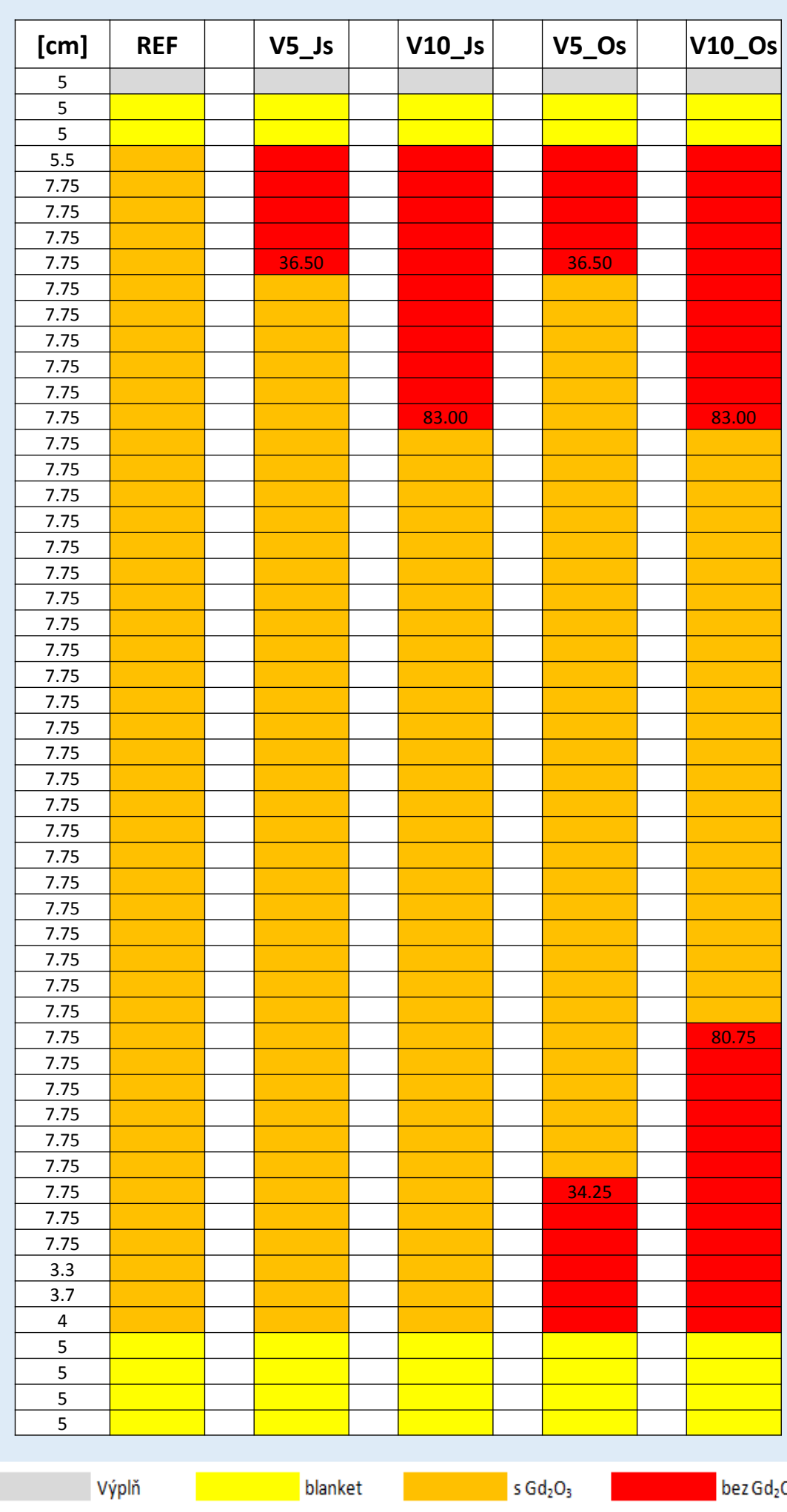


1. ÚVOD



Výzkumná práce reaguje na stále se zvyšující nároky na efektivní využití jaderného paliva. Prověřuje možnost axiální profilace palivového proutku (PP) obsahující vyhořívající absorbátor Gd_2O_3 (tveg).

