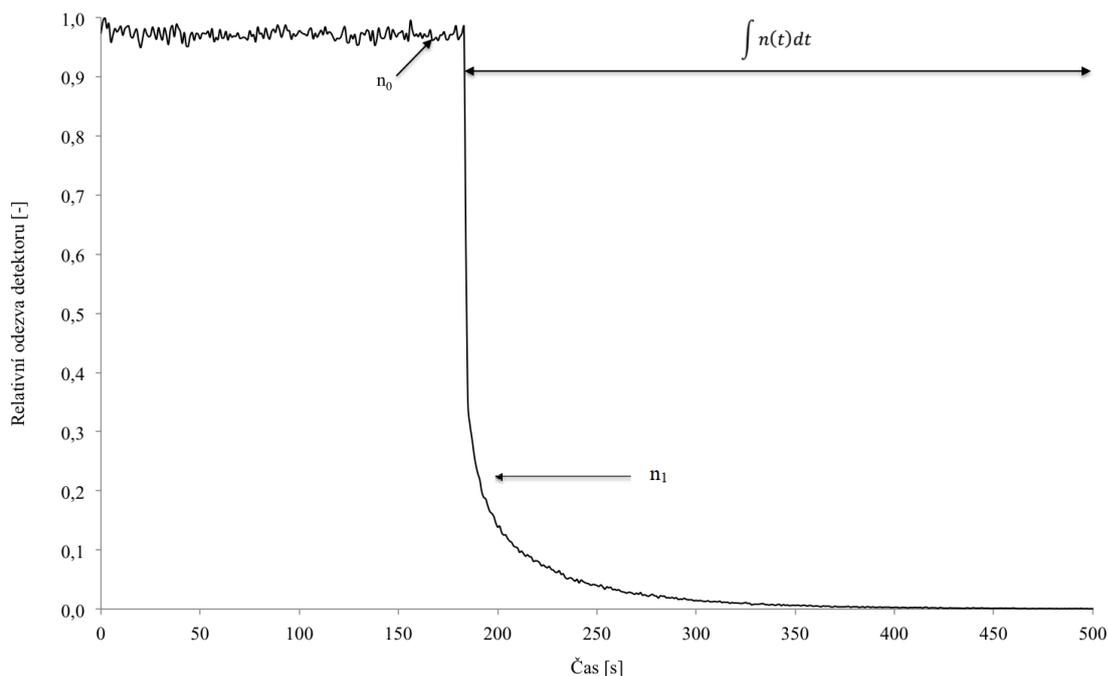
$$\alpha = \frac{\rho - \beta_{ef}}{\Lambda}. \quad (1.32)$$

## 1.3 Metoda Source-Jerk - okamžitý skok

### Odvození

Metoda Source-Jerk je velice podobná metodě Rod-Drop, avšak na rozdíl od ní se realizuje pomocí vnějšího zdroje neutronů.

Předpokladem je reaktor v podkritickém stavu, který je udržovaný vnějším zdrojem neutronů a v tomto stavu je měřena četnost  $n_0$ . Poté je v čase  $t = 0$  zdroj odstraněn a dojde k okamžitému skoku na kvazistacionární stav  $n_1$ . Následně dochází k exponenciálnímu poklesu koncentrace mateřských jader zpožděných neutronů viz Obr. 1.6 [7].



Obrázek 1.6: Popis metody Source-Jerk.

Z následujících úvah bude odvozen vztah pro výpočet reaktivity. Nechť je reaktor ve stacionárním podkritickém stavu s vnějším zdrojem neutronů  $S$ . Rovnice 1.13 a 1.14 přejdou na tvar:

$$0 = \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} n_0 + \sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot c_{i,0} + S, \quad (1.33)$$

$$0 = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} n_0 - \lambda_i \cdot c_{i,0}, \quad (1.34)$$

přičemž bylo uvažováno 8 skupin zpožděných neutronů. Rovnice 1.33 a 1.34 je možné upravit do tvaru

$$n_0 = -\frac{\Lambda \cdot (\sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot c_{i,0} + S)}{\rho - \beta_{\text{ef}}}, \quad (1.35)$$

$$\lambda_i \cdot c_{i,0} = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} n_0. \quad (1.36)$$

Dosazením 1.36 do 1.35 bude:

$$S = -\frac{n_0 \cdot \rho}{\Lambda}. \quad (1.37)$$

Pro stav po odstranění zdroje  $S$  se předpokládá nezměněná koncentrace mateřských jader zpožděných neutronů. Rovnici 1.33 popisující stav po odstranění zdroje je možné upravit na:

$$n_1 = -\frac{\Lambda \cdot \sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot c_{i,0}}{\rho - \beta_{\text{ef}}} \quad (1.38)$$

Po podělení 1.35 a 1.38, kde za  $S$  se dosadí výraz 1.37 a za  $\lambda_i \cdot c_{i,0}$  výraz 1.36 přejdou rovnice na:

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 - \frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} \longrightarrow \frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = 1 - \frac{n_0}{n_1}. \quad (1.39)$$

## Popis metody

Jak bylo výše odvozeno, vztah pro výpočet reaktivity má tvar

$$\frac{n_0}{n_1} = 1 - \frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}}, \quad (1.40)$$

tedy po úpravě

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = 1 - \frac{n_1}{n_0}. \quad (1.41)$$

U metod Source-Jerk a Rod-Drop ve variantě okamžitého skoku lze považovat za výhody jejich relativní rychlost měření a možnost opakování za relativně krátký časový interval. Zároveň z jednoduchosti vztahů plyne i snazší reprodukovatelnost výsledků [6].

Metoda Source-Jerk má několik omezení limitující její přesnost a použitelnost. Za prvé, jak bylo zmíněno u předešlých metod, tak i tato metoda je silně prostorově závislá. Odezvy  $n_0$  a  $n_1$ , resp. jejich podíl se může lišit pro různé uložení detektorů, což může vést k rozdílným naměřeným hodnotám reaktivity. Tento problém je způsoben vlivem vyšších harmonických funkcí hustoty neutronů. Další problém nastává pro silně podkritické systémy, kdy odezva detektoru po odstranění vnějšího zdroje neutronů může být o několik řádů nižší než odezva  $n_0$ . To může způsobit problematické určení hodnot  $n_1$ , a tedy i hodnot  $\rho$ . Další omezení je rychlost odstranění zdroje. V odvození byl uvažován čas potřebný pro odstranění zdroje  $t = 0$ , což není ovšem reálně možné provést. Mimo jiné je také potřeba zajistit, aby čas  $t$  byl zanedbatelný oproti době života skupiny s největší  $\lambda_i$ . Pokud by tomu tak nebylo, tak by část skupiny zpožděných neutronů zanikla dříve než by byl zdroj plně odstraněn [9].

## 1.4 Metoda Source-Jerk - integrálně

### Odvození

Integrální metoda Source-Jerk se od varianty okamžitého skoku liší tím, že sleduje a počítá s hustotou integrovanou od vypnutí vnějšího zdroje až do teoreticky konstantního toku  $n_b$ , který se předpokládá nulový. Na rozdíl od okamžitého skoku uvažuje změnu v koncentraci jader zpožděných neutronů [3].

Metoda opět vychází z rovnic jednobodové kinetiky 1.13 a 1.14. V prvním kroku bude rovnice zintegrována od času  $t = 0$ , kdy dojde k odstranění zdroje, až po čas  $t = \infty$ , kdy hustota neutronů poklesne na  $n_B = 0$ :

$$\int_0^\infty dn(t) = \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} \cdot \int_0^\infty n(t) dt + \sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot \int_0^\infty c_i(t) dt + \int_0^\infty S(t) dt, \quad (1.42)$$

$$\int_0^{\infty} dc_i(t) = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \int_0^{\infty} n(t) dt - \lambda_i \cdot \int_0^{\infty} c_i(t) dt. \quad (1.43)$$

Nechť platí následující počáteční podmínky:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} S(t) dt &= 0, \\ n(t=0) &= n_0, & n(t \rightarrow \infty) &= n_b = 0, \\ c_i(t=0) &= c_{i,0}, & c_i(t \rightarrow \infty) &= c_{i,b} = 0. \end{aligned} \quad (1.44)$$

Z těchto podmínek přejdou rovnice 1.42 a 1.43 na tvar

$$-n_0 = \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt + \sum_{i=1}^8 \lambda_i \cdot \int_0^{\infty} c_i(t) dt, \quad (1.45)$$

$$-c_{i,0} = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt - \lambda_i \cdot \int_0^{\infty} c_i(t) dt. \quad (1.46)$$

V ustáleném stavu jaderného reaktoru musí pro koncentraci mateřských jader zpožděných neutronů platit

$$0 = \frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \cdot n_0 - \lambda_i \cdot c_{i,0} \longrightarrow c_{i,0} = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda \cdot \lambda_i} \cdot n_0 \quad (1.47)$$

a po dosazení tohoto vztahu do 1.46 bude získána rovnice

$$\lambda_i \cdot \int_0^{\infty} c_i(t) dt = \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt + \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda \cdot \lambda_i} \cdot n_0. \quad (1.48)$$

Po dosazení 1.48 do 1.45 a úpravě přejdou rovnice na:

$$\begin{aligned} -n_0 &= \frac{\rho - \beta_{\text{ef}}}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt + \sum_{i=1}^8 \left( \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt + \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda \cdot \lambda_i} \cdot n_0 \right) \\ &= \frac{\rho}{\Lambda} \cdot \int_0^{\infty} n(t) dt + \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\Lambda \cdot \lambda_i} \cdot n_0. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Z předchozí rovnice se reaktivita  $\rho$  již vyjádří jako

$$\rho = \frac{-n_0}{\int_0^{\infty} n(t) dt} \cdot \left( \Lambda + \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right) \quad (1.50)$$

a po vydělení  $\beta_{\text{ef}}$  přejde vztah pro výpočet reaktivity na

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = - \frac{n_0 \cdot \left( \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} + \frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}} \right)}{\int_0^{\infty} n(t) dt}. \quad (1.51)$$

## Popis integrální metody Source-Jerk

Vztah pro výpočet reaktivity má tvar

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{n_0}{\int_0^\infty n(t) dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} + \frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}} \right], \quad (1.52)$$

přičemž bylo uvažováno 8 skupin zpožděných neutronů [3].

Stejně jako v případě metody Rod-Drop, tak i v rovnici 1.52 člen  $\frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}}$  závisí na koeficientu násobení, který má být určen. Jelikož platí, že  $\frac{\Lambda}{\beta_{\text{ef}}} \sim 10^{-2} \ll \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\beta_{\text{ef}}\lambda_i} \sim 10$ , může být vztah 1.52 zjednodušen do tvaru [3]:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{n_0}{\int_0^\infty n(t) dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right]. \quad (1.53)$$

Při skutečném měření však odezva  $n_B$  není nulová, protože jsou neustále detekovány neutrony z přirozeného pozadí a okolních zdrojů. Proto se provádí korekce vztahu 1.53 [9]:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{n_0 - n_B}{\int_0^\infty n(t) - n_B dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right]. \quad (1.54)$$

Další zjednodušení se při skutečném měření provádí u integrálu  $\int_0^\infty n(t) - n_B dt$ . Integraci není možné provádět po nekonečně dlouhou dobu, a proto se volí horní mez integrálu alespoň 5 poločasů rozpadu skupiny z nejdelším poločasem rozpadu. Ten se většinou uvádí zhruba 55 s, tedy optimální horní hranice integrálu bude alespoň 300 s. Po této době se předpokládá, že veškerá mateřská jádra zpožděných neutronů již vymřou. Vztah pro výpočet reaktivity bude mít tvar [3]:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{n_0 - n_B}{\int_0^{300} n(t) - n_B dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right]. \quad (1.55)$$

Konstanta

$$\frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \equiv \frac{1}{\lambda} \quad (1.56)$$

je hodnota váženého průměru rozpadové konstanty, někdy nazývané také časová konstanta. Je funkcí času a závisí jak na rozpadových konstantách jednotlivých skupin zpožděných neutronů, tak na jednotlivých  $\beta_{\text{ef},i}$  těchto skupin. Všechny tyto parametry závisí na konfiguraci, složení a geometrii AZ reaktoru a mnoha dalších faktorech. Při měření podkritičnosti touto metodou je zapotřebí znát tyto kinetické parametry, které pro výpočet klasickou metodou Source-Jerk nebyly potřeba [9].

Hlavní nevýhodou metody Source-Jerk je předpoklad platnosti rovnic jednobodové kinetiky. Pro získání odpovídajících výsledků je potřeba, aby odezva detektoru byla úměrná fundamentálnímu řešení. Tento předpoklad není vždy splněn a právě jako většina rozebíraných metod, tak i metoda Source-Jerk vykazuje silnou prostorovou závislost. Pozice detektoru a zdroje neutronů hraje hlavní roli při optimalizaci měření [9].



# Kapitola 2

## Experimentální měření reaktivity metodou Source-Jerk

### 2.1 Úvod

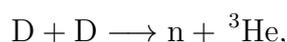
Cílem experimentální činnosti na školním reaktoru VR-1 v rámci této práce bylo využít neutronový D-D generátor P385 k měření reaktivity integrální metodou Source-Jerk, popsání nepřesností a problematiky měření a srovnání výsledků s metodou Source-Jerk při použití standardně využívaného AmBe zdroje. Pro určení kinetických parametrů aktivní zóny (AZ) pro metodu Source Jerk (SJ) byl použit výpočetní program Serpent 2.

### 2.2 Vybavení

Pro měření byl využit školní reaktor VR-1 v odstaveném stavu, tj. veškeré absorpční tyče byly zasunuty v dolní koncové poloze (DKP). Pro detekci neutronů byly použity dále popsané bórové koronové detektory SNM10 a štěpné detektory provozního měření výkonu (PMV). Jako zdroj neutronů byl použit neutronový generátor P 385 a radionuklidový zdroj typu Americium Beryllium.

#### 2.2.1 Neutronový generátor P 385

Neutronový generátor P385 od firmy Thermo Fischer Scientific je zdrojem kvazi-monoenergetických neutronů s energií okolo 2,4 MeV. Produkce neutronů je založena na fúzní reakci

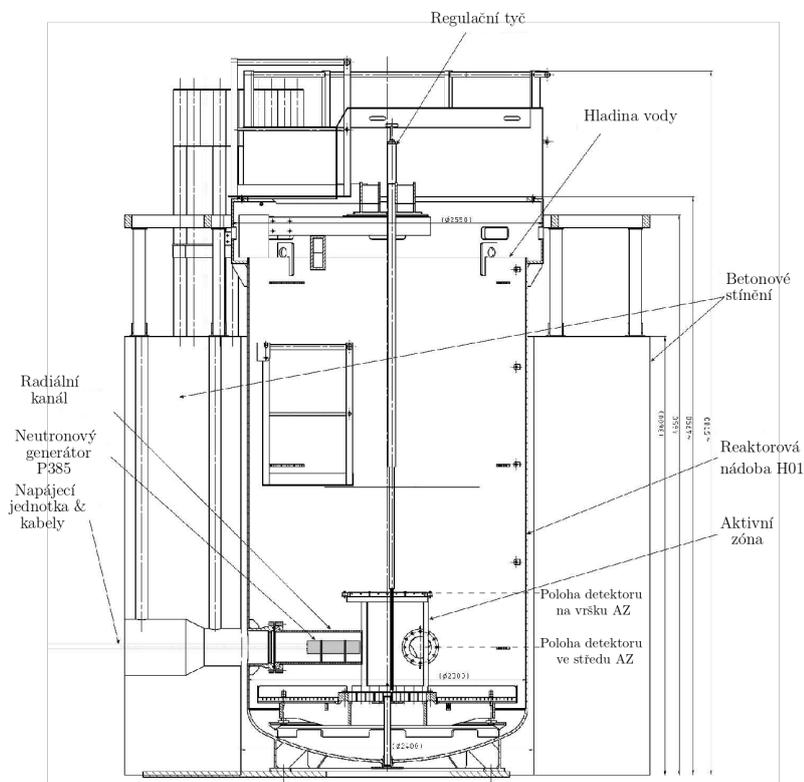


přičemž emisivita činí zhruba  $7 \cdot 10^6$  neutronů za sekundu. Generátor může pracovat jak v pulsním, tak i v kontinuálním režimu a skládá se z několika komponent: urychlovací trubice, elektronické řídicí jednotky se zdrojem napětí, signalizační lampy a bezpečnostního tlačítka. Maximální urychlovací napětí je 130 kV a maximální proud  $70 \mu\text{A}$ . Při pulsním režimu je ověřený rozsah frekvencí od 100 Hz do 20 kHz.

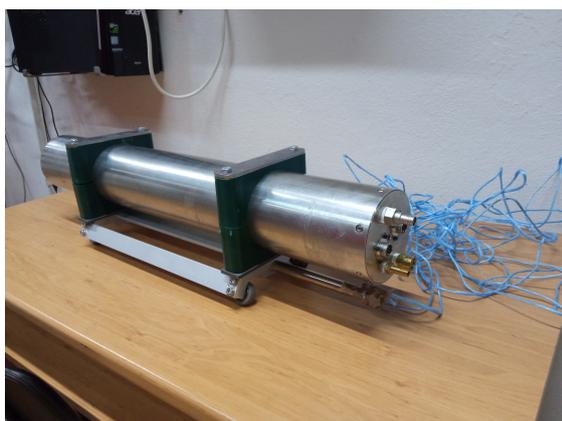
Pro experimentální měření v rámci této práce byl vždy neutronový generátor nastaven na napětí **120 kV** a proud  **$70 \mu\text{A}$** .

## 2.2.2 Reaktor VR-1

Měření metodou Source-Jerk bylo provedeno na reaktoru VR-1 v odstaveném stavu, tj. všechny absorpční tyče byly v DKP. Neutronový generátor byl umístěn v radiálním kanálu reaktoru, přičemž z kanálu byly vyjmuty vodní zátky. Řez reaktorem společně s polohou neutronového generátoru je naznačen na Obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Řez reaktorem VR-1 se zavedeným neutronovým generátorem P385 v HRK.



Obrázek 2.2: Urychlovací trubice neutronového generátoru P 385.

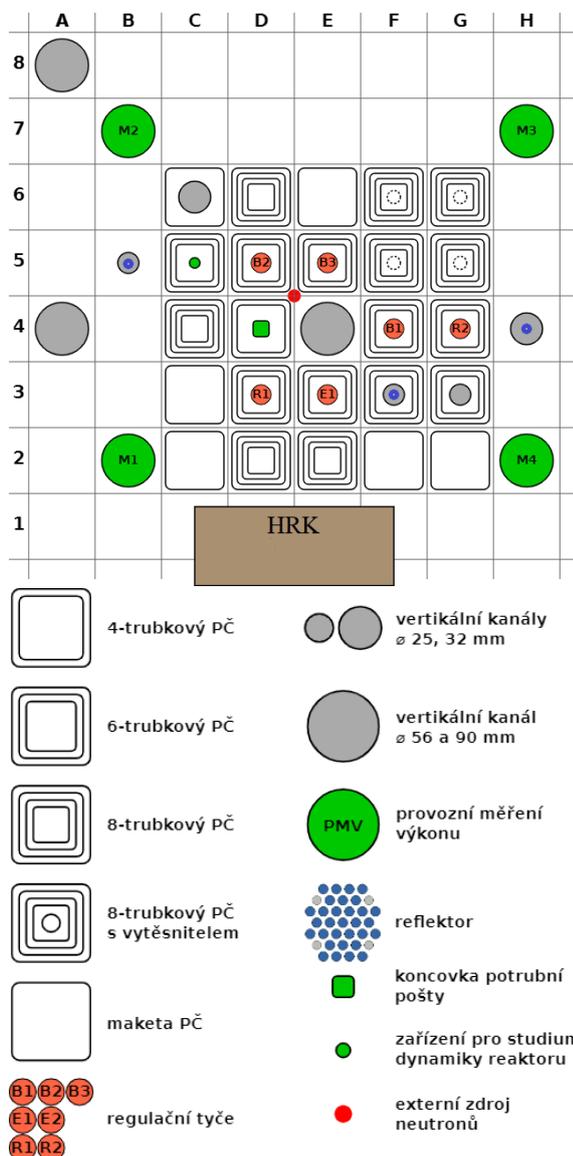


Obrázek 2.3: Urychlovací trubice v HRK před plným zasunutím.

## 2.2.3 Detektory neutronů

Pro detekci neutronů a určení měřených četností byly použity bórové koronové detektory SNM10 a širokopásmové štěpné detektory RJ-1300 (PMV). Konvertorem

v bórových detektorech je  $^{10}\text{B}$  a štěpné detektory jsou tvořeny  $^{235}\text{U}$  s obohacením více jak 93 %. Signál z detektorů SNM10 byl zpracováván v analyzátoru EMK-310 při napětí 1500 V, signál z detektorů PMV byl zpracováván hlavním počítačem při napětí 400 V. Průměr trubice bórových detektorů je 18,5 mm a délka 336 mm, průměr trubice detektorů PMV je 50 mm a délka 275 mm. Detektory PMV byly pevně ukotveny v pozicích B2, B7, H2 a H7 ve fixní výšce nad středem AZ, bórové detektory byly vloženy do pozic B5, F3 a H4 do výšky, kdy dno detektoru odpovídalo středu, resp. vrchní části AZ. Pozice detektorů je naznačena na Obr. 2.1. Modré kroužky představují pozice detektorů SNM-10 a M1, 2, 3 a 4 pozice detektorů PMV.



Obrázek 2.4: Schéma konfigurace AZ C-18.

## 2.3 Metodika

Pro výpočet reaktivity byla použita integrální varianta metody SJ. Vztah pro výpočet reaktivity má tvar:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = - \frac{n_0 - n_b}{\int_0^{300} n(t) - n_b dt} \left[ \frac{1}{\beta_{\text{ef}}} \sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i} \right], \quad (2.1)$$

kdy bylo uvažováno 8 skupin zpožděných neutronů. Z tohoto vztahu plyne, že cílem měření bylo získat hodnotu odezvy  $n_0$  před odstraněním zdroje, integrál po odstranění zdroje  $\int n(t) dt$  a hodnotu pozadí  $n_B$ .

Pro výpočet bylo potřeba předem určit kinetické parametry  $\beta_{\text{ef},i}$  a  $\lambda_i$ . V Tab.2.1 jsou uvedeny tyto hodnoty vypočtené kódem Serpent 2 a knihovnou Jeff 3.3 pro odstavený reaktor (více v kapitole 4). Výpočty kinetických parametrů nebyly předmětem této práce a byly poskytnuty.