Detailně analyzuje vliv zkrácení (jednostranného- J i oboustranného- O) palivového proutku s obsahem Gd_2O_3 na rozložení výkonu na úrovni palivových souborů i palivových proutků, na průběh lineárního výkonu, lokálního vyhoření palivového proutku v průběhu kampaně i na stabilitu během xenonových oscilací.

V rámci studie byla prověřena obsáhlá množina variant s různým axiálním zkrácením paliva s obsahem Gd_2O_3 a nahrazením částí paliva bez Gd_2O_3 . V práci jsou představeny pouze vybrané varianty pro obě zkrácení.

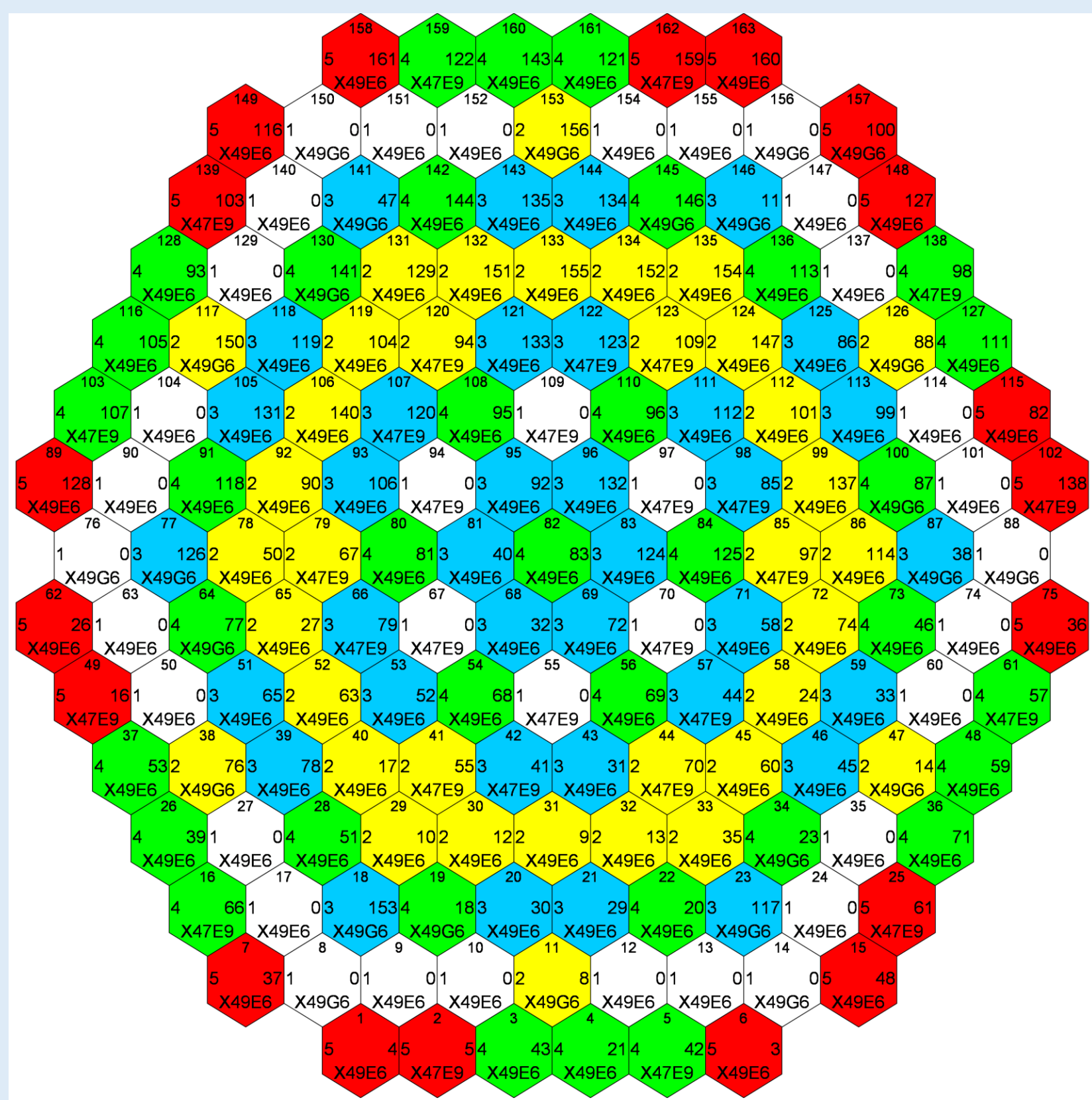
Tabulka 1. Modely axiální profilace tvegu, hodnoty jsou uvedeny v [cm]. Nerovnoměrné axiální dělení odpovídá makro-kódu MOBY-DICK-1000 pro směsnou zónu, REF – referenční varianta bez axiální profilace.

2. REFERENČNÍ PALIVOVÁ VSÁZKA

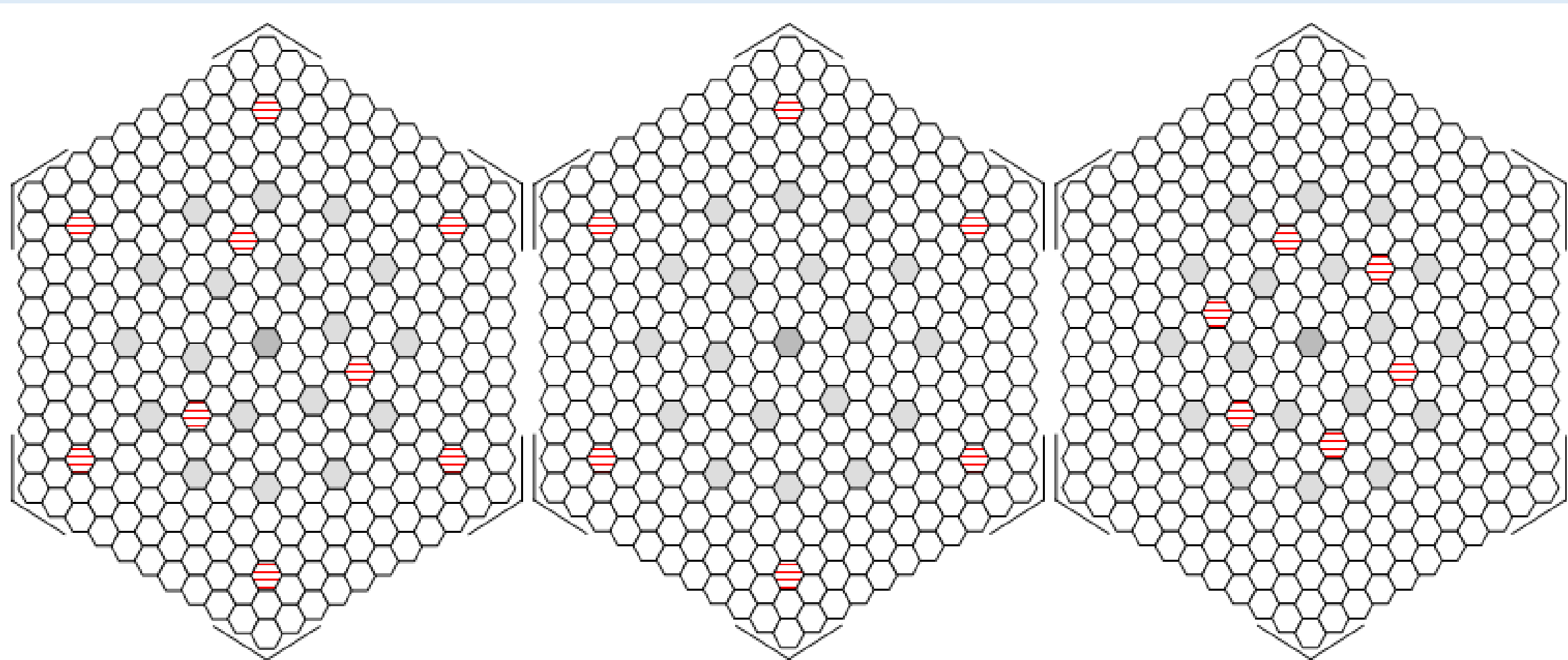
Výpočet byl proveden pomocí makro-kódu MOBY-DICK-1000 poskytnutý autorskou organizací ŠKODA JS a.s. Pro ohodnocení vlivu zkrácení tvegu byla použita testovací referenční vsázka s modelovou překládkou A-A pětiletého cyklu viz kartogram na Obrázku 1. Na Obrázku 2 je pak uvedena radiální profilace použitých palivových souborů X47E9, X49G6 a X49E6.