**Tabulka 2.1:** Kinetické parametry AZ - knihovna JEFF 3.3 - otevřený radiální kanál.

	$\beta_{\text{ef}}$	$5,00163 \cdot 10^{-5} \pm 3,00100 \cdot 10^{-8}$
	$\Lambda$	$7,947 \cdot 10^{-3} \pm 9,53700 \cdot 10^{-6}$
skupina	$\beta_{\text{ef}}$	$\lambda$
1	$2,70183 \cdot 10^{-4} \pm 1,89100 \cdot 10^{-6}$	$1,24667 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
2	$1,18180 \cdot 10^{-3} \pm 3,78200 \cdot 10^{-6}$	$2,82917 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
3	$7,50609 \cdot 10^{-4} \pm 3,00200 \cdot 10^{-6}$	$4,25244 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
4	$1,56508 \cdot 10^{-3} \pm 4,38200 \cdot 10^{-6}$	$1,33042 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
5	$2,59736 \cdot 10^{-3} \pm 5,71400 \cdot 10^{-6}$	$2,92467 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
6	$7,36615 \cdot 10^{-4} \pm 2,94600 \cdot 10^{-6}$	$6,66488 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
7	$6,54765 \cdot 10^{-4} \pm 2,75000 \cdot 10^{-6}$	$1,63478 \pm 00000$
8	$1,90750 \cdot 10^{-4} \pm 1,54500 \cdot 10^{-6}$	$3,55460 \pm 00000$
$\sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i \cdot \beta_{\text{ef}}}$		$1,29983 \cdot 10^{-1} \pm 3,15140 \cdot 10^{-2}$

Odezva před odstraněním zdroje  $n_0$  se získala jako průměrná hodnota naměřených četností po dobu 300 vteřin, kdy se předpokládalo normální rozdělení naměřených hodnot. Moment odstranění zdroje byl určen silným poklesem odezvy. Hodnota integrálu  $\int n(t) dt$  se získala lichoběžníkovou numerickou integrací v intervalu 300 s od odstranění zdroje, statistická chyba integrálu se určila jako odmocnina z hodnoty integrálu. Hodnota  $n_B$  se získala jako průměrná hodnota odezvy pozadí. V závislosti na množství dat a poklesu odezvy se určila doba průměrování, ve většině případů 300 s. Předpokládalo se Poissonovo rozdělení (stejně jako u integrálu). Měření reaktivity se několikrát opakovalo a pro interpretaci výsledných hodnot byl použit vztah pro výpočet váženého průměru reaktivity  $\rho$ :

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\rho_i}{s_i^2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{s_i^2}}, \quad (2.2)$$

kde  $s_i^2$  je rozptyl reaktivity při  $i$ -tém měření.

## 2.4 Přípravný experiment

Cílem tohoto experimentu bylo primárně nalézt vhodnou polohu bórových detektorů pro měření a získat počáteční odhad stavu systému.

### 2.4.1 Popis měření

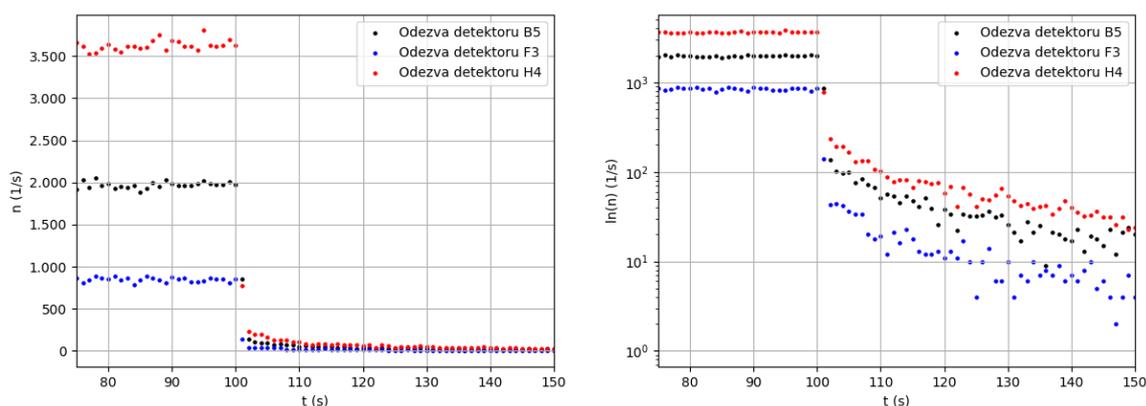
Měření bylo rozděleno do třech částí. Při každém měření se získávala odezva jak z detektorů SNM, tak z detektorů PMV. V závislosti na měření se měnilo vertikální uložení bórových detektorů a externí zdroj neutronů. První tři měření byla provedena s bórovými detektory v poloze S, tj. dno detektoru odpovídalo středu AZ a s neutronovým generátorem. Druhá trojice měření byla provedena pro bórové detektory v poloze V a rovněž s neutronovým generátorem. Poslední dvojice měření byla provedena pro bórové detektory v poloze V a AmBe zdroj.

Časový krok měření byl nastaven na 1 s.

### 2.4.2 Výsledky metody Source-Jerk s generátorem

#### Bórové detektory v poloze S

Odezva všech třech bórových detektorů v poloze S s neutronovým generátorem je vykreslena na Obr. 2.5. Pro přehlednost je vždy uvedena v lineárním a semilogaritmickém měřítku. V příloze v Tab. 4, 5 a 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty četností  $n_0$  před vypnutím, integrál z odezvy detektoru  $\int n(t)$  a průměrné hodnoty odezvy přirozeného pozadí  $n_B$ .



**Obrázek 2.5:** Odezva bórových detektorů v poloze S s generátorem - lineárně a semilogaritmicky.

Po vypnutí generátoru došlo k poklesu odezvy na úroveň pozadí zhruba po 150 s. Měřené četnosti byly v této konfiguraci v porovnání s ostatními největší.

Ze získaných hodnot byly pomocí vztahu 2.1 napočítány hodnoty reaktivity uvedené v Tab. 2.2 .

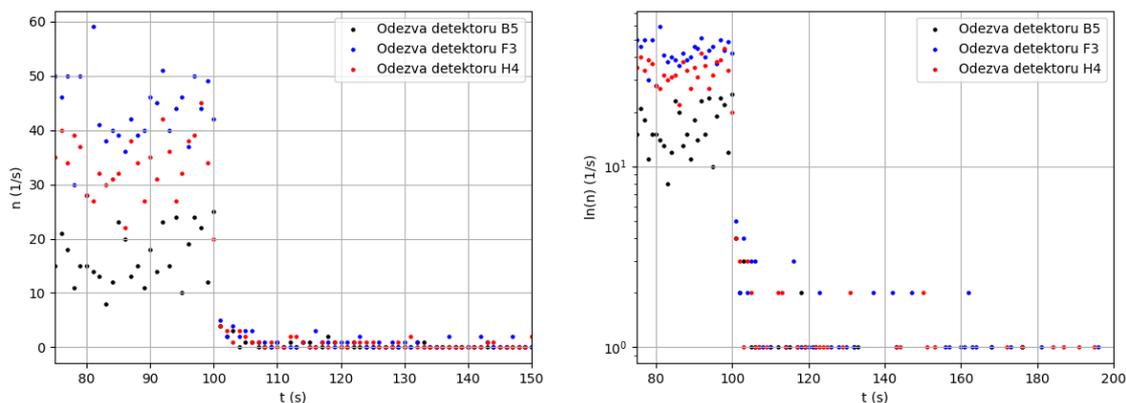
**Tabulka 2.2:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátor - poloha S.

měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	$-8,94 \pm 0,18$	$-11,74 \pm 0,42$	$-9,96 \pm 0,16$
2.	$-9,11 \pm 0,21$	$-8,56 \pm 0,26$	$-9,07 \pm 0,14$
3.	$-8,89 \pm 0,21$	$-8,67 \pm 0,26$	$-9,36 \pm 0,14$
vážený průměr	<b><math>-8,97 \pm 0,11</math></b>	<b><math>-9,12 \pm 0,17</math></b>	<b><math>-9,42 \pm 0,08</math></b>

Z Tab. 4 v příloze je vidět, že u detektoru B5 muselo dojít k změně výšky uložení. Nicméně tato změna neměla vliv na výslednou hodnotu podílu  $n_0$  a  $\int n(t) dt$ , a tedy i reaktivity. Z Tab. 5 v příloze lze vyčíst, že rozdílná hodnota reaktivity u detektoru F3 při 1. měření je způsobena hlavně rozdílnou hodnotou integrálu oproti 2. a 3. měření. Detektor H4 dává relativně konzistentní výsledky v rozsahu 1  $\beta_{\text{ef}}$ .

## Bórové detektory v poloze V

Po měření s detektory v poloze S byly detektory vysunuty do polohy V (dno detektorů odpovídalo vrchní části AZ). V příloze v Tab. 7, 8 a 9 jsou uvedeny hodnoty  $n_0$ ,  $\int n(t) dt$  a  $n_B$ . Napočítané hodnoty reaktivity jsou pak uvedené v Tab.2.3.



**Obrázek 2.6:** Odezva bórových detektorů v poloze V s generátorem - lineárně a semilogaritmičticky.

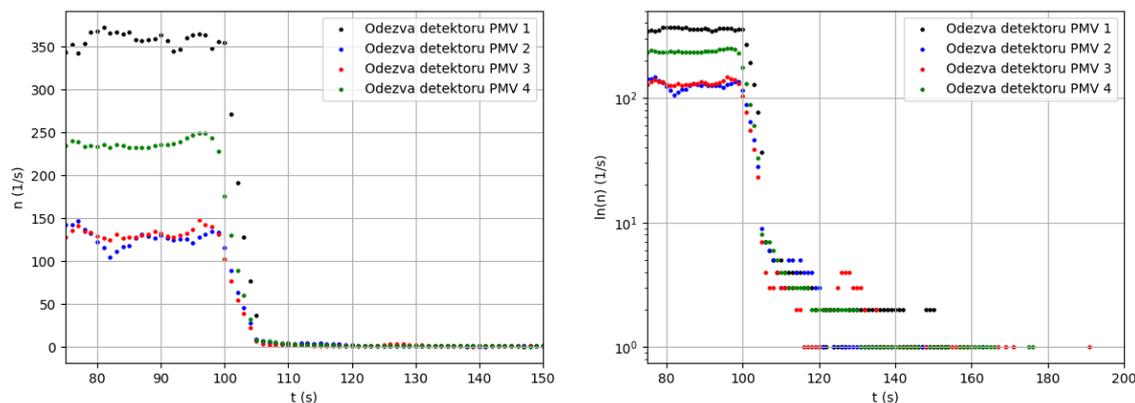
Z Obr. 2.6 je vidět, že vytažením detektorů do polohy V poklesla odezva detektorů až o dva řády na úroveň 50 imp./s maximálně. To způsobilo velký rozptyl měřených četností a integrálů. Tab. 7 v příloze jasně ukazuje, že rozdílná hodnota reaktivity při 3. měření u detektoru B5 je způsobena špatně určeným integrálem. Důvodem nesprávného určení  $\int n(t) dt$  mohl být nepřesně určený moment odstranění zdroje. Z Obr. 2.6 lze soudit, že měřená četnost poklesne na úroveň pozadí zhruba po 60 s od momentu odstranění zdroje.

**Tabulka 2.3:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátor - poloha V.

měření	$\rho(\beta_{ef})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	$-8,70 \pm 2,32$	$-10,54 \pm 1,63$	$-8,96 \pm 1,40$
2.	$-9,32 \pm 2,43$	$-11,49 \pm 1,88$	$-8,62 \pm 1,41$
3.	$-17,44 \pm 7,32$	$-10,60 \pm 1,56$	$-8,65 \pm 1,35$
vážený průměr	<b><math>-9,42 \pm 1,63</math></b>	<b><math>-10,81 \pm 0,97</math></b>	<b><math>-8,74 \pm 0,80</math></b>

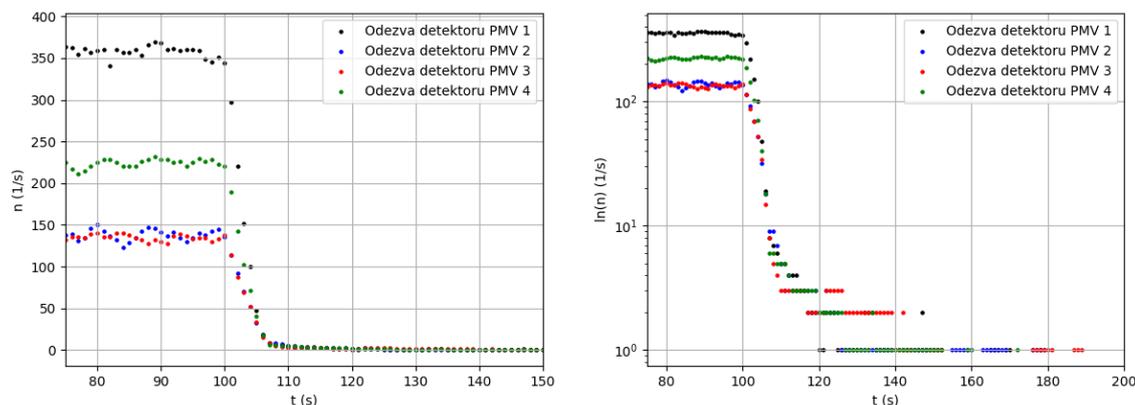
## Detektory PMV

Na Obr. 2.7 jsou vykresleny odezvy z detektorů PMV při použití neutronového generátoru a při bórových detektorech v poloze S. V příloze v Tab. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 a 17 jsou uvedeny hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ . První trojice měření byla provedena s bórovými detektory v poloze S, u druhé trojice měření byly bórové detektory v poloze V.



**Obrázek 2.7:** Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmičky.

Z Obr. 2.7 je vidět, že měřená četnost na detektorech PMV je oproti bórovým detektorům v pozici S o řád nižší. Na Obr. 2.8 jsou uvedeny odezvy z detektorů PMV při bórových detektorech v poloze V.



**Obrázek 2.8:** Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmičky.

Z naměřených odezev a hodnot reaktivity vyplývá, že vytažením bórových detektorů nedošlo ke znatelné změně v měřené četnosti na detektorech PMV. V obou případech došlo k poklesu odezvy detektorů PMV na úroveň pozadí zhruba za 80 s od momentu odstranění zdroje. V Tab. 2.4 a 2.5 jsou uvedeny hodnoty reaktivity.

**Tabulka 2.4:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV & neutronový generátor - poloha S.

měření	$\rho(\beta_{ef})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-10,22 \pm 0,48$	$-7,58 \pm 0,51$	$-6,28 \pm 0,39$	$-8,48 \pm 0,44$
2.	$-8,44 \pm 0,36$	$-6,84 \pm 0,44$	$-6,14 \pm 0,38$	$-7,38 \pm 0,36$
3.	$-9,22 \pm 0,41$	$-6,12 \pm 0,37$	$-7,23 \pm 0,48$	$-8,32 \pm 0,44$
vážený průměr:	<b><math>-9,13 \pm 0,24</math></b>	<b><math>-6,69 \pm 0,25</math></b>	<b><math>-6,45 \pm 0,24</math></b>	<b><math>-7,96 \pm 0,24</math></b>

**Tabulka 2.5:** Hodnoty reaktivity pro detektory PMV & neutronový generátor - poloha V.

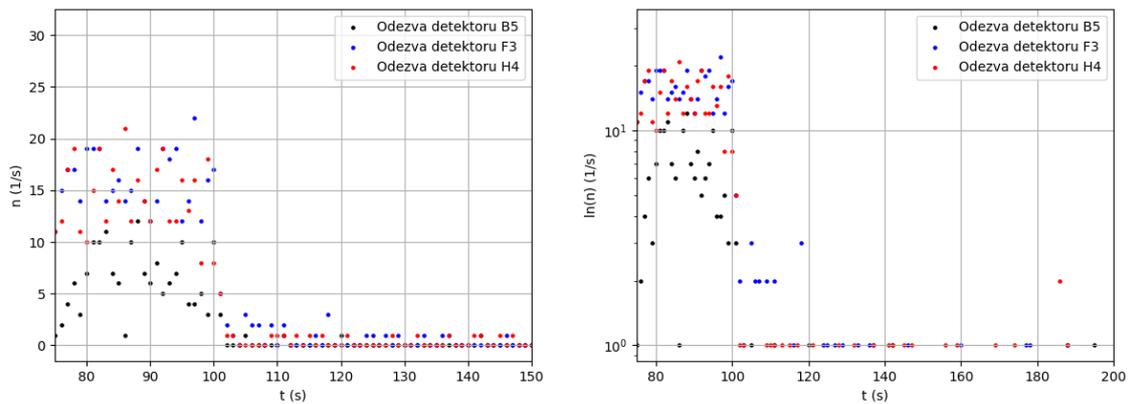
měření	$\rho(\beta_{ef})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-8,86 \pm 0,39$	$-7,06 \pm 0,46$	$-5,33 \pm 0,30$	$-7,78 \pm 0,39$
2.	$-8,12 \pm 0,34$	$-7,08 \pm 0,46$	$-6,61 \pm 0,41$	$-6,16 \pm 0,29$
3.	$-9,25 \pm 0,41$	$-6,47 \pm 0,39$	$-5,41 \pm 0,31$	$-8,12 \pm 0,44$
vážený průměr:	<b><math>-8,66 \pm 0,22</math></b>	<b><math>-6,83 \pm 0,25</math></b>	<b><math>-5,63 \pm 0,19</math></b>	<b><math>-7,04 \pm 0,21</math></b>

Z tabulek v příloze, např. 10, 14 nebo 15 je ještě lépe vidět, že rozdílné hodnoty reaktivity v rámci jednotlivých měření jsou způsobeny pouze rozdílnými integrály. Odezva  $n_0$  se ve všech případech liší v rámci maximálně 5 imp./s.

## 2.4.3 Výsledky metody Source-Jerk s AmBe zdrojem

### Bórové detektory v poloze V

Další měření metodou Source-Jerk proběhlo s využitím AmBe zdroje, kdy byly bórové detektory uloženy v poloze V. Odezva z bórových detektorů je vykreslena na Obr. 2.9. Hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$  jsou uvedeny v příloze v tabulkách 18, 19 a 20.



**Obrázek 2.9:** Odezva bórových detektorů v poloze V s AmBe zdrojem - lineárně a semi-logaritmicky.

Měřená četnost je v tomto případě v řádech nižších desítek a k poklesu na úroveň pozadí došlo již za 40 s po odstranění zdroje. Při použití AmBe zdroje je odezva zhruba poloviční. Určení integrálu bylo v tomto případě velmi nepřesné, což způsobilo velký rozptyl při určování reaktivity. V Tab. 2.6 nebyl pro detektor B5 napočítán vážený průměr reaktivity z důvodu očividně nesprávných výsledků.

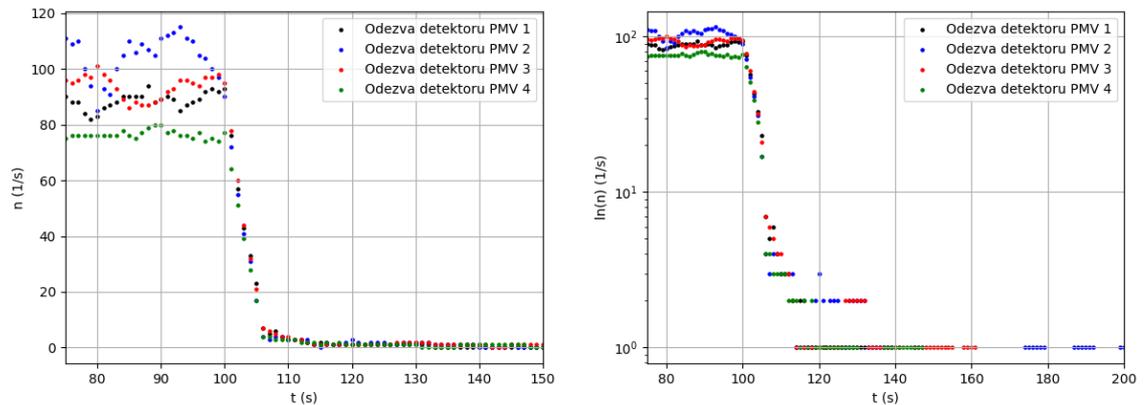
**Tabulka 2.6:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & AmBe zdroj.

měření	$\rho(\beta_{ef})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	$-11,41 \pm 5,40$	$-7,98 \pm 1,75$	$-11,41 \pm 4,29$
2.	$-25,49 \pm 33,28$	$-8,01 \pm 1,83$	$-7,59 \pm 2,04$
vážený průměr	—	<b><math>-7,99 \pm 1,27</math></b>	<b><math>-8,29 \pm 1,84</math></b>

Integrál byl v případě 2. měření detektoru B5 a v případě 1. a 2. měření detektoru F3 brán pouze po dobu 200 s.

## Detektory PMV

Hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a integrál  $\int n(t) dt$  získané z detektorů PMV při použití AmBe zdroje jsou obsaženy v příloze v tabulkách 21, 22, 23 a 24. Odezva z těchto detektorů je vynesena na Obr. 2.10, hodnoty reaktivity pak v Tab. 2.7.



**Obrázek 2.10:** Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmičky.

**Tabulka 2.7:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV & AmBe zdroj

měření	$\rho(\beta_{ef})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-6,49 \pm 0,48$	$-6,40 \pm 0,45$	$-5,87 \pm 0,41$	$-6,07 \pm 0,47$
2.	$-7,78 \pm 0,63$	$-7,14 \pm 0,53$	$-6,13 \pm 0,43$	$-7,54 \pm 0,66$
vážený průměr:	<b><math>-6,97 \pm 0,38</math></b>	<b><math>-6,71 \pm 0,34</math></b>	<b><math>-5,99 \pm 0,30</math></b>	<b><math>-6,57 \pm 0,38</math></b>

Výsledné hodnoty reaktivity jsou na rozdíl od předchozích měření konzistentní, kdy reaktivita naměřená jednotlivými detektory se pohybuje vždy v rozmezí od  $-6 \beta_{ef}$  do  $-8 \beta_{ef}$ . Je vidět, že prostorová závislost je oproti výsledkům s DD generátorem slabší, ale výsledné hodnoty reaktivity jsou ve všech případech nadhodnoceny.

## 2.4.4 Diskuze a srovnání

Cílem tohoto experimentu bylo využít vnější neutronový D-D generátor k měření reaktivity metodou Source-Jerk, optimalizovat polohu detektorů a porovnat výsledky s hodnotami reaktivity získanými použitím AmBe zdroje.

Jelikož byl reaktor hluboce podkritický, odezva detektorů v poloze V byla velmi nízká a způsobila silné fluktuace v měřené četnosti. To způsobilo větší statistickou chybu při určování hodnoty  $n_0$  i  $\int n(t) dt$  a nalezení momentu odstranění zdroje bylo velmi nepřesné. Pro dostatečnou odezvu při odstaveném reaktoru je proto vhodné vložit detektory do polohy S.