Metodický postup spočíval v docílení rovnovážné vsázky se standardním palivem, posléze se do následující vsázky s čerstvými soubory zaveze palivo s axiálně profilovanými proutky a opět se docílil rovnovážného stavu, ale již s modifikovanými palivovými soubory. Výsledná vsázka je srovnána s referenční variantou bez axiální profilace PP.

Elementy zkrácení palivové části obsahující Gd_2O_3 je určeno nepravidelným axiálním dělením modelu pro palivové soubory v programu MOBY-DICK-1000 (viz Tabulka 1).



Obrázek 1. Kartogram modelové kampaně.



Obrázek 2. Radiální profilace PS: zleva: X47E9, X49G6, X49E6.

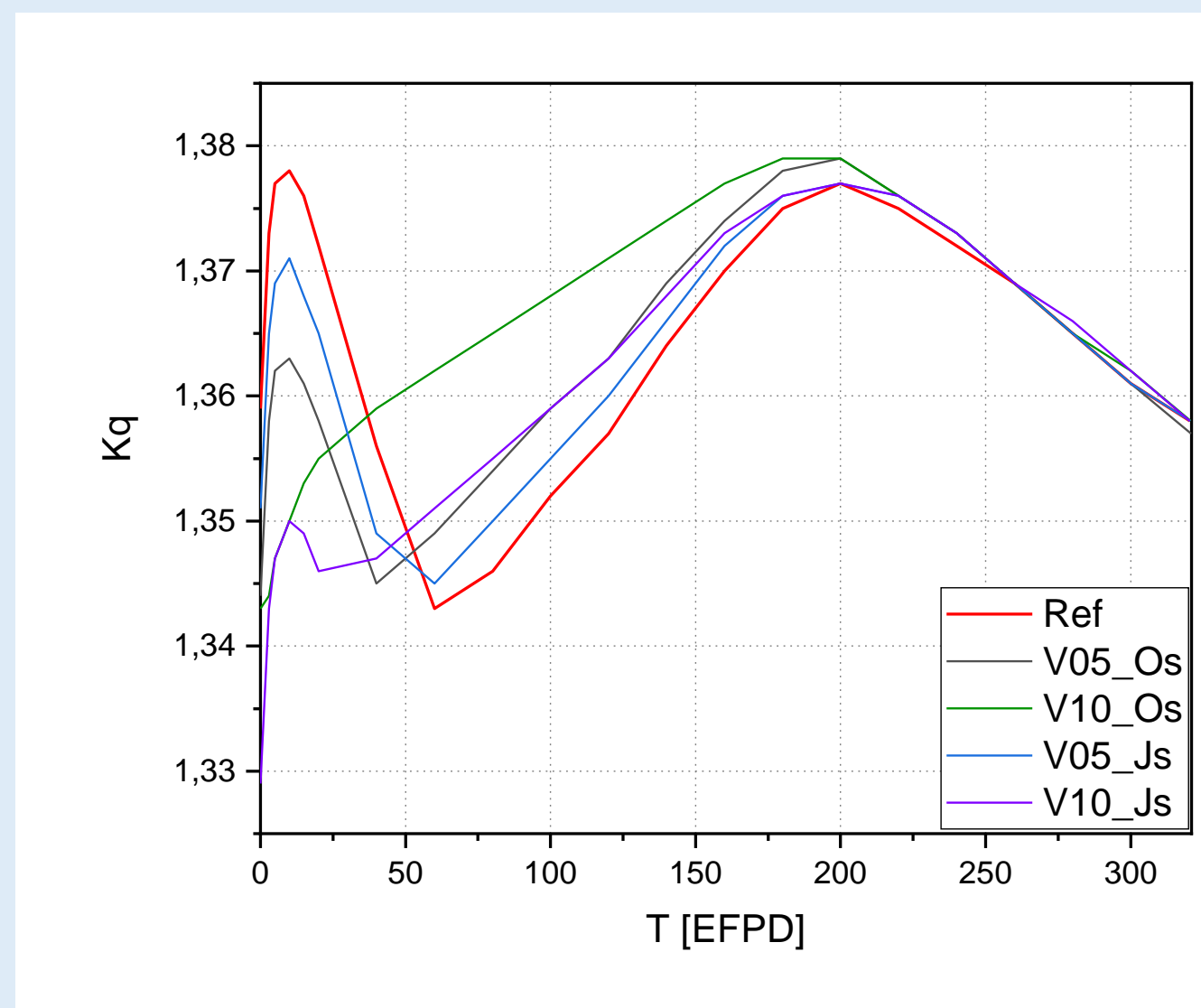
Tabulka 2. Popis použitých palivových souborů.

Typ PS	Průměrné obohacení paliva bez blanketu [%w]	Počet PP bez Gd VA / obohacení [%w]	Počet PP s Gd VA / obohacení [%w] / Gd_2O_3 obsah [%w]
X47E9	4,67	303 / 4,70	9 / 3,6 / 5
X49G6	4,93	306 / 4,95	6 / 3,6 / 5
X49E6	4,93	306 / 4,95	6 / 3,6 / 5

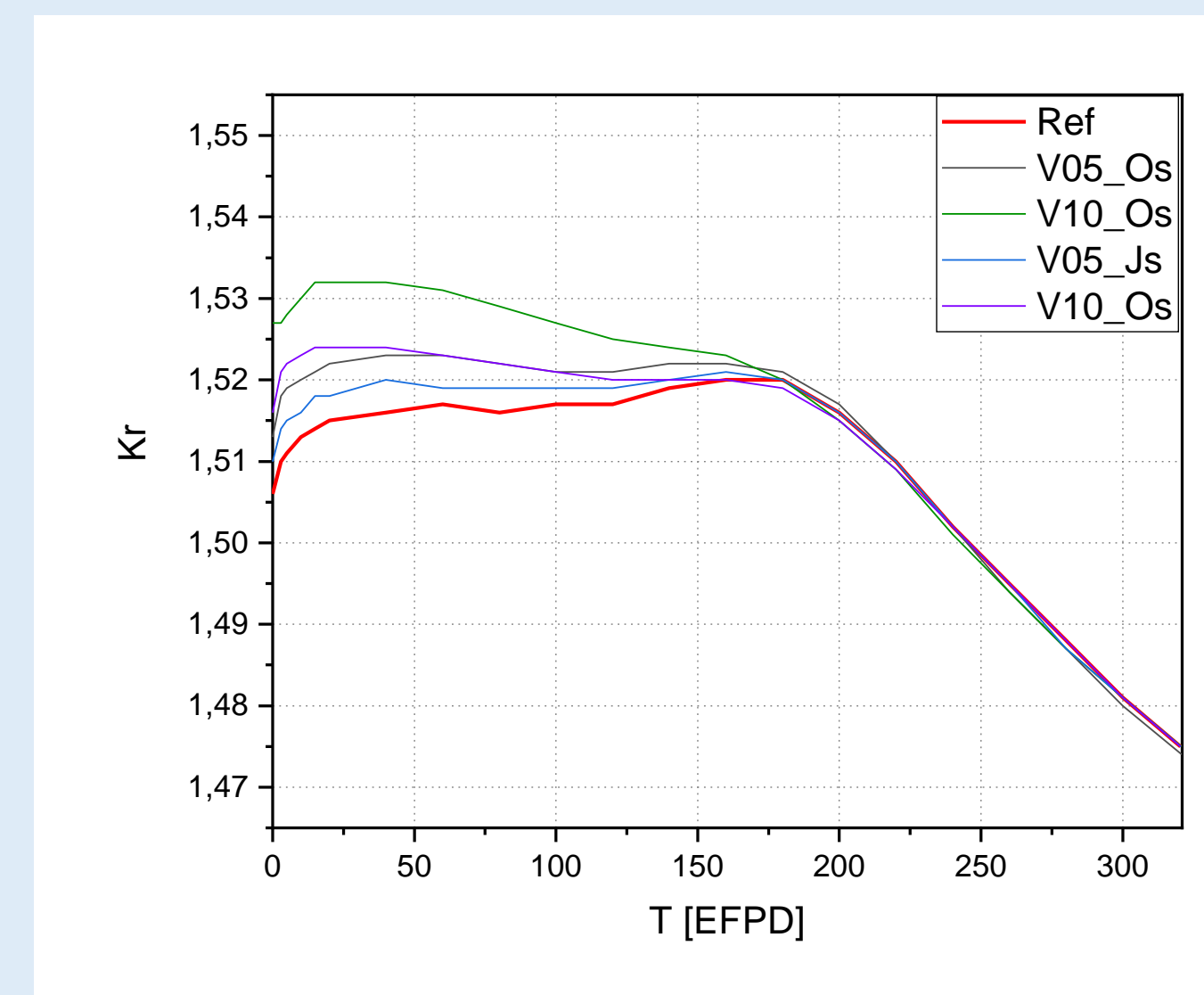
3. VÝSLEDKY

ROZLOŽENÍ VÝKONU

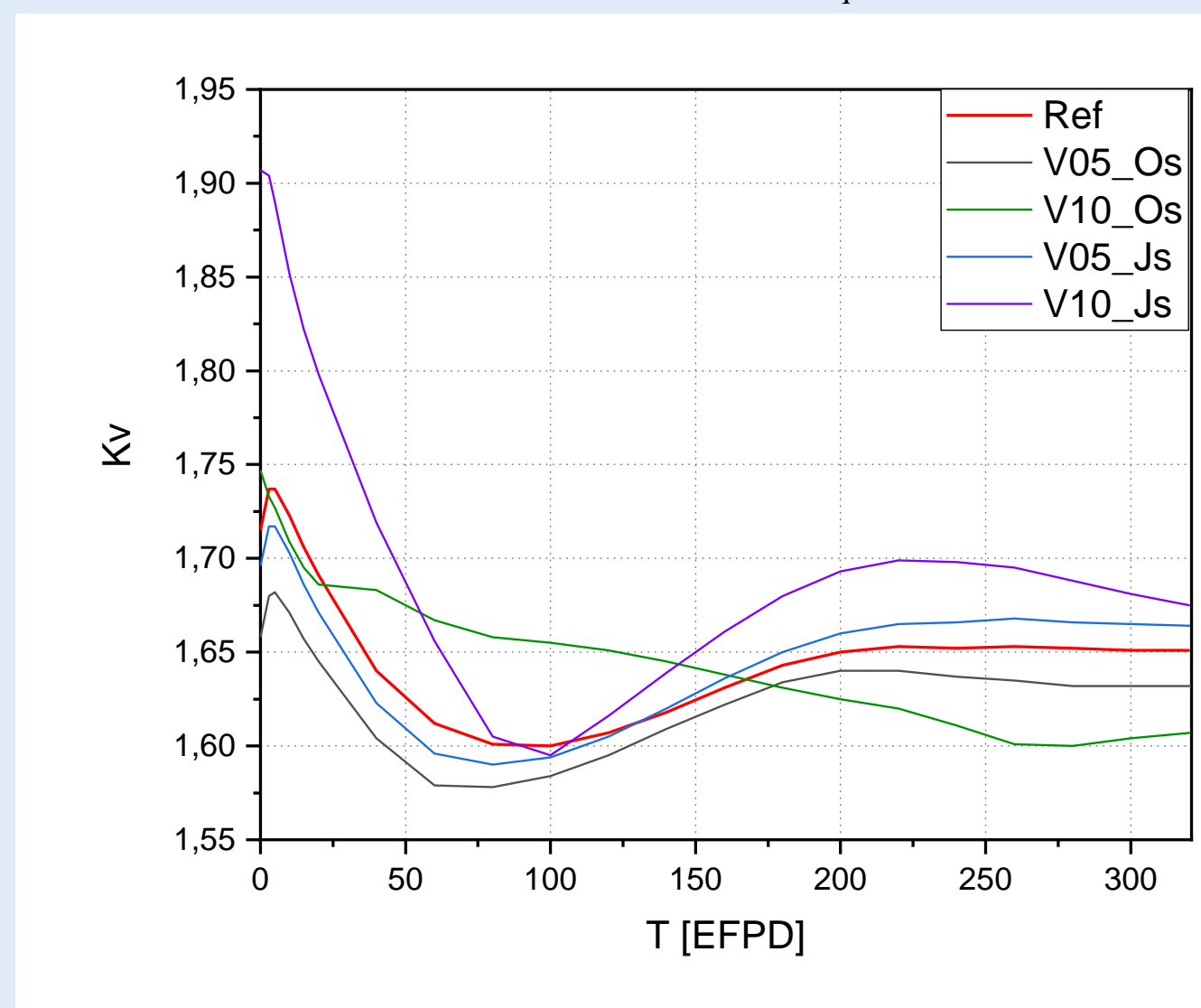
Kontrola rozložení výkonu v aktivní zóně (AZ) je jeden z klíčových parametrů bezpečnosti jaderného reaktoru. Obecně platí vztah typu: $K_i \leq K_i^{lim}$ kde K_i je některý z bezrozměrných koeficientů výkonového nevyrovnání v AZ K_0, K_r, K_q, K_v se zahrnutím všech neurčitostí a K_i^{lim} je odpovídající bezrozměrná hodnota