V Tab. 2.8 a 2.9 jsou shrnuty hodnoty reaktivity získané z bórových a PMV detektorů při použití neutronového generátoru a AmBe zdroje. Hodnota váženého průměru pro detektor B5 pro AmBe zdroj není z důvodu nesprávných hodnot uvedena.

**Tabulka 2.8:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z bórových detektorů.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$		
	generátor - poloha S	generátor - poloha V	AmBe zdroj - poloha V
det B5	$-8,97 \pm 0,11$	$-9,42 \pm 1,64$	—
det F3	$-9,12 \pm 0,17$	$-10,81 \pm 0,97$	$-7,99 \pm 1,27$
det H4	$-9,42 \pm 0,08$	$-8,74 \pm 0,80$	$-8,29 \pm 1,84$

**Tabulka 2.9:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z detektorů PMV.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$		
	generátor - poloha S	generátor - poloha V	AmBe zdroj - poloha V
det PMV1	$-9,13 \pm 0,24$	$-8,66 \pm 0,22$	$-6,97 \pm 0,38$
det PMV2	$-6,69 \pm 0,25$	$-6,83 \pm 0,25$	$-6,71 \pm 0,34$
det PMV3	$-6,45 \pm 0,24$	$-5,63 \pm 0,19$	$-5,99 \pm 0,30$
det PMV4	$-7,96 \pm 0,24$	$-7,04 \pm 0,21$	$-6,57 \pm 0,38$

Z předchozích tabulek je možné vyčíst, že vytažení bórových detektorů do polohy V nemá na hodnoty reaktivity získané z detektorů PMV skoro žádný vliv.

Dále je možné na hodnotách reaktivity získaných z detektorů PMV pozorovat prostorovou závislost pozice detektoru. Zatímco při použití AmBe zdroje jsou výsledky mezi detektory relativně konzistentní, při použití neutronového generátoru se výsledné hodnoty reaktivity pro jednotlivé detektory značně liší. To je vidět z Tab. 2.9, kdy se hodnoty reaktivity pro generátor liší zhruba o  $3 \beta_{\text{ef}}$  a pro AmBe se liší o méně než  $1 \beta_{\text{ef}}$ .

Závěrem tohoto měření je, že pro získání více konzistentních a dostatečně přesných výsledků je třeba vložit bórové detektory do polohy S. Hlavním zdrojem chyb je určení momentu odstranění zdroje, tj. určení integrálu  $\int n(t) dt$ . Statistickou chybu určení hodnot  $n_0$  a  $n_B$  lze prodloužením doby měření zmenšit.

## 2.5 Hlavní experimenty

Cílem těchto experimentálních měření, která se uskutečnila 1. a 20. 4. a 7. 6. 2022 na školním reaktoru VR-1, bylo využít neutronový D-D generátor P 385 k měření reaktivity integrální metodou SJ a získat co nejvíce konzistentních výsledků. Cílem také bylo srovnat naměřené hodnoty se standardně používanou metodou SJ, při které se jako zdroj neutronů využívá radionuklidový AmBe zdroj. Výsledné hodnoty jsou srovnány s očekávanou hodnotou vypočtenou numericky pomocí kódu Serpent 2.

### 2.5.1 Popis měření

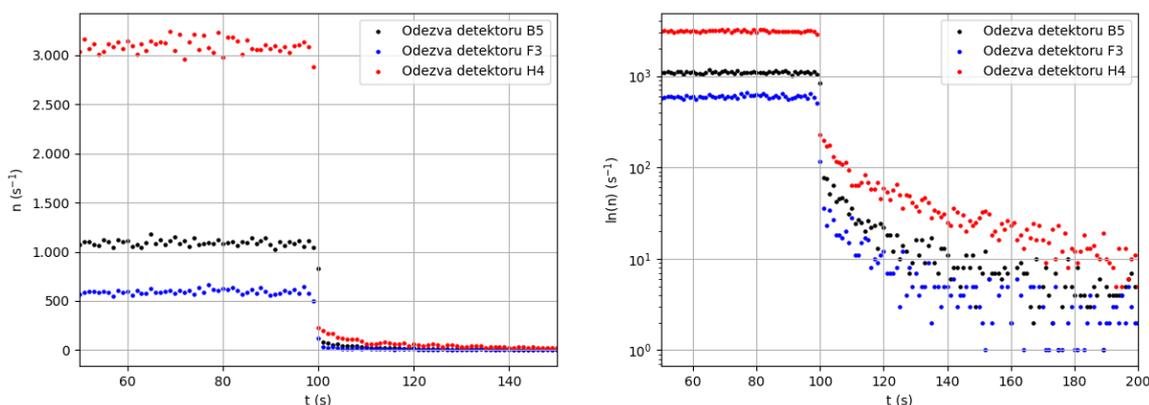
Experimenty byly provedeny na odstaveném reaktoru s neutronovým D-D generátorem P 385 zavedeným v horizontálním radiálním kanálu. Bórové detektory byly v poloze S a časový krok měření detektorů byl nastaven na 1 s. V první části měření byl jako zdroj neutronů použit neutronový generátor, v druhé části měření byl použit AmBe zdroj. Poté byl časový krok detektorů zkrácen na 100 ms. Jako zdroj neutronů byl opět použit neutronový D-D generátor a posléze AmBe zdroj.

Pozice a nastavení detektorů bylo použito stejné, jako v případě přípravného experimentu viz 2.2. Bórové detektory byly usazeny v poloze S. Metodika výpočtu byla také stejná, jako v případě přípravného experimentu (sekce 2.3). Ze získaných hodnot reaktivity se vypočítal vážený průměr vztahem 2.2.

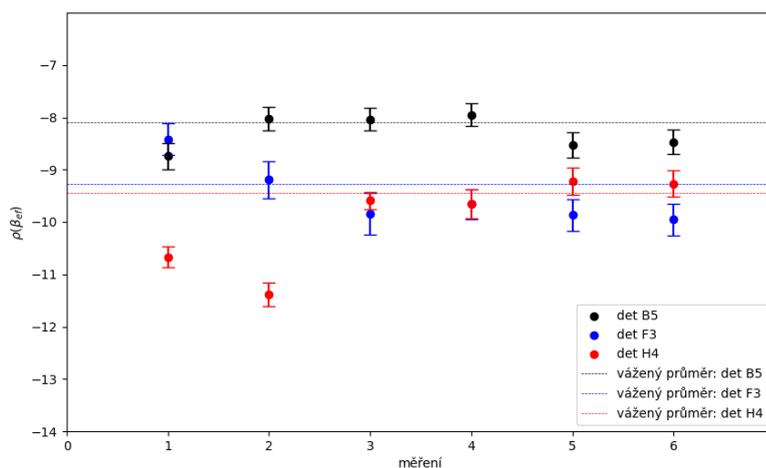
### 2.5.2 Výsledky s neutronovým generátorem a časovým krokem sběru dat 1 s

#### Bórové detektory v poloze S

Odezvy získané z bórových detektorů jsou vykresleny na Obr. 2.11. Hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$  z těchto detektorů jsou vedeny v příloze v Tab. 25, 26, 27. 1. až 3. a 4. až 6. měření bylo provedeno ve dvou různých dnech. V Tab. 2.10 a na Obr. 2.12 jsou uvedeny hodnoty reaktivity získané z bórových detektorů uložených v pozici S při použití neutronového generátoru a časového kroku sběru dat 1 s.



Obrázek 2.11: Odezva bórových detektorů s generátorem - lineárně a semilogaritmicky.



**Obrázek 2.12:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátor.

Z Obr. 2.11 je vidět, že odezva odpovídá hodnotám naměřených při přípravném experimentu. K poklesu na úroveň pozadí došlo zhruba po 150 s od momentu odstranění zdroje.

Z Tab. 2.10 lze vypočítat, že kromě statistické chyby se u některých měření objevuje chyba, která je nejspíše způsobená špatně určeným momentem odstranění zdroje. Více je tato problematika komentována v sekci 2.5.6. Do vážených průměrů reaktivity se započítaly i hodnoty reaktivity z přípravného týdne viz Tab. 2.2.

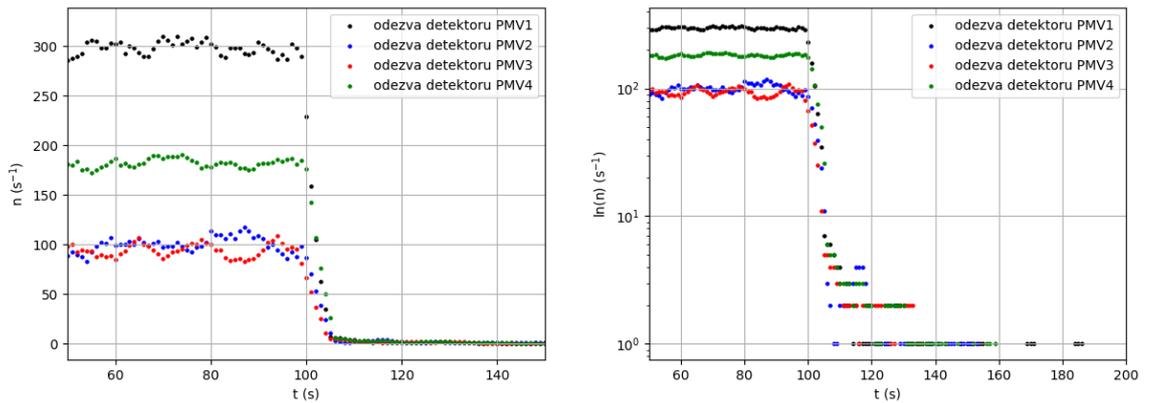
**Tabulka 2.10:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátor.

měření	$\rho(\beta_{ef})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	-8,74 ± 0,25	-8,42 ± 0,31	-10,67 ± 0,20
2.	-8,03 ± 0,22	-9,19 ± 0,36	-11,39 ± 0,23
3.	-8,04 ± 0,22	-9,85 ± 0,39	-9,59 ± 0,17
4.	-7,95 ± 0,21	-9,66 ± 0,29	-9,65 ± 0,27
5.	-8,53 ± 0,24	-9,86 ± 0,30	-9,22 ± 0,26
6.	-8,47 ± 0,23	-9,96 ± 0,31	-9,27 ± 0,25
vážený průměr	<b>-8,09 ± 0,06</b>	<b>-9,28 ± 0,10</b>	<b>-9,44 ± 0,07</b>

U detektoru H4 se první dvě měření do průměru nepočítala. Z tabulek v příloze 25, 26 a 27 je vidět, že hodnoty  $n_0$  a  $n_B$  se od ostatních měření v rámci jednotlivých dnů příliš neliší. Rozdíl ve stanovené reaktivitě je dán pouze odlišnou hodnotou integrálu, resp. poměrem integrálu a odezvy  $n_0$ . To lze pozorovat například u 1. a 2. měření detektoru H4 právě ve zmíněné tabulce 27 v příloze.

## Detektory PMV

Obdobně jsou na Obr. 2.13 vykresleny odezvy z detektorů PMV. V příloze jsou pak v Tab. 28, 29, 30 a 31 uvedeny naměřené odezvy a integrály. Hodnoty reaktivity jsou vyneseny v Tab. 2.11 a na Obr. 2.14 a 2.15.



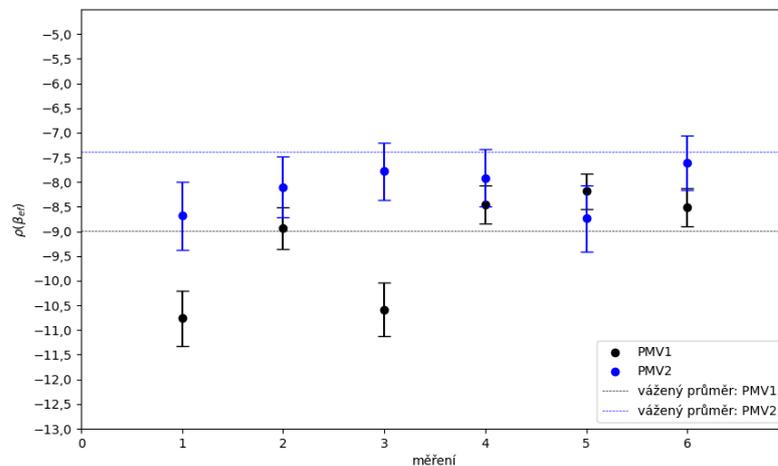
**Obrázek 2.13:** Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmicky.

Obr. 2.13 ukazuje, že odezva z štěpných detektorů PMV je o řád menší než z bórových detektorů. Na úroveň pozadí poklesne zhruba po 80 s od momentu odstranění zdroje.

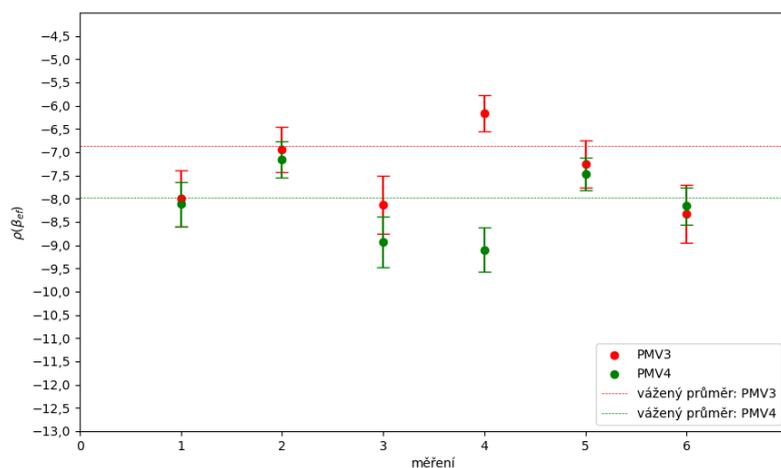
Do vážených průměrů uvedených v Tab. 2.11 jsou započítány také výsledky z přípravného experimentu viz Tab. 2.4.

**Tabulka 2.11:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV & neutronový generátor.

měření	$\rho(\beta_{ef})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-10,76 \pm 0,56$	$-8,68 \pm 0,68$	$-7,99 \pm 0,61$	$-8,11 \pm 0,48$
2.	$-8,94 \pm 0,43$	$-8,10 \pm 0,61$	$-6,93 \pm 0,49$	$-7,15 \pm 0,39$
3.	$-10,58 \pm 0,55$	$-7,78 \pm 0,58$	$-8,13 \pm 0,62$	$-8,93 \pm 0,55$
4.	$-8,46 \pm 0,38$	$-7,92 \pm 0,58$	$-6,16 \pm 0,40$	$-9,10 \pm 0,48$
5.	$-8,19 \pm 0,36$	$-8,73 \pm 0,67$	$-7,26 \pm 0,51$	$-7,47 \pm 0,35$
6.	$-8,52 \pm 0,38$	$-7,61 \pm 0,54$	$-8,33 \pm 0,62$	$-8,16 \pm 0,41$
<b>vážený průměr:</b>	<b><math>-8,99 \pm 0,14</math></b>	<b><math>-7,38 \pm 0,18</math></b>	<b><math>-6,87 \pm 0,16</math></b>	<b><math>-7,97 \pm 0,14</math></b>



**Obrázek 2.14:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV 1 a 2 & neutronový generátor.



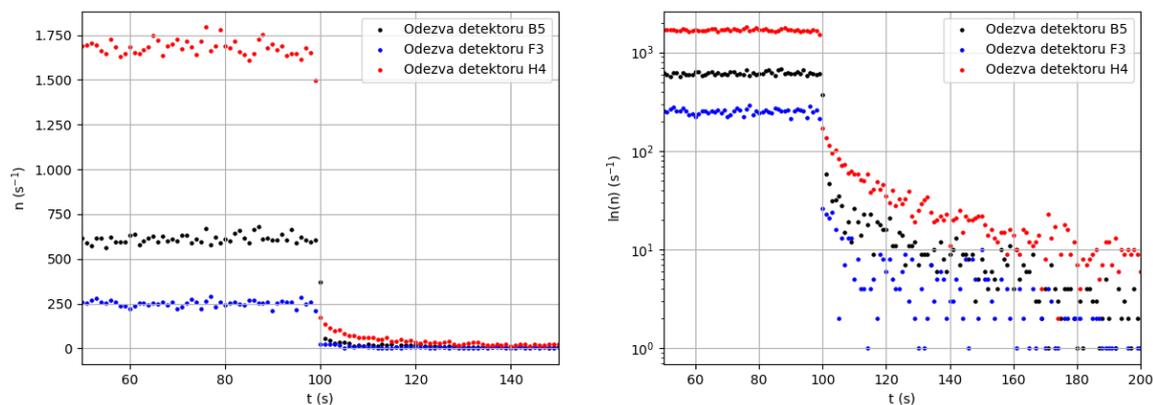
**Obrázek 2.15:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV 3 a 4 & neutronový generátor.

Z Tab. 28 je vidět, že naměřené odezvy  $n_0$  se v rámci jednotlivých dnů mezi sebou lišily maximálně o 1 % a hodnota  $n_B$  byla stejná. Hlavní příčinou je tedy rozdíl v určení integrálu, který se ovšem vždy stanovoval stejným způsobem. Například u 1. a 3. měření u detektoru PMV1 se hodnota integrálu liší skoro o 20 %.

## 2.5.3 Výsledky s AmBe zdrojem a časovým krokem sběru dat 1 s

### Bórové detektory

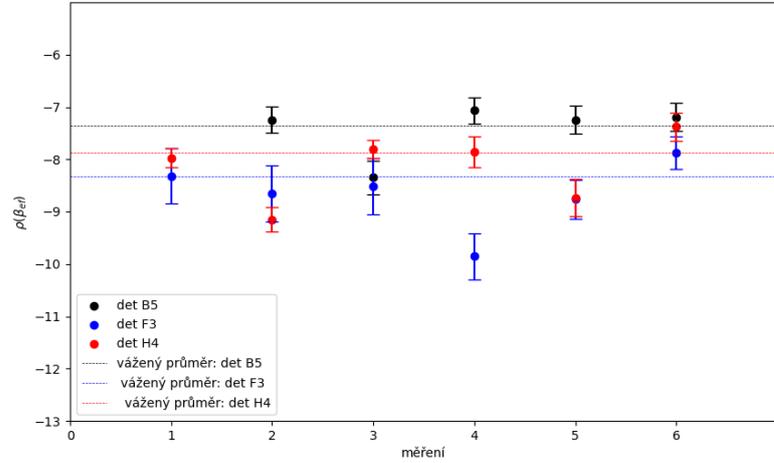
Po měření s neutronovým generátorem byl jako externí zdroj neutronů využit AmBe zdroj a časový krok sběru dat byl nastaven na 1 s. Odezva z bórových detektorů je vykreslena na Obr. 2.16. V příloze v tabulkách 32, 33 a 34 jsou uvedeny naměřené odezvy a integrály. V Tab. 2.12 a na Obr. 2.17 jsou pak vyneseny naměřené hodnoty reaktivity.



**Obrázek 2.16:** Odezva bórových detektorů s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky.

Z Obr. 2.16 lze pozorovat, že při použití AmBe zdroje místo neutronového generátoru dojde k poklesu odezvy zhruba na polovinu, což zhorší statistickou chybu

měřených četností. K poklesu na úroveň pozadí dojde zhruba 150 s od momentu odstranění zdroje.



**Obrázek 2.17:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & AmBe zdroj.

Z výsledků v 2.17 a naměřených hodnot v příloze lze soudit, že opravdu dochází k chybě při určování integrálu. Z tohoto důvodu jsou výsledné hodnoty reaktivity při některých měřeních zatíženy chybou až  $2 \beta_{\text{ef}}$  (3. měření detektoru B5 nebo 4. měření detektoru F3). Hodnoty  $n_0$  a  $n_B$  v Tab. 32, 33 a 34 se mezi sebou v rámci jednotlivých dní liší do 0,5 %. Na druhou stranu jsou výsledky mezi jednotlivými detektory konzistentní, kdy se hodnoty pohybují okolo hodnoty  $-7,5 \beta_{\text{ef}}$  s rozptylem zhruba  $1 \beta_{\text{ef}}$ . To může být způsobeno umístěním zdroje, neboť na rozdíl od neutronového generátoru je AmBe zdroj zhruba ve středu AZ, a ne v radiálním kanálu.

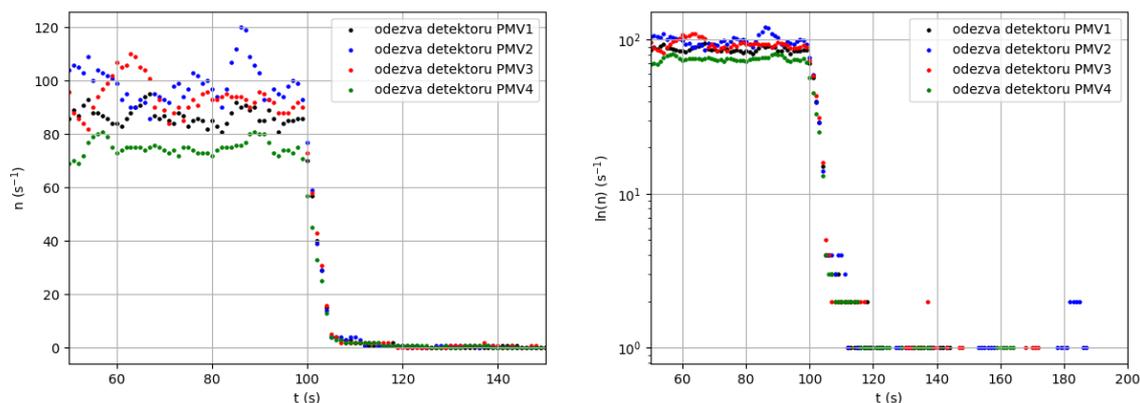
U 1. měření detektoru B5 není uvedena hodnota reaktivity z důvodu absence dat. Do vážených průměrů se z důvodu špatných výsledků nezapočítalo 2. měření u detektoru H4 a 4. měření u detektoru F3.

**Tabulka 2.12:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & AmBe zdroj.

měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	—	-8,32 ± 0,53	-7,98 ± 0,18
2.	-7,24 ± 0,26	-8,65 ± 0,54	-9,15 ± 0,23
3.	-8,34 ± 0,32	-8,52 ± 0,54	-7,80 ± 0,18
4.	-7,07 ± 0,25	-9,86 ± 0,44	-7,85 ± 0,29
5.	-7,25 ± 0,27	-8,77 ± 0,37	-8,73 ± 0,36
6.	-7,19 ± 0,27	-7,87 ± 0,31	-7,38 ± 0,26
vážený průměr	<b>-7,35 ± 0,12</b>	<b>-8,33 ± 0,17</b>	<b>-7,87 ± 0,09</b>

## Detektory PMV

Odezvy z detektorů PMV jsou vykresleny na Obr. 2.18. V příloze jsou pak v Tab. 35, 36, 37 a 38 uvedeny hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ . V Tab. 2.13 a na Obr. 2.19 a 2.20 jsou uvedeny naměřené hodnoty reaktivity.