limitu, resp. bezpečnostní limit. Příkladem mohou být kritéria RCHA limitující výkon palivového souboru K_q nebo RCDH limitující výkon palivového proutku K_r . V obecnějším přístupu lze porovnávání výše zmíněných koeficientů převést pro jednotlivá kritéria na stanovení rezervy do příslušného limitu a splnění těchto kritérií prověřovat splněním podmínky na nezápornost odpovídající rezervy. Kontrola rozložení výkonu může být též prováděna na úrovni BE hodnot, kdy jsou porovnávány přímo výpočtové hodnoty s bezpečnostním limitem sníženým o příslušný celkový faktor neurčitosti pro daný koeficient. Tento způsob kontroly je však možný pouze za předpokladu, že neurčitosti použitého výpočtového kódu nejsou větší než neurčitosti použité při odvození výpočtových limitů. Níže uvedené grafy zobrazují průběh základních koeficientů nevyrovnání pro vybrané varianty.



Obrázek 3. Průběh K_q .



Obrázek 4. Průběh K_r .



Obrázek 5. Průběh K_v .

$K_q^{BE} = \frac{N_{PS}^{BE}}{N_{PS}^{stf}}$ koeficient nerovnoměrnosti rozložení výkonů palivových souborů
 $K_r^{BE} = \frac{N_{PS}^{BE}}{N_{PS}^{stf}}$ koeficient nerovnoměrnosti v rozložení výkonu po proutcích v aktivní zóně
 $K_v^{BE} = \frac{Q_{PS}^{BE}}{Q_{PS}^{stf}}$ koeficient nerovnoměrnosti nodálních výkonů palivových souborů (středních hodnot výkonů v axiálních úsecích/nódech) po celém objemu aktivní zóny)