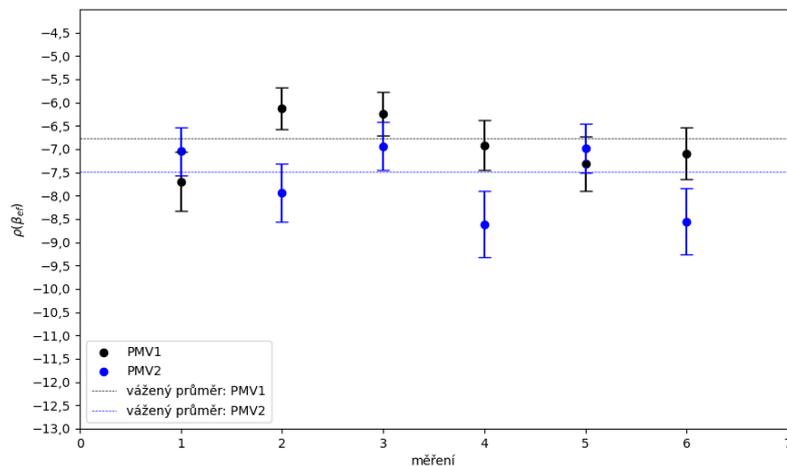


Obrázek 2.18: Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem.

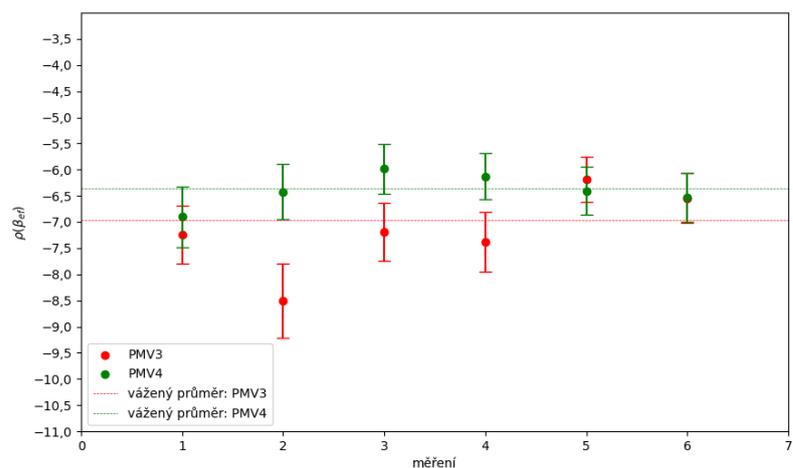
V čase 80 až 100 s je u detektoru PMV2 zaznamenán znatelný výkyv odezvy až o zhruba 20% průměrné měřené četnosti četnosti, což mohlo být způsobeno rušivým signálem z okolí. Pro stanovení hodnoty  $n_0$  nebyl tento časový interval použit. K poklesu odezvy na úroveň pozadí dojde zhruba za 80 s od momentu odstranění zdroje. Z 2.18 je vidět, že při použití AmBe zdroje místo generátoru se měřená četnost zmenší skoro na polovinu.

Tabulka 2.13: Hodnoty reaktivity - detektory PMV & AmBe zdroj.

měření	$\rho(\beta_{ef})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-7,69 \pm 0,63$	$-7,05 \pm 0,52$	$-7,25 \pm 0,56$	$-6,90 \pm 0,58$
2.	$-6,12 \pm 0,45$	$-7,93 \pm 0,62$	$-8,50 \pm 0,71$	$-6,42 \pm 0,52$
3.	$-6,24 \pm 0,46$	$-6,94 \pm 0,51$	$-7,19 \pm 0,55$	$-5,99 \pm 0,47$
4.	$-6,91 \pm 0,54$	$-8,61 \pm 0,71$	$-7,38 \pm 0,57$	$-6,13 \pm 0,45$
5.	$-7,31 \pm 0,58$	$-6,98 \pm 0,52$	$-6,19 \pm 0,44$	$-6,40 \pm 0,45$
6.	$-7,09 \pm 0,55$	$-8,55 \pm 0,70$	$-6,54 \pm 0,48$	$-6,53 \pm 0,47$
vážený průměr:	<b><math>-6,76 \pm 0,21</math></b>	<b><math>-7,48 \pm 0,24</math></b>	<b><math>-6,97 \pm 0,22</math></b>	<b><math>-6,36 \pm 0,20</math></b>



Obrázek 2.19: Hodnoty reaktivity - detektory PMV 1 a 2 - AmBe zdroj.



**Obrázek 2.20:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV 3 a 4 - AmBe zdroj.

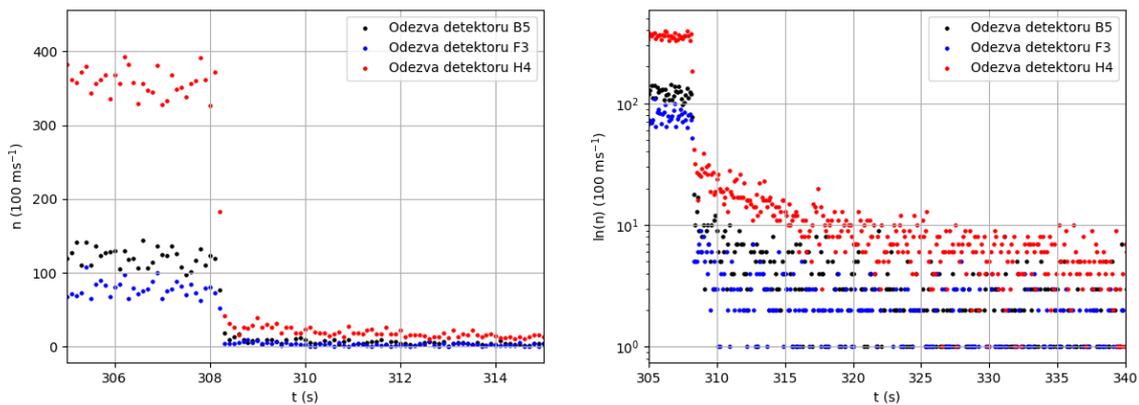
Jedním z nejdůležitějších pozorování je skutečnost, že při použití AmBe zdroje jsou naměřené hodnoty reaktivity mezi jednotlivými detektory velice konzistentní. V případě všech detektorů se hodnoty reaktivity pohybují zhruba od  $-7,5$  do  $-6,5 \beta_{\text{ef}}$ . Neustále však dochází k rozptylu hodnot v rámci jednotlivých detektorů (např. 2. měření detektoru PMV3) vlivem chybného určení integrálu. Získaná podkritičnost je oproti numerickému výpočtu, kdy  $\rho = -10,84 \beta_{\text{ef}}$  velice podhodnocená.

## 2.5.4 Výsledky s neutronovým generátorem a časovým krokem sběru dat 100 ms

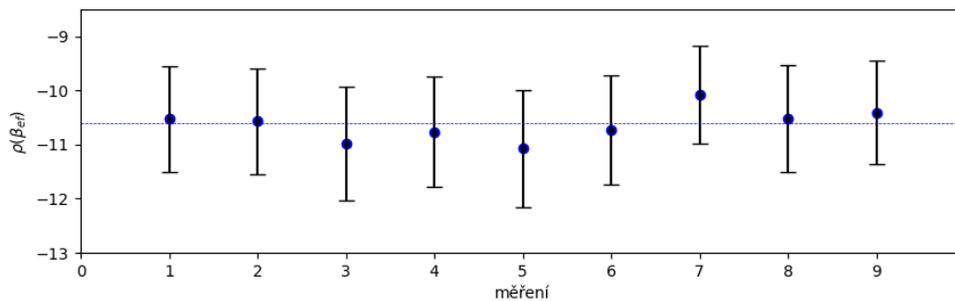
Z důvodu nejistoty stanovení momentu odstranění zdroje se předchozí měření zopakovalo pro časový krok sběru dat 100 ms s cílem zpřesnit hodnotu integrálu.

### Bórové detektory

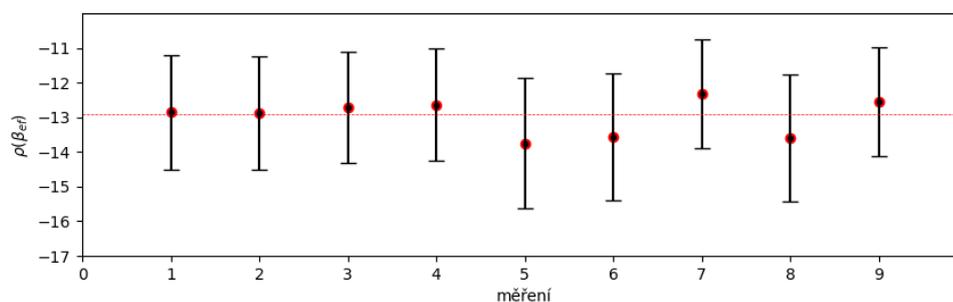
Na Obr. 2.21 jsou uvedeny odezvy bórových detektorů pro časový krok 100 ms a neutronový generátor. V příloze v Tab. 39, 40 a 41 jsou pak uvedeny hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ . Získané hodnoty reaktivity jsou uvedeny v Tab. 2.14 a na Obr. 2.22, 2.23 a 2.24. Zkrácením časového intervalu bylo možné daleko přesněji určit moment odstranění zdroje. Vlivem tohoto zkrácení byla měřená četnost v imp./100 ms zhruba 10x menší. Na úroveň pozadí poklesla odezva stejně jako v případě kroku 1 s zhruba po 150 s.



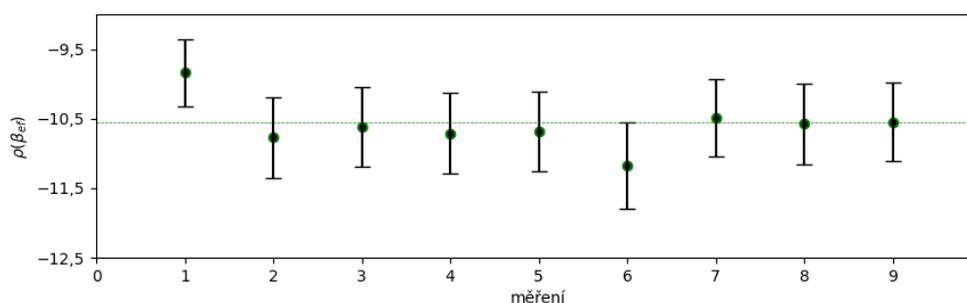
**Obrázek 2.21:** Odezva bórových detektorů s generátorem - logaritmičsky a semilogaritmičsky.



**Obrázek 2.22:** Hodnoty reaktivity - detektor B5 & neutronový generátor.



**Obrázek 2.23:** Hodnoty reaktivity - detektor F3 & neutronový generátor.



**Obrázek 2.24:** Hodnoty reaktivity - detektor H4 & neutronový generátor.

**Tabulka 2.14:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & neutronový generátorem.

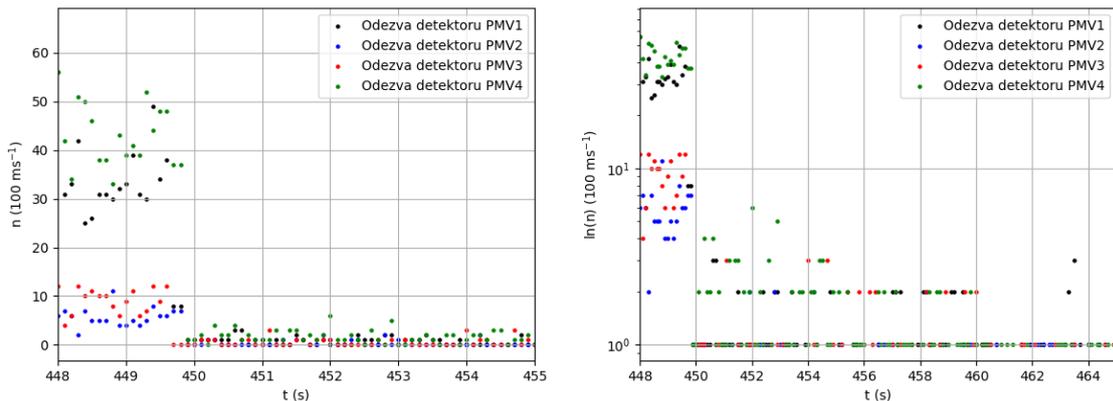
měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$		
	detektor B5	detektor F3	detektor H4
1.	$-10,52 \pm 0,98$	$-12,86 \pm 1,64$	$-9,84 \pm 0,49$
2.	$-10,57 \pm 0,97$	$-12,89 \pm 1,64$	$-10,77 \pm 0,58$
3.	$-10,97 \pm 1,05$	$-12,70 \pm 1,60$	$-10,62 \pm 0,57$
4.	$-10,76 \pm 1,02$	$-12,63 \pm 1,61$	$-10,71 \pm 0,58$
5.	$-11,07 \pm 1,08$	$-13,75 \pm 1,89$	$-10,68 \pm 0,57$
6.	$-10,72 \pm 1,01$	$-13,57 \pm 1,82$	$-11,17 \pm 0,62$
7.	$-10,08 \pm 0,91$	$-12,33 \pm 1,56$	$-10,49 \pm 0,56$
8.	$-10,51 \pm 0,99$	$-13,60 \pm 1,84$	$-10,58 \pm 0,58$
9.	$-10,41 \pm 0,96$	$-12,54 \pm 1,57$	$-10,55 \pm 0,56$
vážený průměr	<b><math>-10,60 \pm 0,33</math></b>	<b><math>-12,92 \pm 0,56</math></b>	<b><math>-10,56 \pm 0,19</math></b>

Z Obr. 2.22, 2.23 a 2.24 je vidět, že zkrácením časového intervalu měření se podařilo odstranit chyba způsobená nepřesně stanoveným momentem odstranění zdroje. Výsledné hodnoty reaktivity, resp. integrálu, jsou ve všech případech velice konzistentní a u detektoru B5 a H4 se výsledky většinou odchylojí maximálně o  $0,5 \beta_{\text{ef}}$ . Statistická chyba reaktivity je dána statistickou chybou určení integrálu, neboť pro časový krok sběru dat byla hodnota  $\int n(t) dt$  o řád vyšší. Proto se je v případě časovém kroku sběru dat 100 ms statistická chyba měření relativně vyšší.

## Detektory PMV

Na Obr. 2.25 jsou vykresleny odezvy získané z detektorů PMV pro časový krok 100 ms. Z důvodu malého časového intervalu sběru dat a relativně horší citlivosti detektorů je měřená četnost velmi nízká. Na úroveň pozadí poklesla odezva detektoru stejně jako v případě delšího kroku sběru dat zhruba za 80 s po odstranění zdroje. V příloze jsou pak v Tab. 42, 43, 44 a 45 uvedeny hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ . V Tab. 2.15 a na Obr. 2.26, 2.27, 2.27 a 2.27 jsou uvedeny naměřené hodnoty reaktivity a jejich vážené průměry.

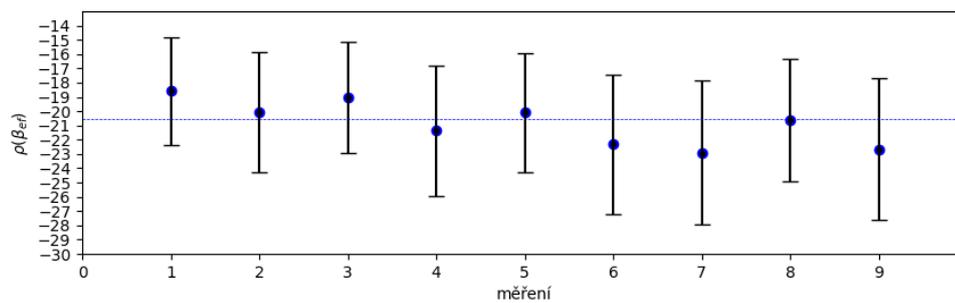
Chybné výsledky u detektoru PMV1 jsou způsobeny velkou nejistotou při určení integrálu způsobenou menší měřenou četností a problematickým určením momentu odstranění zdroje. Zároveň je v Tab. 2.15 ilustrována problematika prostorové závislosti metody Source-Jerk, kdy u detektorů PMV 1 a 4 byly naměřeny až dvojnásobné podkritičnosti než u detektorů PMV 2 a 3. To mohlo být způsobeno také tím, že detektory PMV1 a PMV4 detekují téměř výhradně neutrony emitované neutronovým generátorem. Detektory PMV2 a PMV3 sice detekují neutrony, které prošly palivem, ale odezva je ve srovnání s PMV1 a PMV4 zhruba 4x menší.



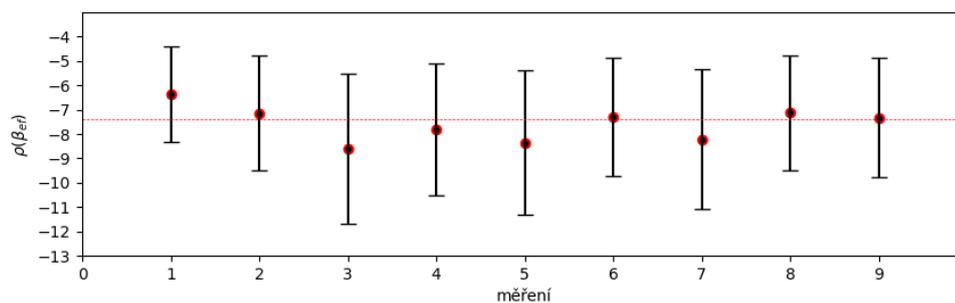
**Obrázek 2.25:** Odezva detektorů PMV s generátorem - lineárně a semilogaritmičticky.

**Tabulka 2.15:** Hodnoty reaktivity - detektory PMV & neutronový generátor.

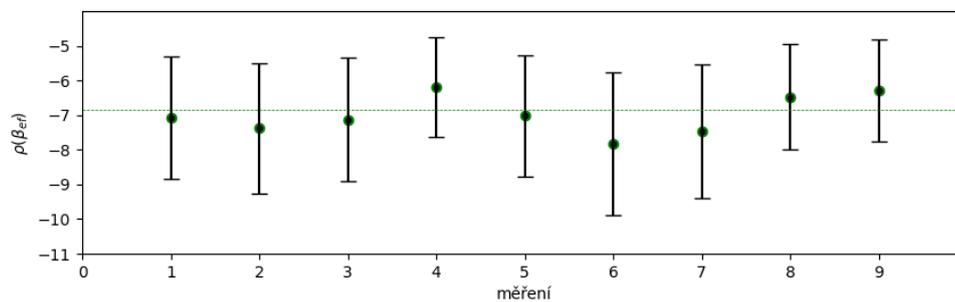
měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-18,60 \pm 3,75$	$-6,36 \pm 1,97$	$-7,07 \pm 1,76$	$-12,26 \pm 1,82$
2.	$-20,10 \pm 4,20$	$-7,15 \pm 2,36$	$-7,37 \pm 1,88$	$-16,03 \pm 2,69$
3.	$-19,04 \pm 3,87$	$-8,62 \pm 3,09$	$-7,13 \pm 1,79$	$-13,49 \pm 2,03$
4.	$-21,35 \pm 4,57$	$-7,81 \pm 2,70$	$-6,19 \pm 1,45$	$-10,70 \pm 1,40$
5.	$-20,09 \pm 4,19$	$-8,36 \pm 2,97$	$-7,02 \pm 1,75$	$-11,32 \pm 1,55$
6.	$-22,32 \pm 4,88$	$-7,30 \pm 2,42$	$-7,82 \pm 2,07$	$-11,08 \pm 1,50$
7.	$-22,89 \pm 5,05$	$-8,21 \pm 2,90$	$-7,47 \pm 1,92$	$-10,50 \pm 1,31$
8.	$-20,61 \pm 4,31$	$-7,12 \pm 2,35$	$-6,47 \pm 1,54$	$-10,67 \pm 1,33$
9.	$-22,68 \pm 4,97$	$-7,34 \pm 7,27$	$-6,29 \pm 1,48$	$-13,16 \pm 1,82$
<b>vážený průměr:</b>	<b><math>-20,55 \pm 1,45</math></b>	<b><math>-7,40 \pm 0,84</math></b>	<b><math>-6,84 \pm 0,60</math></b>	<b><math>-11,53 \pm 0,53</math></b>



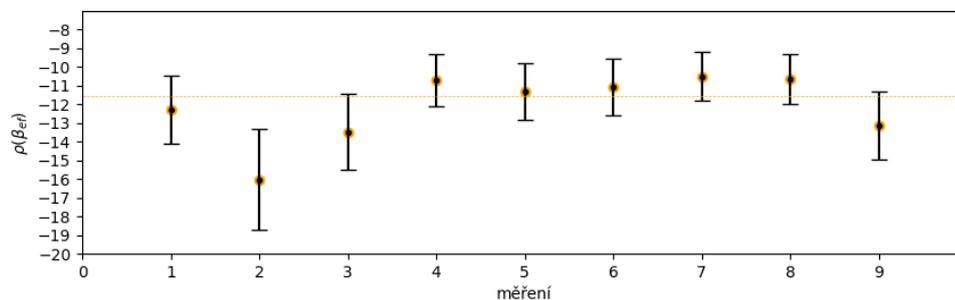
Obrázek 2.26: Hodnoty reaktivity - detektor PMV1 & neutronový generátor.



Obrázek 2.27: Hodnoty reaktivity - detektor PMV2 & neutronový generátor.



Obrázek 2.28: Hodnoty reaktivity - detektor PMV3 & neutronový generátor.



Obrázek 2.29: Hodnoty reaktivity - detektor PMV4 & neutronový generátor.

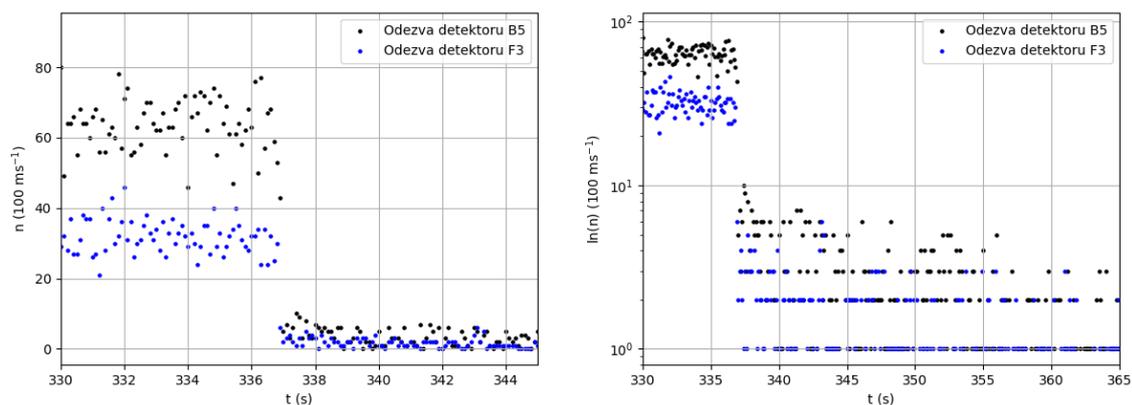
## 2.5.5 Výsledky s AmBe zdrojem a časovým krokem sběru dat 100 ms

Ve druhé části měření s krokem 100 ms byl jako externí zdroj neutronů použit AmBe zdroj.

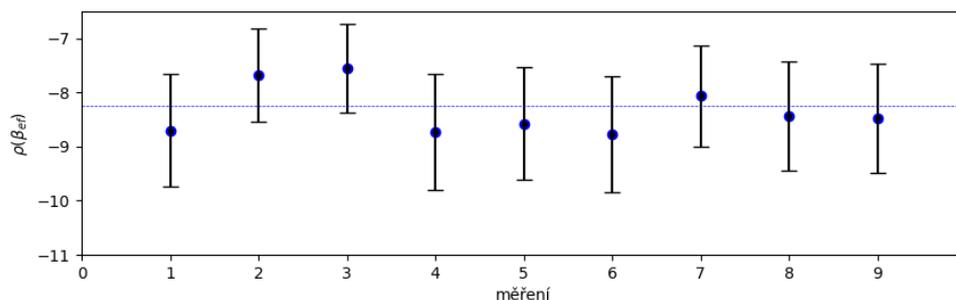
### Bórové detektory

Na Obr. 2.30 jsou vyneseny odezvy bórových detektorů, hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$  jsou pak uvedeny v příloze v Tab. 46 a 47. V Tab. 2.16 a na Obr. 2.31 a 2.32 jsou vyneseny získané hodnoty reaktivity. Odezva z detektoru H4 není uvedena z důvodu absence dat.

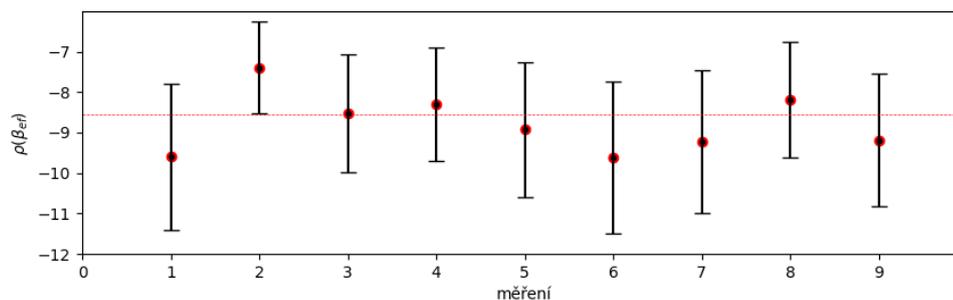
Měření četnosti odpovídají desetíně četností měřených s časovým krokem sběru dat 1 s.



**Obrázek 2.30:** Odezva bórových detektorů s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky.



**Obrázek 2.31:** Hodnoty reaktivity - detektor B5 & AmBe zdroj



**Obrázek 2.32:** Hodnoty reaktivity - detektor F3 & AmBe zdroj.

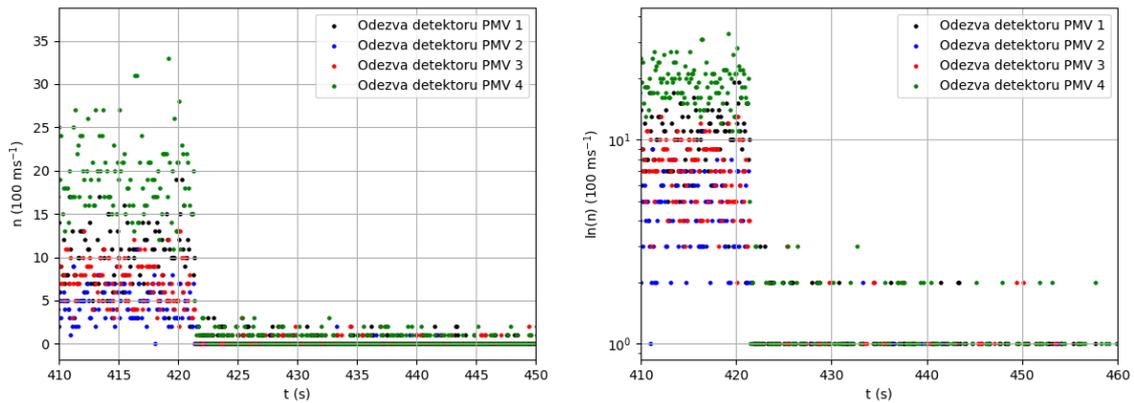
**Tabulka 2.16:** Hodnoty reaktivity - bórové detektory & AmBe zdroj.

měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$	
	detektor B5	detektor F3
1.	-8,71 ± 1,04	-9,60 ± 1,82
2.	-7,67 ± 0,87	-7,39 ± 1,14
3.	-7,55 ± 0,82	-8,52 ± 1,47
4.	-8,72 ± 1,04	-8,30 ± 1,41
5.	-8,57 ± 1,04	-8,92 ± 1,66
6.	-8,77 ± 1,08	-9,61 ± 1,89
7.	-8,06 ± 0,93	-9,23 ± 1,76
8.	-8,44 ± 1,01	-8,19 ± 1,44
9.	-8,47 ± 1,01	-9,19 ± 1,65
vážený průměr	<b>-8,25 ± 0,32</b>	<b>-8,55 ± 0,51</b>

Hodnoty reaktivity v Tab. 2.16 jsou ve srovnání s krokem 1 s viz Tab. 2.12 konzistentní jak mezi jednotlivými měřeními, tak i mezi jednotlivými detektory. Z Tab. 46 a 47 v příloze je vidět, že kromě hodnot  $n_0$  a  $n_B$  jsou ve shodě i hodnoty  $\int n(t) dt$ .

## Detektory PMV

Na Obr. 2.33 jsou uvedeny odezvy z detektorů PMV při použití AmBe zdroje. V příloze jsou pak v Tab. 48, 49, 50 a 51 hodnoty  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ . V Tab. 2.17 jsou uvedeny naměřené hodnoty reaktivity a jejich vážené průměry. Nutno podotknout, že měřená četnost byla v porovnání s bórovými detektory velice nízká, a to v řádech nižších desítek imp./100 ms.



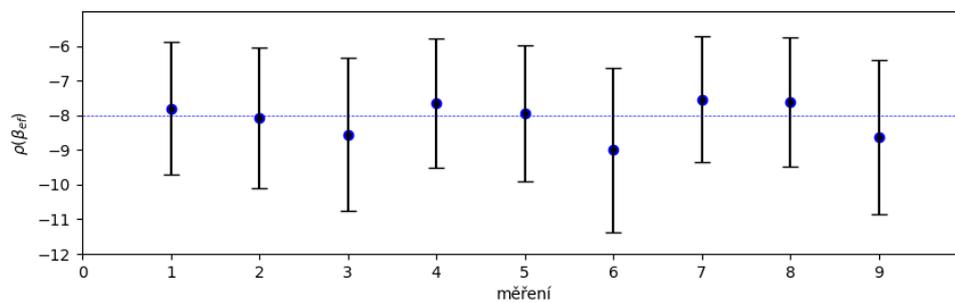
Obrázek 2.33: Odezva detektorů PMV s AmBe zdrojem - lineárně a semilogaritmicky.

Tabulka 2.17: Hodnoty reaktivity - detektory PMV & AmBe zdroj.

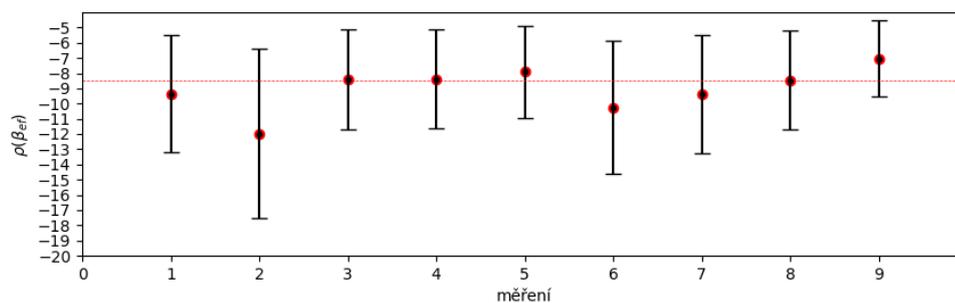
měření	$\rho(\beta_{\text{ef}})$			
	detektor PMV 1	detektor PMV 2	detektor PMV 3	detektor PMV 4
1.	$-7,80 \pm 1,91$	$-9,35 \pm 3,82$	$-8,36 \pm 2,51$	$-7,52 \pm 1,32$
2.	$-8,08 \pm 2,03$	$-11,99 \pm 5,56$	$-8,07 \pm 2,39$	$-6,14 \pm 1,00$
3.	$-8,55 \pm 2,21$	$-8,40 \pm 3,27$	$-7,60 \pm 2,19$	$-6,19 \pm 1,01$
4.	$-7,64 \pm 1,86$	$-8,38 \pm 3,24$	$-7,52 \pm 2,14$	$-6,38 \pm 1,11$
5.	$-7,93 \pm 1,96$	$-7,92 \pm 3,01$	$-7,53 \pm 2,17$	$-6,62 \pm 1,16$
6.	$-9,00 \pm 2,37$	$-10,25 \pm 4,37$	$-8,26 \pm 2,48$	$-6,73 \pm 1,19$
7.	$-7,54 \pm 1,82$	$-9,40 \pm 3,87$	$-7,52 \pm 2,18$	$-7,30 \pm 1,34$
8.	$-7,61 \pm 1,85$	$-8,46 \pm 3,27$	$-6,90 \pm 1,88$	$-6,17 \pm 1,04$
9.	$-8,63 \pm 2,23$	$-7,04 \pm 2,51$	$-8,06 \pm 2,38$	$-6,84 \pm 1,21$
vážený průměr:	<b><math>-8,02 \pm 0,71</math></b>	<b><math>-8,50 \pm 1,14</math></b>	<b><math>-7,68 \pm 0,74</math></b>	<b><math>-6,62 \pm 0,41</math></b>

Z Tab. 2.17 je jasně vidět, že hodnoty reaktivity mezi jednotlivými detektory jsou ve srovnání s generátorem daleko konzistentnější. Z numerického výpočtu pomocí kódu Serpent 2 však vyplývá, že podkritičnost reaktoru naměřená při použití AmBe zdroje je silně podhodnocená. Tato problematika bude dále rozebrána v diskusi.

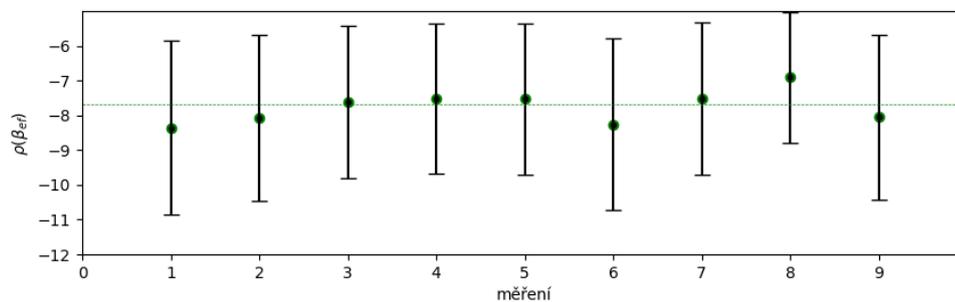
Veškeré odchylky od průměrných hodnot reaktivity pro jednotlivé detektory jsou po srovnání s naměřenými hodnotami v Tab. 48, 49, 50 a 51 ovlivněny pouze rozdílnou hodnotou integrálu. Opět se nejspíše jednalo o špatně určený čas odstranění zdroje, nikoliv však vlivem moc dlouhé doby sběru dat, ale příliš nízké měřené četnosti pro dostatečně přesné rozeznání poklesu odezvy.



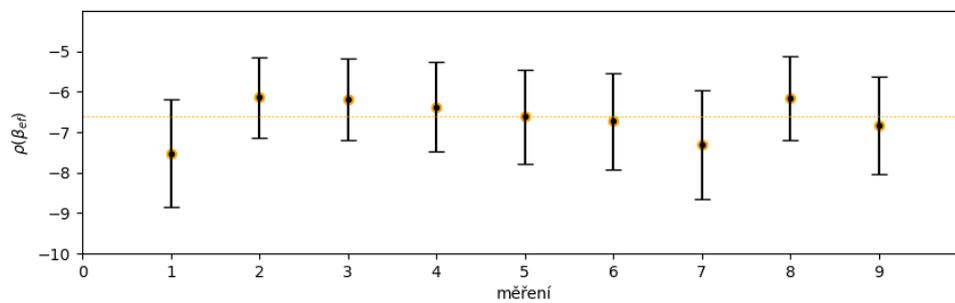
Obrázek 2.34: Hodnoty reaktivity - detektor PMV1 & AmBe zdroj.



Obrázek 2.35: Hodnoty reaktivity - detektor PMV2 & AmBe zdroj.



Obrázek 2.36: Hodnoty reaktivity - detektor PMV3 & AmBe zdroj.



Obrázek 2.37: Hodnoty reaktivity - detektor PMV4 & AmBe zdroj.

## 2.5.6 Diskuze a závěr

Cílem hlavních experimentů bylo získat hodnoty reaktivity pro srovnání metody SJ v případě použití neutronového generátoru a AmBe zdroje pro různé pozice detektorů. Jak naznačil předchozí experiment, tak bórové detektory uložené v poloze V neposkytují dostatečnou statistiku, a proto byly uloženy v poloze S.

Hodnoty  $\rho(\beta_{\text{ef}})$  naměřené během přípravného a hlavního experimentu byly použity k vytvoření vážených průměrů, které jsou uvedeny v Tab. 2.18, 2.19, 2.20 a 2.21 společně s hodnotou reaktivity  $\rho(\beta_{\text{ef}})$  získanou pomocí výpočetního kódu Serpent 2.

**Tabulka 2.18:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z bórových detektorů.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$ - časový krok 1 s	
	neutronový generátor	AmBe zdroj
det B5	$-8,09 \pm 0,06$	$-7,35 \pm 0,12$
det F3	$-9,28 \pm 0,10$	$-8,33 \pm 0,17$
det H4	$-9,44 \pm 0,07$	$-7,87 \pm 0,09$
num. výpočet:	<b><math>-10,84 \pm 0,01</math></b>	

**Tabulka 2.19:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z bórových detektorů.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$ - časový krok 100 ms	
	neutronový generátor	AmBe zdroj
det B5	$-10,60 \pm 0,33$	$-8,25 \pm 0,32$
det F3	$-12,92 \pm 0,56$	$-8,55 \pm 0,51$
det H4	$-10,56 \pm 0,19$	—
num. výpočet:	<b><math>-10,84 \pm 0,01</math></b>	

**Tabulka 2.20:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z detektorů PMV.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$ - časový krok 1 s	
	neutronový generátor	AmBe zdroj
det PMV1	$-8,99 \pm 0,14$	$-6,76 \pm 0,21$
det PMV2	$-7,38 \pm 0,18$	$-7,48 \pm 0,24$
det PMV3	$-6,87 \pm 0,16$	$-6,97 \pm 0,22$
det PMV4	$-7,97 \pm 0,14$	$-6,36 \pm 0,20$
num. výpočet:	<b><math>-10,84 \pm 0,01</math></b>	

**Tabulka 2.21:** Srovnání hodnot vážených průměrů reaktivity získaných z detektorů PMV.

	$\rho(\beta_{\text{ef}})$ - časový krok 100 ms	
	neutronový generátor	AmBe zdroj
det PMV1	$-20,55 \pm 1,45$	$-8,02 \pm 0,71$
det PMV2	$-7,40 \pm 0,84$	$-8,50 \pm 1,14$
det PMV3	$-6,84 \pm 0,60$	$-7,68 \pm 0,74$
det PMV4	$-11,53 \pm 0,53$	$-6,62 \pm 0,41$
num. výpočet:	<b><math>-10,84 \pm 0,01</math></b>	

Z tohoto experimentu vyplynulo několik zjištění.

Při použití AmBe zdroje je odezva detektorů až o několik řádů menší než při použití neutronového generátoru, což se následně projeví na statistické chybě při určování hodnot  $n_0$ ,  $n_B$  a  $\int n(t) dt$ .

Pro časový krok 1 s se při měření projevila chyba vzniklá nejistotou stanovení hodnoty integrálu způsobenou nedostatečně přesným určením momentu odstranění zdroje. Pokud by totiž došlo k odstranění zdroje na konci časového intervalu 1 s, tak bude naměřena podkritičnost systému o několik  $\beta_{\text{ef}}$  hlubší, než když dojde k odstranění na začátku intervalu. Neutrony ze zdroje totiž ovlivní hodnotu integrálu, ale z hlediska časového kroku se jedná o ten samý moment. Přestože by měření 1 s měla dávat podobné hodnoty s relativně malými chybami, tak se tyto výsledky od sebe při jednotlivých měřeních liší až o několik  $\beta_{\text{ef}}$ . Odstranění této chyby je možné zkrácením časového kroku sběru dat, což ale vede k menší odezvě detektorů a větší statistické chybě měření.

Pro časový krok 100 ms a neutronový generátor bylo možné moment odstranění zdroje určit velice přesně. Doba potřebná pro vypnutí generátoru je v řádu mikrosekund, což se blíží předpokladu okamžitého odstranění zdroje. Tato skutečnost vedla k tomu, že bórové detektory naměřily pro neutronový generátor v rámci jednotlivých detektorů velice konzistentní hodnoty, které se blížili numerickému výpočtu viz Obr. 2.22, 2.23 a 2.24.

Při použití AmBe zdroje došlo ke snížení odezvy detektorů na zhruba polovinu a ve většině případů byla výsledná statistická chyba větší, než při využití neutronového generátoru. To je způsobeno tím, že je radionuklidový zdroj vzdálen dále od detektorů. Na druhou stranu je vidět, že při použití AmBe zdroje jsou naměřené hodnoty reaktivity pro všechny detektory podobné, a to okolo hodnoty  $-7$  až  $-8 \beta_{\text{ef}}$ . Tato konzistence může být způsobena tím, že je zdroj umístěn pod AZ a pro všechny detektory je poloha tohoto zdroje zhruba stejná. Navíc většina emitovaných neutronů prochází skrze palivo a není přímo zaznamenávána detektorem. Nízká podkritičnost naměřená všemi detektory může být způsobena nadhodnocením integrálu  $\int n(t) dt$ . AmBe zdroj je totiž uložen ve stínícím kontejneru pod dnem tlakové nádoby. Při zavedení je zdroj přiveden trubkou pod AZ reaktoru. V moment odstranění letí radionuklidový zdroj zpět do stínícího kontejneru, avšak po krátký časový úsek neustále emituje neutrony, které jsou detekovány systémem a přispívají do hodnoty integrálu. To způsobuje nadhodnocení  $\int n(t) dt$  a naměření menší podkritičnosti. Doba potřebná pro odstranění se pohybuje okolo 0,6 až 0,7 s, což je několikrát delší než časový krok sběru dat 100 ms. Jedná se o jednu z hlavních nevýhod AmBe zdroje oproti neutronovému generátoru.

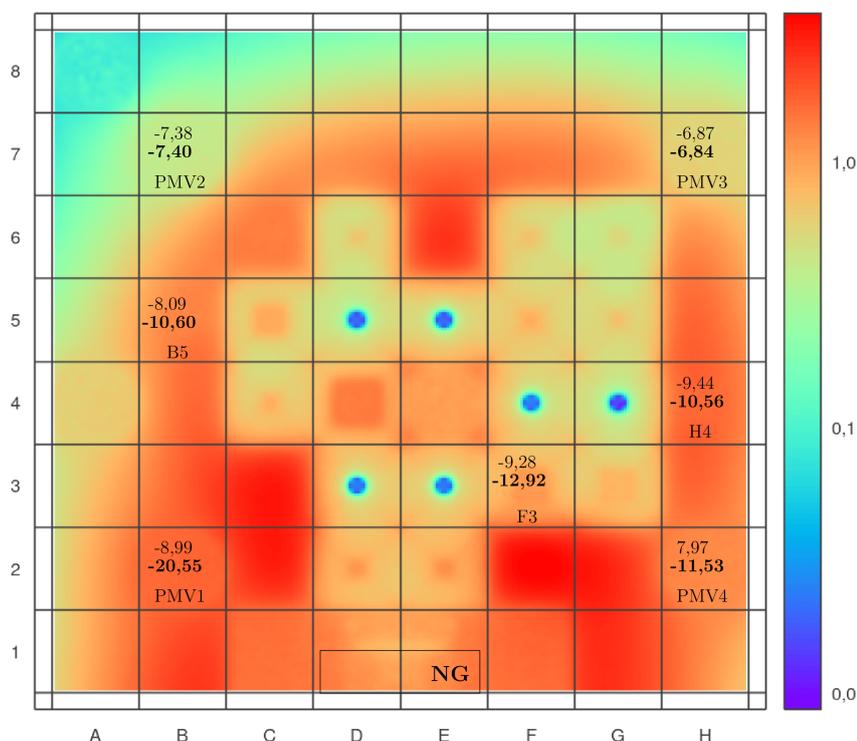
Na obrázku 2.39 a 2.38 jsou vyneseny hodnoty vážených průměrů reaktivity pro krok 100 ms (tučně) a 1 s společně s rozložením hustoty toku tepelných neutronů a

polohou detektorů pro neutronový generátor a AmBe zdroj.