Zkr.	Definice
EOC	konec provozu palivové vsázky
MTC	teplotní koeficient reaktivity chladiva
Cb	koncentrace kyseliny borité v chladivu
AO	axiální offset
FdH	koeficient nerovnoměrnosti v rozložení výkonu po proutcích K_v v aktivní zóně s uvážením celkového inženýrského faktoru
Fq	koeficient nerovnoměrnosti v rozložení výkonu po proutcích K_v v aktivní zóně s uvážením celkového inženýrského faktoru
RC1	kritérium omezující maximální hodnotu lineárního výkonu PP v závislosti na středním vyhoření PP v režimu normálního provozu
RCQ	kritérium na omezení maximální hodnoty lineárního výkonu PP (bez a s Gd_2O_3) v závislosti na axiální poloze v aktivní zóně

Varianta	Ref	5 Os	Δ	10 Os	Δ	5 Js	Δ	10 Js	Δ
EOC [EFPD]	320,42	320,81	0,39	320,67	0,25	320,58	0,16	320,45	0,03
MTC [1/°C]	-7,93	-7,79	0,14	-7,21	0,72	-7,83	0,1	-7,32	0,61
Cb [g/kg]	12,99	13,13	0,14	13,54	0,55	13,13	0,14	13,52	0,53
AO [%]	3,4	3,8	0,4	4,32	0,9	6,4	3	14,3	10,9
K_0 [-]	1,378	1,379	0,001	1,379	0,001	1,377	-0,001	1,377	-0,001
K_r [-]	1,52	1,523	0,003	1,532	0,012	1,521	0,001	1,524	0,004
K_v [-]	1,737	1,682	-0,055	1,747	0,01	1,717	-0,02	1,907	0,17
K_q [-]	1,923	1,855	-0,068	2,03	0,107	1,899	-0,024	2,155	0,232
FdH tve[-]	1,681	1,693	0,012	1,732	0,051	1,686	0,005	1,707	0,026
Fq tve[-]	1,389	1,399	0,01	1,399	0,01	1,394	0,005	1,394	0,005
Fq tve [-]	2,249	2,158	-0,091	2,318	0,069	2,206	-0,043	2,461	0,212
Fq tve [-]	1,764	1,736	-0,028	1,767	0,003	1,768	0,004	1,954	0,19
Rezerva RC1 tve [W/cm]	29,5	33,3	3,8	37,2	7,7	27,4	-0,1	22,7	-6,8
Rezerva RC1 tve [W/cm]	72,5	73,9	1,4	71,8	-0,7	70	-2,5	42,4	-30,1
Rezerva RCQ tve [W/cm]	54	54,8	0,8	13,4	-40,6	46,5	-7,5	-25,4	-79,4
Rezerva RCQ tve [W/cm]	73,3	77,8	4,5	72,8	-0,5	72,6	-0,7	42,4	-30,9

Tabulka 3. Maxima vybraných koeficientů.

4. ZÁVĚR

Byla provedena citlivostní studie vlivu – oboustranného i jednostranného - zkrácení části palivového proutku obsahující příměs Gd_2O_3 na vybrané n-f charakteristiky a oscilace AO modelové rovnovážné vsázky pro palivo typu TVSA-T mod.2.

Mírné oboustranné zkrácení gadoliniové části tvegu symetricky z obou stran přibližně o 34 cm může vést k příznivějšímu rozložení lineárního výkonu a prodloužení palivové vsázky přibližně o 0,39EFPD bez zásadního negativního vlivu na zkoumané n-f charakteristiky. Při jednostranném zkrácením gadoliniové části dochází k obdobnému ovlivnění parametrů, ačkoli v menší míře.

Avšak nevhodné (oboustranné i jednostranné) zkrácení gadoliniové části může vést k výraznému snížení rezerv či dokonce jejich překročení!

5. ZDROJE

[1] Jiří Závorka, Jan Tímr, Lenka Stehlíková, Daniel Sprinzl: Citlivostní analýza axiální profilace palivového proutku s Gd pro VVER-1000 pro palivo TVSA-T MOD.2. Zpráva Ae 19458/Dok, Rev. 1, ŠKODA JS a.s., Plzeň, 2020.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory spolupráce mezi Západočeskou univerzitou v Plzni a společností ŠKODA JS a.s.