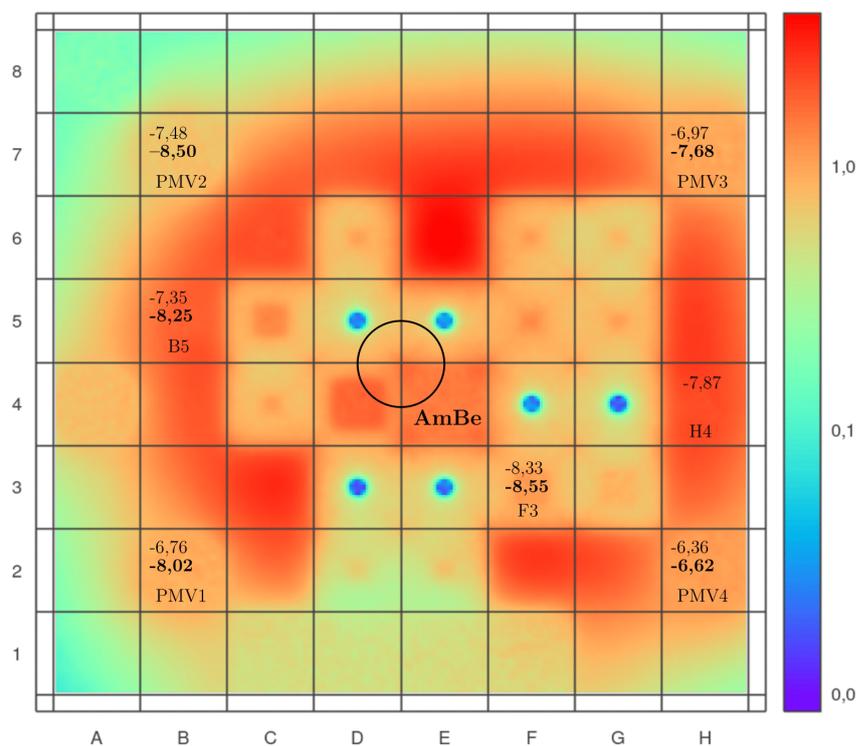
Z těchto obrázků lze říci, že výsledky získané při použití neutronového generátoru jsou silněji podmíněné pozicí detektoru. To je způsobeno silnější nehomogeností rozložení hustoty toku neutronů a rozdílnou vzdáleností detektorů od generátoru. Detektor F3, který byl nejbližší neutronovému generátoru, dává oproti detektoru B5 či PMV 2 a 3 hlubší podkritičnost. Ta může být způsobena tím, že detektor F3 zaznamenává především neutrony z generátoru. Z Obr. 2.39 je možné soudit, že při použití AmBe zdroje nemá pozice detektoru na výslednou hodnotu reaktivity skoro žádný vliv.

Závěrem tohoto experimentálního měření je pozorování, že použitím neutronového generátoru a časovém kroku sběru dat 100 ms se pro jednotlivé detektory dosáhne konzistentnějších výsledků odpovídajících numerickému výpočtu, než při použití AmBe zdroje. Díky daleko kratší době potřebné k vypnutí generátoru je určení momentu odstranění zdroje daleko přesnější a získaná podkritičnost není podhodnocena. Na druhou stranu využití generátoru vede k silné závislosti na pozici detektoru, která pro nízké odezvy může vést k chybně určeným hodnotám reaktivity viz Tab. 2.21. Optimalizace této pozice je proto klíčová pro dosažení kvalitních výsledků.

Z experimentálních měření se pro hluboce podkritické systémy jako výhodnější zdá být neutronový generátor zavedený v radiálním kanálu, avšak je velice důležité optimalizovat časový krok sběru dat a zvolit správnou pozici detektoru.



**Obrázek 2.38:** Hodnoty vážených průměrů reaktivity pro DD generátor při časovém kroku sběru dat 100 ms (tučně) a 1 s.



**Obrázek 2.39:** Hodnoty vážených průměrů reaktivity pro AmBe zdroj při časovém kroku sběru dat 100 ms (tučně) a 1 s.



# Kapitola 3

## Experimentální měření metodou pulsního zdroje

### 3.1 Úvod

Pro nezávislé ověření získaných výsledků bylo provedeno srovnání s výsledky získanými jinou metodou měření reaktivity, konkrétně metodou násobení zdroje. Měření bylo provedeno ve variantě Sjöstrandovy metody a Simmonsovy metody. Experiment se konal 29. 4. 2022 na školním reaktoru VR-1. Data z tohoto měření byla převzata a zpracována v rámci této práce. Tato kapitola nemá za cíl dopodrobna zkoumat problematiku měření reaktivity metodou pulsního zdroje, ale pouze rozšířit experimentální část této práce a ověřit konzistentnost metod.

### 3.2 Příprava

Experiment byl realizován stejným způsobem jako experimentální měření metodou Source-Jerk, tj. do radiálního kanálu byl zaveden neutronový D-D generátor P 385 popsáný v předchozí kapitole a byly vyjmuty vodní zátky. Všechny absorpční tyče byly v DKP (odstavený reaktor). Pro zpracování dat byly použity neutronově fyzikální charakteristiky 2.1.

Neutronový generátor byl oproti dříve zmíněným experimentům použit v pulsním režimu s frekvencí 100 Hz. Napětí bylo nastaveno na 120 kV a proud na 70  $\mu$ A. „Duty-factor“- podíl délky pulsu k periodě činil 10 %, tedy šířka pulsu byla okolo 1 ms. K detekci byl použit bórový detektor SNM-10 umístěný v pozici F3 v poloze S viz Obr. 2.4.

### 3.3 Simmonsova metoda

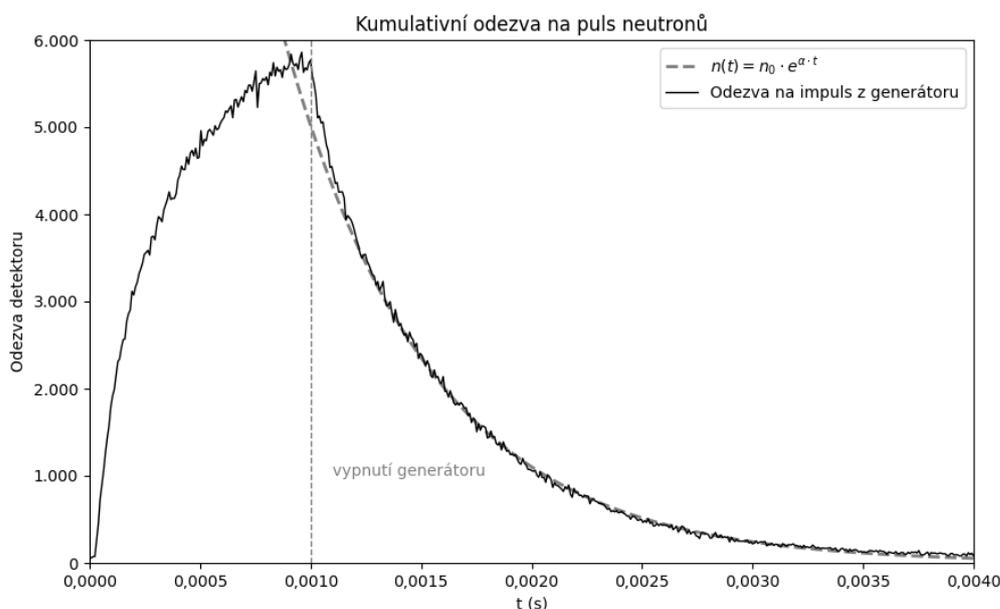
Simmonsova metoda je metoda pulsního zdroje využívající k měření reaktivity odezvu aktivní zóny reaktoru na pulsy vyvolané vnějším zdrojem neutronů, v tomto případě neutronovým generátorem.

Tato metoda byla již popsána v teoretické části této práce, proto bude pouze připomenut finální vztah pro výpočet reaktivity:

$$\alpha = \frac{\rho - \beta_{ef}}{\Lambda}. \quad (3.1)$$

Postup měření spočívá v proložení odezvy detektoru exponenciální<sup>2</sup> funkcí a následné nalezení koeficientu  $\alpha$  charakterizujícího pokles. Poté se reaktivita určí pomocí vztahu 3.1.

Očekávaný průběh kumulativní odezvy na puls neutronů je vyobrazen v grafu 3.1 společně s vyznačením času vypnutí neutronového generátoru.

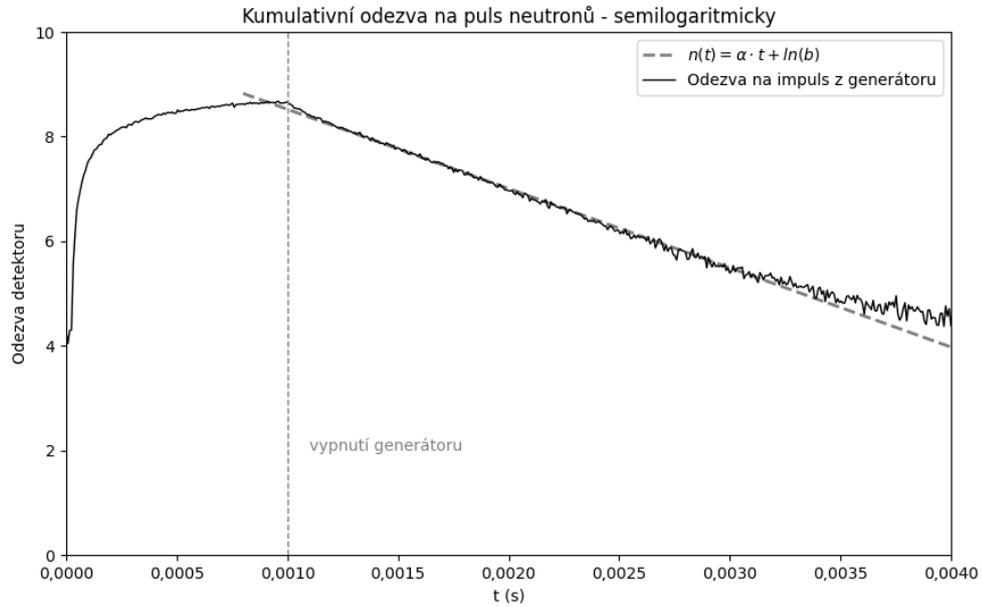


**Obrázek 3.1:** Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem.

### 3.3.1 Výsledky

V grafu 3.1 je uveden průběh odezvy v semilogaritmickém měřítku na puls vyvolaný neutronovým generátorem. Exponenciální pokles byl po odstranění zdroje v intervalu 0,0014 až 0,0024 s proložen přímkou, jejíž směrnici je rozpadová konstanta  $\alpha$ . Začátek pro proložení byl zvolen až  $4 \cdot 10^{-4}$  s po odstranění zdroje, protože ustálený stav hustoty neutronů se dostaví až po několika desetínách ms. Konec intervalu byl zvolen tak, aby na odezvu neměla vliv změna koncentrace mateřských jader zpožděných neutronů.

<sup>2</sup>Prokládání bylo provedeno v semilogaritmickém měřítku lineární funkcí



**Obrázek 3.2:** Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem - semilogaritmicky.

Lineární pokles vyznačený v grafu 3.2 je popsán funkcí

$$n(t) = -1563,35 \cdot t + 24757,11. \quad (3.2)$$

Ze vztahu 3.1 byla poté vypočtena reaktivita

$$\rho(\beta_{\text{ef}}) = -8.53, \quad (3.3)$$

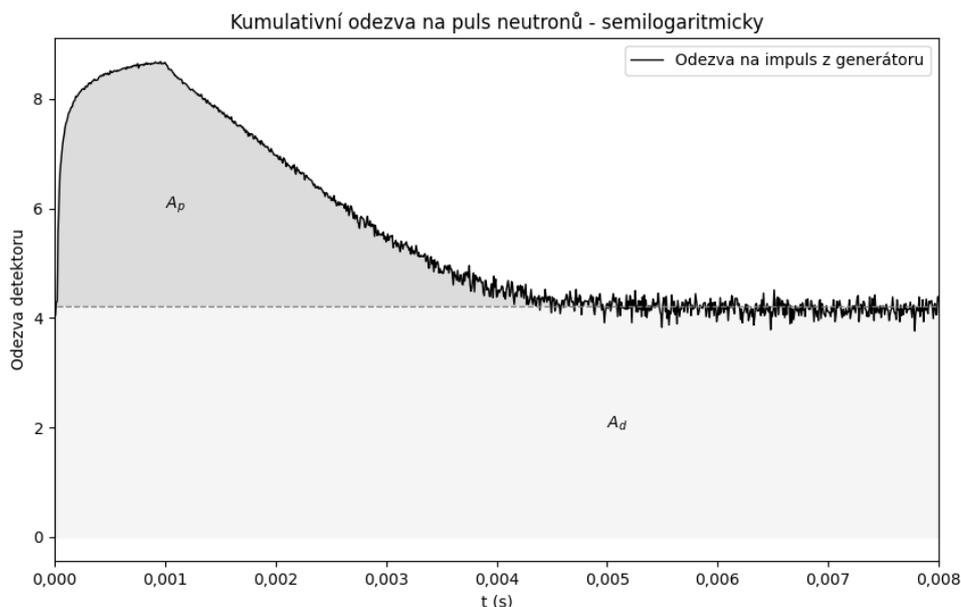
kde pro výpočet byly použity kinetické parametry  $\beta_{\text{ef}}$  a  $\Lambda$  vypočítané kódem Serpent 2 pro 8 grupové přiblížení viz Tab.2.1.

### 3.4 Sjöstrandova metoda

Sjöstrandova metoda experimentálního měření reaktivity (rovněž popsaná v teoretické části) je velice podobná Simmonsově metodě, neboť se také jedná o metodu pulsního zdroje. Stejně jako v předchozí metodě je sledována odezva aktivní zóny na pulsy vyvolané neutronovým generátorem. Výsledný vztah používaný pro výpočet reaktivity má tvar:

$$\frac{\rho}{\beta_{\text{ef}}} = -\frac{A_p}{A_d}, \quad (3.4)$$

kde  $A_p$  je plocha pod píkem od okamžitých neutronů a  $A_d$  je plocha od zpožděných neutronů. Tyto plochy jsou naznačeny v grafu 3.3.



**Obrázek 3.3:** Kumulativní odezva na puls vyvolaný neutronovým generátorem - semilogaritmicky.

### 3.4.1 Výsledky

Plochy od okamžitých a zpožděných neutronů byly numericky napočítány lichoběžníkovou metodou:

$$A_p = 7.67 \ \& \ A_d = 0,6910. \quad (3.5)$$

Dle rovnice 3.4 je potom reaktivita:

$$\rho(\beta_{ef}) = -11,11. \quad (3.6)$$

## 3.5 Diskuze a srovnání

Výsledné hodnoty reaktivity získané těmito metodami se značně liší, blíže správné (numericky vypočítané) hodnotě je výsledek z Sjöstrandovy metody. Oproti metodě Source-Jerk nebyl problém v určení času odstranění zdroje. U Simmonsovy metody výsledek slabě závisel na prokládaném časovém intervalu. Pro porovnání výsledků s metodou SJ by bylo potřeba použít více detektorů a srovnat získané hodnoty reaktivity.

# Kapitola 4

## Výpočet

### 4.1 Úvod

Hlavním cílem této kapitoly bylo získání hodnot provozních parametrů reaktoru, konkrétně efektivního koeficientu násobení  $k_{\text{ef}}$  a kinetických parametrů spojených s popisem jednotlivých skupin zpožděných neutronů. Dále bylo v rámci výpočtu získáno rozložení hustoty toku neutronů v AZ reaktoru. Veškeré výpočty uvedené v této kapitole byly dodány pracovníkem katedry a v rámci této práce byly pouze komentovány a využity ke zpracování experimentálních měření. Vypočtené hodnoty byly také použity pro srovnání s výsledky experimentálního měření metodou Source-Jerk. Rozložení hustoty toku neutronů bylo podkladem pro zkoumání prostorové závislosti naměřených hodnot reaktivity.

### 4.2 Popis

K získání výše uvedených parametrů byl použit program Serpent 2 s využitím 8-grupové knihovny ENDF/B-VIII.0 pro získání koeficientu násobení a 6-grupové knihovny JEFF-3.3 pro výpočet kinetických parametrů. Výpočet provozních parametrů reaktoru byl proveden pro reaktor s otevřeným a uzavřeným radiálním kanálem<sup>3</sup>. Rozložení hustoty toku neutronů bylo získáno pro otevřený AZ se zapnutým neutronovým generátorem v radiálním kanálu a poté se zapnutým AmBe zdrojem. Pro výpočet nebyl uvažován vliv detektorů vložených do AZ (jak bórových tak i PMV).

### 4.3 Kinetické parametry reaktoru

V Tab. 4.1 a 4.2 jsou uvedeny vypočtené kinetické parametry reaktoru, které byly použity pro aplikaci metody Source-Jerk a metody pulsního zdroje. Výpočet byl proveden jak pro otevřený, tak i uzavřený radiální kanál za účelem srovnání hodnot a studium, zda má vyndání vodních zátek vliv na tyto parametry.

---

<sup>3</sup>Otevřeným radiálním kanálem se rozumí kanál bez vložených vodních zátek.

**Tabulka 4.1:** Kinetické parametry AZ - knihovna JEFF 3.3 - otevřený radiální kanál.

	$\Lambda$	$5,00163 \cdot 10^{-5} \pm 3,00100 \cdot 10^{-8}$
	$\beta_{\text{ef}}$	$7,94716 \cdot 10^{-3} \pm 9,53700 \cdot 10^{-6}$
skupina	$\beta_{\text{ef}}$	$\lambda$
1	$2,70183 \cdot 10^{-4} \pm 1,89100 \cdot 10^{-6}$	$1,24667 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
2	$1,18180 \cdot 10^{-3} \pm 3,78200 \cdot 10^{-6}$	$2,82917 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
3	$7,50609 \cdot 10^{-4} \pm 3,00200 \cdot 10^{-6}$	$4,25244 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
4	$1,56508 \cdot 10^{-3} \pm 4,38200 \cdot 10^{-6}$	$1,33042 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
5	$2,59736 \cdot 10^{-3} \pm 5,71400 \cdot 10^{-6}$	$2,92467 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
6	$7,36615 \cdot 10^{-4} \pm 2,94600 \cdot 10^{-6}$	$6,66488 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
7	$6,54765 \cdot 10^{-4} \pm 2,75000 \cdot 10^{-6}$	$1,63478 \pm 00000$
8	$1,90750 \cdot 10^{-4} \pm 1,54500 \cdot 10^{-6}$	$3,55460 \pm 00000$
$\sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i \cdot \beta_{\text{ef}}}$		$1,2998 \cdot 10^1 \pm 3,15140 \cdot 10^{-2}$

**Tabulka 4.2:** Kinetické parametry AZ - knihovna JEFF 3.3 - uzavřený radiální kanál.

	$\beta_{\text{ef}}$	$7,92786 \cdot 10^{-3} \pm 1,03100 \cdot 10^{-5}$
	$\Lambda$	$4,98910 \cdot 10^{-3} \pm 2,99000 \cdot 10^{-6}$
skupina	$\beta_{\text{ef}}$	$\lambda$
1	$2,70561 \cdot 10^{-4} \pm 1,86700 \cdot 10^{-6}$	$1,24667 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
2	$1,17515 \cdot 10^{-3} \pm 3,87800 \cdot 10^{-6}$	$2,82917 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
3	$7,50161 \cdot 10^{-4} \pm 3,07600 \cdot 10^{-6}$	$4,25244 \cdot 10^{-2} \pm 0,00000$
4	$1,56557 \cdot 10^{-3} \pm 4,54000 \cdot 10^{-6}$	$1,33042 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
5	$2,58519 \cdot 10^{-3} \pm 5,68700 \cdot 10^{-6}$	$2,92467 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
6	$7,37834 \cdot 10^{-4} \pm 3,10000 \cdot 10^{-6}$	$6,66488 \cdot 10^{-1} \pm 0,00000$
7	$6,53781 \cdot 10^{-4} \pm 2,81100 \cdot 10^{-6}$	$1,63478 \pm 0,00000$
8	$1,89613 \cdot 10^{-4} \pm 1,51700 \cdot 10^{-6}$	$3,55460 \pm 0,00000$
$\sum_{i=1}^8 \frac{\beta_{\text{ef},i}}{\lambda_i \cdot \beta_{\text{ef}}}$		$1,2998 \cdot 10^1 \pm 2,76800 \cdot 10^{-2}$

Z Tab. 4.1 a 4.2 je vidět, že rozpadové konstanty jednotlivých skupin zpožděných neutronů  $\lambda_i$  se při vyndání vodních zátek nezmění. Rozdíl v hodnotách  $\beta_{\text{ef},i}$  je do 0,2 %.

## 4.4 Kritičnost reaktoru

V Tab.4.3 jsou podány hodnoty  $k_{\text{ef}}$  a  $\rho$  pro uzavřený a otevřený radiální kanál.

**Tabulka 4.3:** Kritičnost reaktoru.

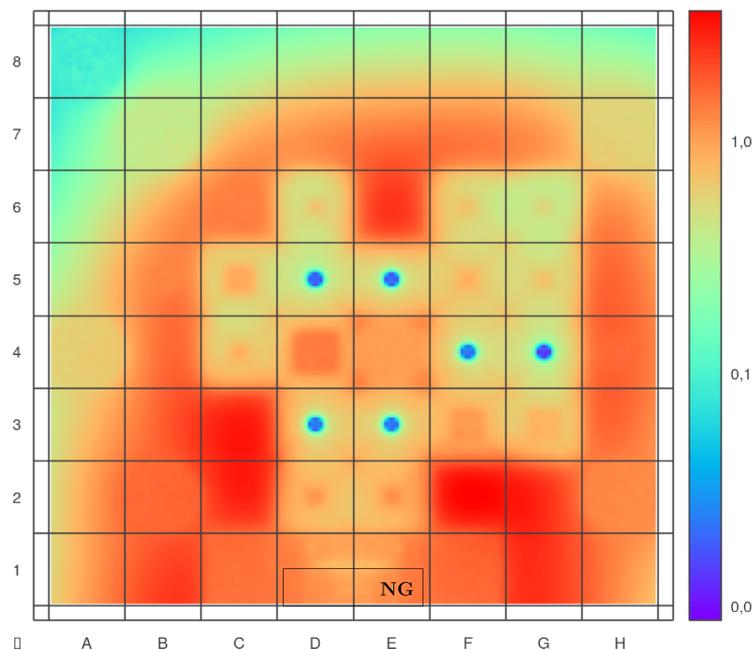
Radiální kanál:	Otevřený	Uzavřený
$k_{\text{ef}}(-)$	$0,929497 \pm 3,00000 \cdot 10^{-5}$	$0,922754 \pm 3,00000 \cdot 10^{-5}$
$\rho(-)$	$-0,07585 \pm 4,00000 \cdot 10^{-5}$	$-0,08371 \pm 4,00000 \cdot 10^{-5}$
$\rho(\beta_{\text{ef}})$	<b><math>-9,84970 \pm 4,92500 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>-10,84445 \pm 5,42200 \cdot 10^{-3}</math></b>

## 4.5 Rozložení hustoty toku neutronů

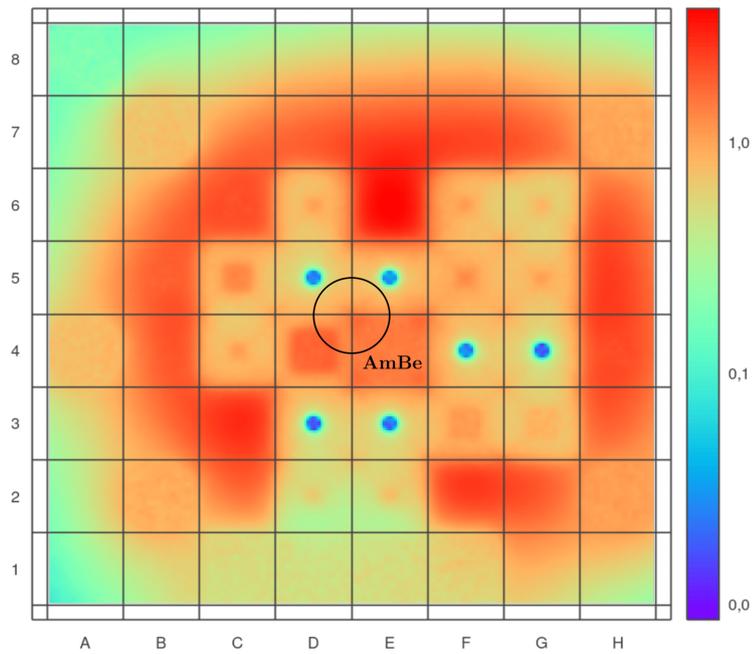
Na Obr. 4.1, 4.3, 4.2 a 4.4 jsou vykresleny neutronové toky v AZ při otevřeném HRK pro zapnutý neutronový generátor (NG) a AmBe zdroj. Z grafu na Obr. 4.1 a 4.2 je vidět, že z důvodu absorpce tepelných neutronů v palivu klesá v pozicích palivových souborů hustota toku tepelných neutronů. Zároveň je na obou obrázcích ilustrována absorpce tepelných neutronů na absorpčních tyčích v pozicích D3, E3, F4, G4, D5 a E5. Je vidět, že vlivem zpomalování neutronů dochází na rozhraní AZ a moderátoru k nárůstu hustoty toku tepelných neutronů. Důležité je zmínit skutečnost, že při použití neutronového generátoru je rozložení hustoty toku neutronů daleko nehomogennější, než při aplikaci AmBe zdroje. Zároveň je patrné, že odezvy z detektorů v řadách 2 a 3 budou oproti odezvám z detektorů v řadách 6 a 7. znatelně větší.

Z Obr. 4.3 a 4.4 je zcela patrné, že rozložení hustoty toku rychlých neutronů je oproti případu tepelných neutronů daleko rovnoměrnější.

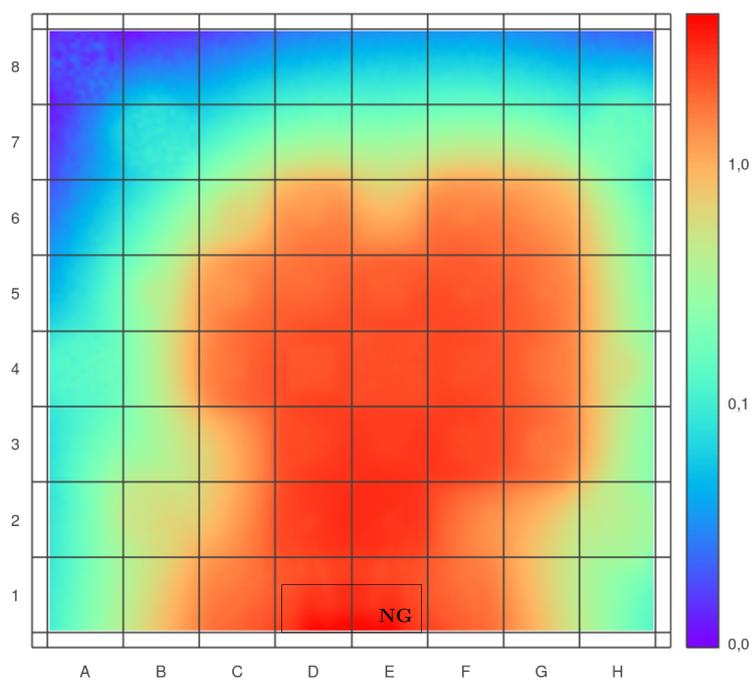
Jednotky jsou ve všech variantách výpočtu relativní.



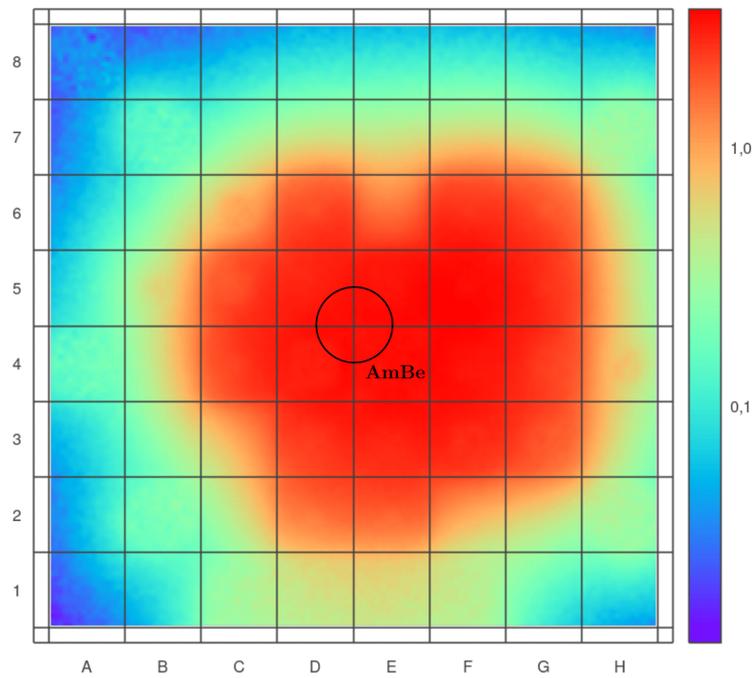
**Obrázek 4.1:** Rozložení hustoty toku tepelných neutronů v AZ reaktoru při zapnutém neutronovém generátoru.



**Obrázek 4.2:** Rozložení hustoty toku tepelných neutronů v AZ reaktoru při AmBe zdroji v pracovní poloze.



**Obrázek 4.3:** Rozložení hustoty toku rychlých neutronů v AZ reaktoru při zapnutém neutronovém generátoru.



**Obrázek 4.4:** Rozložení hustoty toku rychlých neutronů v AZ reaktoru při AmBe zdroji v pracovní poloze.



# Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat experimenty na školním reaktoru VR-1 zaměřené na aplikaci metody Source-Jerk s využitím neutronového generátoru a srovnat naměřené hodnoty s výsledky získanými metodou Source-Jerk při použití AmBe zdroje. Jedním z důvodů realizace experimentů byla skutečnost, že neutronový generátor má významně kratší dobu potřebnou pro vypnutí, než je doba potřebná pro přesun AmBe zdroje. Proto jsou při použití neutronového generátoru daleko lépe splněny teoretické předpoklady použité při odvození metody. Dalším důvodem byla snaha studovat vliv pozice neutronového zdroje na výsledné hodnoty reaktivity.

V teoretické části práce jsou popsány metody měření reaktivity používané převážně na výzkumných a experimentálních reaktorech. Jednotlivé metody jsou ilustrovány a vždy jsou uvedeny funkční vztahy pro výpočet reaktivity. Až na metodu Rossi- $\alpha$ , metodu násobení zdroje a metodu inverzní kinetiky jsou všechny založené na časové analýze chování reaktoru při vytvoření poruchy, např. odstraněním zdroje, pádem absorpční tyče či impulsem vyvolaným vnějším zdrojem neutronů. V závěru teoretické části práce jsou odvozeny vztahy pro aplikaci metody Source-Jerk (ve variantě okamžitého skoku či integrální variantě) a jsou diskutovány její výhody, nevýhody a nejistoty.

Na začátku experimentální části této práce je popsána metodika a použité vybavení. Všechna měření jsou popsána a zpracována ve formě tabulek a grafů. Veškeré naměřené hodnoty použité pro stanovení reaktivity jsou uvedeny v příloze. V předposlední kapitole jsou pak pro doplnění stručně diskutovány výsledky získané metodou pulsního zdroje. Poslední kapitola obsahuje numericky vypočtené hodnoty, konkrétně rozložení hustoty toku neutronů v AZ, koeficient násobení a kinetické parametry použité pro experimentální měření.

Experimentální práci lze rozdělit na přípravný a hlavní experiment. Cílem přípravného experimentu bylo získat základní představu o charakteru měření metodou Source-Jerk. Z výsledků experimentu bylo možné optimalizovat výšku uložení bórových detektorů a získat základní představu o charakteristice měření. Tyto závěry byly dále použity jako podklad pro realizaci hlavních experimentů.

Cílem hlavních experimentů bylo využít neutronový D-D generátor k získání konzistentních výsledků pro srovnání hodnot reaktivity při využití neutronového generátoru a AmBe zdroje. Kromě toho bylo také cílem diskutovat vliv pozice a časovém kroku sběru dat na získané hodnoty reaktivity a popsat výhody a nevýhody využití obou zdrojů neutronů.

Při časovém kroku sběru dat 1 s se u bórových detektorů objevila chyba, kdy se od sebe hodnoty reaktivity mezi jednotlivými měřeními odchylovaly až o 2  $\beta_{ef}$ . Jelikož se tato chyba projevila také u detektorů PMV, tak bylo možné předpokládat, že nezávisí na typu detektoru. Na co typ detektoru vliv měl, byla odezva detektorů

a s tím spjatá statistická chyba měření. Ukázalo se, že bórové detektory jsou zna-  
telně citlivější a poskytují vyšší odezvu. Při použití neutronového generátoru nebyla  
naměřená reaktivita mezi jednotlivými detektory tak konzistentní, jako v případě  
využití AmBe zdroje. To je způsobeno tím, že AmBe zdroj je umístěn zhruba ve  
středu AZ a vůči všem detektorům je jeho poloha víceméně stejná. Rozložení hustoty  
toku neutronů je proto oproti neutronovému generátoru rovnoměrnější viz Obr. 4.2.

Zásadní zjištění plynoucí z hlavních měření s časovým krokem sběru dat 1 s  
bylo nalezení chyby způsobené nedostatečnou přesností stanovení momentu odstra-  
nění zdroje. V druhé části hlavních experimentů byl časový krok optimalizován za  
účelem odstranění této chyby. To v případě použití neutronového generátoru vedlo  
k velice konzistentním výsledkům odpovídajícím numerickému výpočtu. Bórové de-  
tektory oproti předchozím měřením dávaly velice konzistentní hodnoty reaktivity,  
které se v rámci jednotlivých detektorů lišily do 5 %. Nejblíže numericky napočítá-  
né reaktivitě byly detektor B5 a H4. U detektoru F3 byla hlubší podkritičnost  
nejspíše způsobena tím, že detektor zaznamenával převážně neutrony emitované ne-  
utronovým generátorem viz Obr. 4.1. Výsledné hodnoty reaktivity z detektoru F3  
se od detektorů B5 a H4 lišily až o  $2 \beta_{\text{ef}}$ . Naopak detektory PMV se pro krok 100  
ms ukázaly jako nepoužitelné. Nízká odezva a relativně velké fluktuace měřené čet-  
nosti zapříčinily problematické určení momentu odstranění zdroje. Např. detektory  
PMV1 a PMV4 naměřily až dvojnásobnou hodnotu reaktivity, než detektory PMV2  
a PMV3. Rozdíl byl nejspíše způsoben tím, že stejně jako detektor F3, tak i PMV1 a  
PMV4 detekují převážně neutrony emitované přímo neutronovým generátorem viz  
Obr. 4.1. To způsobí větší poměr odezvy  $n_0$  a integrálu  $\int n(t) dt$ , a tedy i hlubší  
stanovenou podkritičnost. Ze srovnání vážených průměrů reaktivity určených pro  
jednotlivé detektory plyne silná prostorová závislost.

Při použití AmBe zdroje a časového kroku sběru dat 100 ms bylo možné po-  
zorovat rovnoměrnější rozložení hustoty toku neutronů. Vlivem delší doby potřebné  
pro odstranění AmBe zdroje jsou však výsledné hodnoty reaktivity v případě všech  
detektorů nadhodnoceny, přičemž výsledky se pohybují okolo  $-7$  až  $-8 \beta_{\text{ef}}$ . Z detek-  
torů PMV se získaly relativně konzistentní výsledky, které se pro všechny detektory  
pohybovaly zhruba v rozmezí od  $-9$  do  $-6 \beta_{\text{ef}}$ , ale z důvodu již zmíněné nízké odezvy  
byla měření zatíženou velkou statistickou chybou. Pro aplikaci metody Source-Jerk  
s časovým krokem sběru dat 100 ms nebyly v případě ani jednoho zdroje neutronů  
detektory PMV dostatečně použitelné.

Pro měření metodou Source-Jerk s využitím neutronového generátoru se jako  
optimální zdají být bórové detektory s časovým krokem sběru dat 100 ms. Jako ide-  
ální se jeví pozice B5 a H4, kdežto pozice F3 je silně ovlivněna neutrony emitovanými  
generátorem. Proto jsou hodnoty reaktivity v případě detektoru F3 podhodnoceny.  
Vlivem znatelně kratší doby potřebné k vypnutí generátoru jsou výsledky oproti  
AmBe zdroji konzistentnější a více odpovídají numerickému výpočtu. To potvrzuje  
výhodu neutronového generátoru oproti radionuklidovému zdroji. Teoreticky by ale  
bylo možné využít konzistentnosti výsledků s AmBe zdrojem a stanovit opravný koe-  
ficient, který by respektoval nadhodnocení integrálu. Jeho stanovení by bylo svázáno  
s určením referenční hodnoty reaktivity, přičemž by koeficient musel respektovat po-  
lohu detektoru.

Metoda Source-Jerk je odvozená z modelu jednobodové kinetiky, což jsou pro-  
storově nezávislé rovnice. Vlivem toho se můžou získané hodnoty reaktivity od  
skutečné podkritičnosti více či méně lišit. Proto by předmětem navazujících stu-  
dií metody Source-Jerk mohlo být právě zpracování a úprava vztahu pro výpočet

reaktivity tak, aby pozici detektoru respektoval. Prostorově závislé jsou kromě hustoty neutronů také i koncentrace mateřských jader zpožděných neutronů, což má vliv na kinetické parametry  $\lambda_i$ ,  $\beta_{ef,i}$  atd. Otázkou zůstává, zda-li by matematické, resp. výpočetní zahrnutí prostorové závislosti do stanovené reaktivity vedlo k jejímu zpřesnění. V neposlední řadě se pro další studium nabízí otázka, jak poloha zdroje vůči AZ a vůči detektorům ovlivňuje výsledky a jak tuto polohu optimalizovat. Z numerického výpočtu totiž vyplývá, že poloha externího zdroje neutronů má zásadní vliv na rozložení hustoty toku neutronů. Srovnáním Obr. 2.39 a 2.38 lze pozorovat, že toto rozložení je zcela zásadní pro získání konzistentních výsledků z jednotlivých detektorů.

Z této práce vyplynulo několik doporučení pro další experimentální činnost spojenou s měření reaktivity metodou Source-Jerk. V ideálním případě by neutrony emitované neutronovým zdrojem měly procházet palivem a detektory by měly být ve vzdálenosti, ve které mají dostatečnou odezvu. Zdroj je vhodné vložit tak, aby celou AZ reaktoru ovlivňoval rovnoměrně, tj. v ideálním případě by měl být zdroj ve středu. Časový krok je vhodné zvolit tak, aby se s ohledem na dostatečnou odezvu minimalizovala chyba určení momentu odstranění zdroje. Odstranění externího zdroje neutronů by se mělo co nejvíce blížit teoretickému předpokladu, že doba potřebná pro toto odstranění se blíží 0 s. Pro optimalizaci experimentální metody Source-Jerk s neutronovým generátorem lze použít režim tzv. „pomalého pulsování“ v předem definovaných časových krocích. Tím by bylo možné měření mnohonásobně opakovat, příslušné odezvy kumulovat a získat statisticky přesnější data.



# Reference

1. STACEY, Weston M. *Nuclear reactor physics*. Wiley, 2018. ISBN 978-3527406791. Dostupné také z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Nz1JDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=stacey+weston+reactor+physics&ots=TyI6ZTceEo&sig=UMegy-Aj1xLPcG3JahikwoVG6nQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q=stacey%20weston%20reactor%20physics&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Nz1JDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR23&dq=stacey+weston+reactor+physics&ots=TyI6ZTceEo&sig=UMegy-Aj1xLPcG3JahikwoVG6nQ&redir_esc=y#v=onepage&q=stacey%20weston%20reactor%20physics&f=false).
2. LAMARSH, John R.; BARATTA, Anthony John et al. *Introduction to nuclear engineering*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2001. ISBN 978-0201824988. Dostupné také z: [https://www.academia.edu/34880308/Introduction\\_to\\_nuclear\\_engineering\\_lamarsh\\_3rd](https://www.academia.edu/34880308/Introduction_to_nuclear_engineering_lamarsh_3rd).
3. RATAJ, Jan; HUML, Ondřej; SKLENKA, Lubomír. *Experimentální neutronová a reaktorová fyzika: laboratorní cvičení*. České vysoké učení technické, 2016. ISBN 8001059049.
4. HUML, Ondřej. *Neutronově-fyzikální charakteristiky AZ C18 školního reaktoru VR-1*. 2021. Tech. zpr., CTU-14117-P-04-21. České vysoké učení technické.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (IAEA). *Reactivity Measurements Proceedings of a Panel (IAEA-108)*. 1968. Tech. zpr. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/47/017/47017598.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/017/47017598.pdf?r=1).
6. GOZANI, Tsahi. *Subcritical reactor kinetics and reactivity measurements*. 1962. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000087577>. Dis. pr. ETH Zurich.
7. BERGLÖF, Carl. *On measurement and monitoring of reactivity in subcritical reactor systems*. 2010. Dostupné také z: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=1930&pid=diva2%3A315354>. Dis. pr. KTH.
8. MALKAWI, Salaheddin; SWEIDAN, Faris; KHALIFEH, Hussam. Reactivity determination in a subcritical reactor: Computational, analytical and experimental methods. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108432>.
9. SPRIGGS, Gregory; PEDERSON, Ray A. *Source-jerk analysis using a semi-explicit inverse kinetic technique*. 1985. Tech. zpr. Los Alamos National Lab., NM (USA). Dostupné také z: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1056620/m2/1/high\\_res\\_d/5147458.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1056620/m2/1/high_res_d/5147458.pdf).
10. PROFIO, Edward A. *Experimental reactor physics*. New York: Wiley, 1976. ISBN 978-0471700951.



# Přílohy

## A Přípravný experiment

### A.1 Bórové detektory v poloze S & neutronový generátor

**Tabulka 4:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5 umístěný v poloze S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	2019,43 ± 3,53	3383,50 ± 58,17	1,50 ± 0,07
2. měření	1528,17 ± 2,00	2599,50 ± 50,99	1,41 ± 0,07
3. měření	1474,33 ± 2,37	2551,50 ± 50,51	1,32 ± 0,07

**Tabulka 5:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3 umístěný v poloze S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	844,04 ± 1,68	1100,00 ± 33,16	0,55 ± 0,00
2. měření	846,25 ± 1,65	1496,50 ± 38,68	0,71 ± 0,00
3. měření	844,44 ± 1,60	1450,00 ± 38,08	0,61 ± 0,00

**Tabulka 6:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4 umístěný v poloze S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	3586,70 ± 4,19	5573,00 ± 74,65	2,99 ± 0,10
2. měření	3637,11 ± 3,46	6330,50 ± 79,56	3,74 ± 0,11
3. měření	3635,72 ± 3,62	5943,50 ± 77,09	3,00 ± 0,10

### A.2 Bórové detektory v poloze V & neutronový generátor

**Tabulka 7:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5 umístěný v poloze V

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	15,82 ± 0,23	39,50 ± 6,28	0,05 ± 0,01
2. měření	15,10 ± 0,23	30,00 ± 5,48	0,03 ± 0,01
3. měření	14,16 ± 0,21	19,50 ± 4,42	0,03 ± 0,01

**Tabulka 8:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3 umístěný v poloze V

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	41,79 ± 0,37	63,50 ± 7,97	0,04 ± 0,00
2. měření	41,57 ± 0,35	59,00 ± 7,68	0,04 ± 0,00
3. měření	42,03 ± 0,35	57,50 ± 7,58	0,02 ± 0,00

**Tabulka 9:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4 umístěný v poloze V

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	35,18 ± 0,28	63,00 ± 7,94	0,04 ± 0,02
2. měření	34,88 ± 0,33	73,50 ± 8,57	0,07 ± 0,03
3. měření	35,89 ± 0,34	70,50 ± 8,40	0,06 ± 0,02

### A.3 Detektory PMV & neutronový generátor

**Tabulka 10:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1 - poloha S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	352,62 ± 0,53	448,50 ± 21,18	0,00 ± 0,00
2. měření	350,55 ± 0,55	539,50 ± 23,22	0,00 ± 0,00
3. měření	353,53 ± 0,48	498,50 ± 22,33	0,00 ± 0,00

**Tabulka 11:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2 - poloha S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	127,06 ± 0,43	218,00 ± 14,76	0,00 ± 0,00
2. měření	127,55 ± 0,45	242,50 ± 15,57	0,00 ± 0,00
3. měření	128,07 ± 0,38	272,00 ± 16,49	0,00 ± 0,00

**Tabulka 12:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3 - poloha S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	126,79 ± 0,36	262,50 ± 16,20	0,00 ± 0,00
2. měření	125,17 ± 0,35	265,00 ± 16,28	0,00 ± 0,00
3. měření	126,32 ± 0,36	227,00 ± 15,07	0,00 ± 0,00

**Tabulka 13:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4 - poloha S

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	238,67 ± 0,35	366,00 ± 19,13	0,00 ± 0,00
2. měření	237,19 ± 0,29	418,00 ± 20,44	0,00 ± 0,00
3. měření	225,15 ± 0,58	351,50 ± 20,52	0,00 ± 0,00

**Tabulka 14:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1 - poloha V

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$360,11 \pm 0,55$	$528,50 \pm 22,99$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$359,93 \pm 0,53$	$576,50 \pm 24,01$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$358,96 \pm 0,52$	$504,50 \pm 22,46$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 15:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2 - poloha V

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$130,89 \pm 0,48$	$241,00 \pm 15,52$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$131,80 \pm 0,49$	$242,00 \pm 15,56$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$134,66 \pm 0,49$	$270,50 \pm 16,44$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 16:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3 - poloha V

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$131,76 \pm 0,36$	$321,50 \pm 17,93$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$130,91 \pm 0,31$	$257,50 \pm 16,05$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$129,61 \pm 0,35$	$311,50 \pm 17,65$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 17:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4 - poloha V

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$238,38 \pm 0,46$	$398,50 \pm 19,96$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$211,78 \pm 0,27$	$447,00 \pm 21,14$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$212,51 \pm 0,32$	$340,00 \pm 18,44$	$0,00 \pm 0,00$

## A.4 Bórové detektory v poloze V & AmBe zdroj

**Tabulka 18:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5 - poloha V - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$6,18 \pm 0,17$	$11,00 \pm 3,32$	$0,02 \pm 0,01$
2. měření	$6,07 \pm 0,15$	$16,00 \pm 4,00$	$0,07 \pm 0,02$

**Tabulka 19:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3 - poloha V - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$16,95 \pm 0,29$	$36,50 \pm 6,04$	$0,05 \pm 0,01$
2. měření	$16,41 \pm 0,27$	$36,50 \pm 6,04$	$0,05 \pm 0,02$

**Tabulka 20:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4 - poloha V - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$14,66 \pm 0,24$	$39,00 \pm 6,25$	$0,07 \pm 0,02$
2. měření	$13,83 \pm 0,25$	$40,00 \pm 6,32$	$0,05 \pm 0,02$

## A.5 Detektory PMV & AmBe zdroj

**Tabulka 21:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1 - poloha V - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	90,63 ± 0,67	181,50 ± 13,47	0,00 ± 0,00
2. měření	91,22 ± 0,25	152,50 ± 12,35	0,00 ± 0,00

**Tabulka 22:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2 - poloha V - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	98,70 ± 0,43	200,50 ± 14,16	0,00 ± 0,00
2. měření	100,21 ± 0,47	182,50 ± 13,51	0,00 ± 0,00

**Tabulka 23:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3 - poloha V - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	94,86 ± 0,24	210,00 ± 14,49	0,00 ± 0,00
2. měření	95,93 ± 0,35	203,50 ± 14,27	0,00 ± 0,00

**Tabulka 24:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4 - poloha V - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	76,79 ± 0,21	164,50 ± 12,83	0,00 ± 0,00
2. měření	76,58 ± 0,20	132,00 ± 11,49	0,00 ± 0,00

## B Hlavní experimenty

### B.1 Bórové detektory s časovým krokem 1 s & neutronový generátor

**Tabulka 25:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	1088,43 ± 1,80	2146,50 ± 46,33	1,77 ± 0,08
2. měření	1088,89 ± 1,82	2297,50 ± 47,93	1,79 ± 0,10
3. měření	1087,05 ± 1,97	2236,50 ± 47,29	1,60 ± 0,10
4. měření	1098,43 ± 1,82	2278,50 ± 47,73	1,62 ± 0,07
5. měření	1100,77 ± 1,82	2181,50 ± 46,71	1,69 ± 0,07
6. měření	1101,06 ± 1,86	2134,00 ± 46,19	1,49 ± 0,07

**Tabulka 26:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	600,69 ± 1,91	1162,50 ± 34,10	0,79 ± 0,05
2. měření	593,92 ± 1,21	1058,00 ± 32,46	0,73 ± 0,07
3. měření	592,46 ± 3,69	955,00 ± 30,90	0,58 ± 0,06
4. měření	1045,89 ± 1,94	1760,50 ± 41,96	1,18 ± 0,06
5. měření	1038,74 ± 1,94	1773,00 ± 42,11	1,35 ± 0,07
6. měření	1037,59 ± 2,03	1733,00 ± 41,63	1,26 ± 0,06

**Tabulka 27:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	3100,38 ± 3,35	5068,00 ± 71,99	4,32 ± 0,16
2. měření	3108,81 ± 3,49	4931,50 ± 70,22	4,63 ± 0,16
3. měření	3107,57 ± 3,31	5422,00 ± 73,63	4,05 ± 0,15
4. měření	1225,09 ± 2,17	2169,50 ± 46,58	1,74 ± 0,08
5. měření	1221,61 ± 2,14	2278,50 ± 47,73	1,87 ± 0,08
6. měření	1222,94 ± 2,10	2132,50 ± 46,18	1,40 ± 0,07

## B.2 Detektory PMV s časovým krokem 1 s & neutronový generátor

**Tabulka 28:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	300,72 ± 0,46	362,50 ± 19,04	0,00 ± 0,00
2. měření	303,31 ± 0,54	534,00 ± 23,11	0,00 ± 0,00
3. měření	302,04 ± 0,50	454,00 ± 21,31	0,00 ± 0,00
4. měření	322,99 ± 0,55	496,50 ± 22,28	0,00 ± 0,00
5. měření	323,74 ± 0,50	514,00 ± 22,67	0,00 ± 0,00
6. měření	322,98 ± 0,56	493,00 ± 22,20	0,00 ± 0,00

**Tabulka 29:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	107,89 ± 0,45	161,50 ± 12,71	0,00 ± 0,00
2. měření	108,77 ± 0,49	174,50 ± 13,21	0,00 ± 0,00
3. měření	107,45 ± 0,42	179,50 ± 13,40	0,00 ± 0,00
4. měření	114,57 ± 0,49	188,00 ± 13,71	0,00 ± 0,00
5. měření	113,90 ± 0,40	169,50 ± 13,02	0,00 ± 0,00
6. měření	114,75 ± 0,34	196,00 ± 14,00	0,00 ± 0,00

**Tabulka 30:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	106,70 ± 0,35	173,50 ± 13,17	0,00 ± 0,00
2. měření	108,30 ± 0,27	203,00 ± 14,25	0,00 ± 0,00
3. měření	106,93 ± 0,35	171,00 ± 13,08	0,00 ± 0,00
4. měření	115,47 ± 0,35	243,50 ± 15,60	0,00 ± 0,00
5. měření	114,42 ± 0,34	205,00 ± 14,32	0,00 ± 0,00
6. měření	115,37 ± 0,33	180,00 ± 13,42	0,00 ± 0,00

**Tabulka 31:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	180,66 ± 0,24	289,50 ± 17,01	0,00 ± 0,00
2. měření	181,82 ± 0,28	330,50 ± 18,18	0,00 ± 0,00
3. měření	180,72 ± 0,30	263,00 ± 16,22	0,00 ± 0,00
4. měření	247,35 ± 0,36	353,50 ± 18,80	0,00 ± 0,00
5. měření	260,63 ± 0,40	453,50 ± 21,30	0,00 ± 0,00
6. měření	253,26 ± 0,31	403,50 ± 20,09	0,00 ± 0,00

### B.3 Bórové detektory s časovým krokem 1 s & AmBe zdroj

**Tabulka 32:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5 umístěný - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
2. měření	607,12 ± 1,49	1491,50 ± 38,62	1,51 ± 0,09
3. měření	607,02 ± 1,34	1304,00 ± 36,11	1,20 ± 0,08
4. měření	563,52 ± 2,43	1354,50 ± 36,80	1,07 ± 0,07
5. měření	564,86 ± 1,50	1407,00 ± 37,51	1,32 ± 0,07
6. měření	563,41 ± 1,39	1424,00 ± 37,74	1,36 ± 0,07

**Tabulka 33:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3 - AmBe

	$n_0$ (s <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (s <sup>-1</sup> )
1. měření	252,79 ± 0,95	630,50 ± 25,11	0,79 ± 0,07
2. měření	250,42 ± 0,85	549,00 ± 23,43	0,58 ± 0,06
3. měření	249,52 ± 0,91	571,00 ± 23,90	0,64 ± 0,06
4. měření	537,40 ± 1,28	999,50 ± 31,61	0,97 ± 0,06
5. měření	537,21 ± 1,32	1114,00 ± 33,38	1,06 ± 0,06
6. měření	533,52 ± 1,39	1177,50 ± 34,31	0,99 ± 0,06

**Tabulka 34:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4 - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$1691,53 \pm 2,22$	$3927,00 \pm 62,67$	$3,92 \pm 0,15$
2. měření	$1681,19 \pm 2,48$	$3585,00 \pm 59,87$	$4,01 \pm 0,15$
3. měření	$1684,50 \pm 2,58$	$3958,00 \pm 62,91$	$3,86 \pm 0,15$
4. měření	$606,74 \pm 1,45$	$1396,50 \pm 37,37$	$1,31 \pm 0,07$
5. měření	$613,99 \pm 1,44$	$1374,50 \pm 37,07$	$1,54 \pm 0,07$
6. měření	$616,08 \pm 1,59$	$1473,00 \pm 38,38$	$1,30 \pm 0,07$

## B.4 Detektory PMV s časovým krokem 1 s & AmBe zdroj

**Tabulka 35:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1 - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$89,08 \pm 0,23$	$150,50 \pm 12,27$	$0,0 \pm 0,00$
2. měření	$88,32 \pm 0,24$	$187,50 \pm 13,69$	$0,0 \pm 0,00$
3. měření	$87,37 \pm 0,23$	$182,00 \pm 13,49$	$0,0 \pm 0,00$
4. měření	$87,23 \pm 0,22$	$164,00 \pm 12,81$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$89,11 \pm 0,21$	$158,50 \pm 12,59$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$89,45 \pm 0,22$	$164,00 \pm 12,81$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 36:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2 - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$98,94 \pm 0,44$	$182,50 \pm 13,51$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$99,19 \pm 0,36$	$162,50 \pm 13,75$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$97,44 \pm 0,34$	$182,50 \pm 13,51$	$0,00 \pm 0,00$
4. měření	$98,34 \pm 0,38$	$148,50 \pm 12,19$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$98,00 \pm 0,36$	$182,50 \pm 13,51$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$97,03 \pm 0,35$	$147,50 \pm 12,14$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 37:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3 - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$94,80 \pm 0,31$	$170,00 \pm 14,11$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$94,19 \pm 0,32$	$144,00 \pm 12,00$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$94,04 \pm 0,26$	$170,00 \pm 13,04$	$0,00 \pm 0,00$
4. měření	$94,22 \pm 0,26$	$166,00 \pm 12,88$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$94,23 \pm 0,31$	$198,00 \pm 14,07$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$95,63 \pm 0,32$	$190,00 \pm 13,78$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 38:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4 - AmBe

	$n_0$ ( $s^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $s^{-1}$ )
1. měření	$75,65 \pm 0,16$	$142,50 \pm 11,94$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$74,83 \pm 0,16$	$151,50 \pm 12,31$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$74,60 \pm 0,14$	$162,00 \pm 12,73$	$0,00 \pm 0,00$
4. měření	$88,61 \pm 0,16$	$188,00 \pm 13,71$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$98,28 \pm 0,21$	$199,50 \pm 14,12$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$98,72 \pm 0,19$	$196,50 \pm 14,02$	$0,00 \pm 0,00$

## B.5 Bórové detektory s časovým krokem 100 ms & neutronový generátor

**Tabulka 39:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5

	$n_0$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )
1. měření	$120,19 \pm 0,20$	$189,55 \pm 13,77$	$0,14 \pm 0,01$
2. měření	$120,62 \pm 0,20$	$185,20 \pm 13,61$	$0,12 \pm 0,01$
3. měření	$120,44 \pm 0,20$	$186,30 \pm 13,65$	$0,15 \pm 0,01$
4. měření	$120,37 \pm 0,20$	$188,80 \pm 13,74$	$0,15 \pm 0,01$
5. měření	$119,62 \pm 0,20$	$186,70 \pm 13,66$	$0,15 \pm 0,01$
6. měření	$119,78 \pm 0,20$	$184,90 \pm 13,60$	$0,13 \pm 0,01$
7. měření	$119,89 \pm 0,20$	$193,30 \pm 13,90$	$0,13 \pm 0,01$
8. měření	$119,49 \pm 0,21$	$192,80 \pm 13,89$	$0,15 \pm 0,01$
9. měření	$119,40 \pm 0,20$	$186,85 \pm 13,67$	$0,13 \pm 0,01$

**Tabulka 40:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3

	$n_0$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )
1. měření	$78,17 \pm 0,16$	$101,90 \pm 10,09$	$0,08 \pm 0,01$
2. měření	$77,47 \pm 0,16$	$98,90 \pm 9,94$	$0,07 \pm 0,01$
3. měření	$77,06 \pm 0,17$	$98,25 \pm 9,91$	$0,06 \pm 0,01$
4. měření	$76,91 \pm 0,16$	$101,40 \pm 10,07$	$0,07 \pm 0,01$
5. měření	$77,07 \pm 0,16$	$99,60 \pm 9,98$	$0,09 \pm 0,01$
6. měření	$76,50 \pm 0,16$	$96,90 \pm 9,84$	$0,08 \pm 0,01$
7. měření	$76,72 \pm 0,16$	$105,10 \pm 10,25$	$0,08 \pm 0,01$
8. měření	$76,47 \pm 0,16$	$97,75 \pm 9,89$	$0,08 \pm 0,01$
9. měření	$76,25 \pm 0,16$	$97,40 \pm 9,87$	$0,06 \pm 0,01$

**Tabulka 41:** Hodnoty četností impulsů pro detektor H4

	$n_0$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )
1. měření	$357,79 \pm 0,35$	$541,90 \pm 23,28$	$0,23 \pm 0,01$
2. měření	$357,66 \pm 0,36$	$545,30 \pm 23,35$	$0,38 \pm 0,01$
3. měření	$356,96 \pm 0,38$	$550,85 \pm 23,47$	$0,38 \pm 0,01$
4. měření	$357,82 \pm 0,36$	$546,30 \pm 23,37$	$0,38 \pm 0,01$
5. měření	$356,34 \pm 0,40$	$539,95 \pm 23,24$	$0,36 \pm 0,01$
6. měření	$357,62 \pm 0,37$	$537,60 \pm 23,18$	$0,41 \pm 0,01$
7. měření	$355,40 \pm 0,46$	$545,40 \pm 23,35$	$0,35 \pm 0,01$
8. měření	$355,02 \pm 0,54$	$559,45 \pm 23,41$	$0,41 \pm 0,01$
9. měření	$356,61 \pm 0,36$	$547,20 \pm 23,36$	$0,36 \pm 0,01$

## B.6 Detektory PMV s časovým krokem 100 ms & neutronový generátor

**Tabulka 42:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1

	$n_0$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )
1. měření	$35,18 \pm 0,11$	$24,60 \pm 4,96$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$35,41 \pm 0,11$	$22,90 \pm 4,79$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$35,52 \pm 0,11$	$24,25 \pm 4,92$	$0,00 \pm 0,00$
4. měření	$35,81 \pm 0,11$	$21,80 \pm 4,67$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$35,63 \pm 0,11$	$23,05 \pm 4,80$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$35,98 \pm 0,11$	$20,95 \pm 4,58$	$0,00 \pm 0,00$
7. měření	$36,19 \pm 0,11$	$20,55 \pm 4,53$	$0,00 \pm 0,00$
8. měření	$36,31 \pm 0,11$	$22,90 \pm 4,85$	$0,00 \pm 0,00$
9. měření	$36,28 \pm 0,11$	$20,80 \pm 4,56$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 43:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2

	$n_0$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ ( $100 \text{ ms}^{-1}$ )
1. měření	$5,11 \pm 0,04$	$10,45 \pm 3,23$	$0,00 \pm 0,00$
2. měření	$5,03 \pm 0,04$	$9,15 \pm 3,02$	$0,00 \pm 0,00$
3. měření	$5,17 \pm 0,04$	$7,80 \pm 2,79$	$0,00 \pm 0,00$
4. měření	$5,05 \pm 0,04$	$8,40 \pm 2,90$	$0,00 \pm 0,00$
5. měření	$5,08 \pm 0,04$	$7,90 \pm 2,81$	$0,00 \pm 0,00$
6. měření	$5,11 \pm 0,04$	$9,10 \pm 3,02$	$0,00 \pm 0,00$
7. měření	$5,09 \pm 0,04$	$8,05 \pm 2,84$	$0,00 \pm 0,00$
8. měření	$5,01 \pm 0,04$	$9,15 \pm 3,02$	$0,00 \pm 0,00$
9. měření	$5,08 \pm 0,04$	$9,00 \pm 3,00$	$0,00 \pm 0,00$

**Tabulka 44:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	8,76 ± 0,05	16,10 ± 4,01	0,00 ± 0,00
2. měření	8,71 ± 0,05	15,35 ± 3,92	0,00 ± 0,00
3. měření	8,72 ± 0,06	15,90 ± 3,99	0,00 ± 0,00
4. měření	8,69 ± 0,05	18,25 ± 4,27	0,00 ± 0,00
5. měření	8,67 ± 0,05	16,05 ± 4,01	0,00 ± 0,00
6. měření	8,58 ± 0,05	14,25 ± 3,77	0,00 ± 0,00
7. měření	8,65 ± 0,05	15,05 ± 3,88	0,00 ± 0,00
8. měření	8,83 ± 0,05	17,75 ± 4,21	0,00 ± 0,00
9. měření	8,74 ± 0,05	18,05 ± 4,25	0,00 ± 0,00

**Tabulka 45:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	42,68 ± 0,12	45,25 ± 6,72	0,00 ± 0,00
2. měření	43,91 ± 0,12	35,60 ± 5,97	0,00 ± 0,00
3. měření	45,75 ± 0,12	44,10 ± 6,64	0,00 ± 0,00
4. měření	48,52 ± 0,13	58,95 ± 7,68	0,00 ± 0,00
5. měření	46,66 ± 0,14	53,60 ± 7,32	0,00 ± 0,00
6. měření	46,36 ± 0,12	54,40 ± 7,38	0,00 ± 0,00
7. měření	52,01 ± 0,13	64,40 ± 8,02	0,00 ± 0,00
8. měření	52,55 ± 0,13	64,00 ± 8,00	0,00 ± 0,00
9. měření	52,69 ± 0,14	52,05 ± 7,21	0,00 ± 0,00

## B.7 Bórové detektory s časovým krokem 100 ms & AmBe zdroj

**Tabulka 46:** Hodnoty četností impulsů pro detektor B5 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	62,98 ± 0,14	125,65 ± 11,21	0,10 ± 0,01
2. měření	62,80 ± 0,15	143,65 ± 11,99	0,12 ± 0,01
3. měření	62,80 ± 0,14	138,25 ± 11,76	0,10 ± 0,01
4. měření	62,55 ± 0,14	125,95 ± 11,40	0,12 ± 0,01
5. měření	62,85 ± 0,15	132,00 ± 11,49	0,12 ± 0,01
6. měření	62,66 ± 0,15	129,25 ± 11,37	0,12 ± 0,01
4. měření	62,74 ± 0,15	135,10 ± 11,62	0,11 ± 0,01
5. měření	62,61 ± 0,15	133,15 ± 11,54	0,12 ± 0,01
6. měření	62,75 ± 0,15	131,15 ± 11,45	0,12 ± 0,01

**Tabulka 47:** Hodnoty četností impulsů pro detektor F3 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	30,28 ± 0,10	59,80 ± 7,73	0,06 ± 0,01
2. měření	30,18 ± 0,10	66,20 ± 8,13	0,04 ± 0,01
3. měření	30,06 ± 0,10	61,95 ± 7,87	0,05 ± 0,01
4. měření	30,16 ± 0,10	63,80 ± 7,99	0,06 ± 0,01
5. měření	30,38 ± 0,10	67,20 ± 8,20	0,08 ± 0,01
6. měření	30,27 ± 0,10	63,90 ± 7,99	0,08 ± 0,01
7. měření	30,29 ± 0,10	65,65 ± 8,10	0,08 ± 0,01
8. měření	30,35 ± 0,10	70,85 ± 8,42	0,08 ± 0,01
9. měření	30,34 ± 0,10	59,20 ± 7,69	0,06 ± 0,01

## B.8 Detektory PMV s časovým krokem 100 ms & AmBe zdroj

**Tabulka 48:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV1 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	10,03 ± 0,06	16,70 ± 4,09	0,00 ± 0,00
2. měření	9,88 ± 0,06	15,90 ± 3,99	0,00 ± 0,00
3. měření	9,90 ± 0,06	15,05 ± 3,88	0,00 ± 0,00
4. měření	9,87 ± 0,06	16,80 ± 4,10	0,00 ± 0,00
5. měření	10,01 ± 0,06	16,40 ± 4,05	0,00 ± 0,00
6. měření	10,01 ± 0,06	14,45 ± 3,80	0,00 ± 0,00
7. měření	9,95 ± 0,06	17,15 ± 4,14	0,00 ± 0,00
8. měření	9,90 ± 0,06	16,90 ± 4,11	0,00 ± 0,00
9. měření	9,96 ± 0,06	15,00 ± 3,87	0,00 ± 0,00

**Tabulka 49:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV2 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	4,32 ± 0,04	6,00 ± 2,45	0,00 ± 0,00
2. měření	4,29 ± 0,04	4,65 ± 2,16	0,00 ± 0,00
3. měření	4,26 ± 0,04	6,60 ± 2,57	0,00 ± 0,00
4. měření	4,32 ± 0,04	6,70 ± 2,59	0,00 ± 0,00
5. měření	4,24 ± 0,04	6,95 ± 2,64	0,00 ± 0,00
6. měření	4,34 ± 0,04	5,50 ± 2,35	0,00 ± 0,00
7. měření	4,27 ± 0,04	5,90 ± 2,43	0,00 ± 0,00
8. měření	4,36 ± 0,04	6,70 ± 2,59	0,00 ± 0,00
9. měření	4,28 ± 0,04	7,90 ± 2,81	0,00 ± 0,00

**Tabulka 50:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV3 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	7,14 ± 0,05	11,10 ± 3,33	0,00 ± 0,00
2. měření	7,08 ± 0,05	11,40 ± 3,38	0,00 ± 0,00
3. měření	7,05 ± 0,05	12,05 ± 3,47	0,00 ± 0,00
4. měření	7,12 ± 0,05	12,30 ± 3,51	0,00 ± 0,00
5. měření	7,01 ± 0,05	12,10 ± 3,48	0,00 ± 0,00
6. měření	7,05 ± 0,05	11,10 ± 3,33	0,00 ± 0,00
7. měření	6,88 ± 0,05	11,90 ± 3,45	0,00 ± 0,00
8. měření	7,20 ± 0,05	13,55 ± 3,68	0,00 ± 0,00
9. měření	7,13 ± 0,05	11,50 ± 3,39	0,00 ± 0,00

**Tabulka 51:** Hodnoty četností impulsů pro detektor PMV4 - AmBe

	$n_0$ (100 ms <sup>-1</sup> )	$\int n(t)$ (-)	$n_B$ (100 ms <sup>-1</sup> )
1. měření	18,72 ± 0,08	32,35 ± 5,69	0,00 ± 0,00
2. měření	17,95 ± 0,08	38,00 ± 6,16	0,00 ± 0,00
3. měření	18,07 ± 0,08	37,95 ± 6,16	0,00 ± 0,00
4. měření	16,35 ± 0,08	33,30 ± 5,77	0,00 ± 0,00
5. měření	16,52 ± 0,08	32,45 ± 5,70	0,00 ± 0,00
6. měření	16,70 ± 0,08	32,25 ± 5,68	0,00 ± 0,00
7. měření	16,65 ± 0,08	29,65 ± 5,44	0,00 ± 0,00
8. měření	16,77 ± 0,08	35,35 ± 5,94	0,00 ± 0,00
9. měření	16,98 ± 0,08	32,25 ± 5,68	0,00 ± 0,00