



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČTY VLASTNÍCH ČÍSEL BOLTZMANNOVY ROVNICE AKTIVNÍCH ZÓN JADERNÝCH REAKTORŮ, BAZÉNŮ SKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA A SKLADOVACÍCH KONTEJNERŮ

BOLTZMANN EQUATION EIGENVALUE CALCULATION FOR NUCLEAR REACTOR CORES,
SPENT FUEL POOLS, AND STORAGE CASKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Bílý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Lukáš Bílý

ID: 211445

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Výpočty vlastních čísel Boltzmannovy rovnice aktivních zón jaderných reaktorů, bazénů skladování vyhořelého jaderného paliva a skladovacích kontejnerů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s deterministickými a statistickými výpočty reaktorových mříží.
2. Seznamte se s International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments.
3. S pomocí výpočetního nástroje SCALE namodelujte základní mříž vybraného výzkumné reaktoru a srovnajte své výsledky s experimentem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. B. T. Rearden and M.A. Jessee, Eds., SCALE Code System, version 6.2.3, Oak Ridge National Laboratory, TN, 2018
2. Mark D. DeHart a kolektiv, Nuclear Energy Agency a Idaho National Laboratory, International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments, Paris, 2021
3. John R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering, 3rd Ed., Prentice Hall, 2001
4. Elmer E. Lewis, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics, Academic Press, Amsterdam, 2008
5. W. M. Stacey, Nuclear Reactor Physics, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, 2007

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V mojí diplomové se zabývám výpočetním nástrojem SCALE, který využívá výpočetní kódy k modelování a počítání kritických hodnot reaktorů. Před praktickou částí je teoretická část zaměřená na reaktorovou fyziku a výpočetní kódy. Vybraným výpočetním kódem je kód KENO V.a, který využívá metodu Monte Carlo k výpočtu efektivního koeficientu násobení. Výpočetní kód je využit k modelování vybraných benchmarků z databáze ICSBEP. Na konci diplomové práce bude stanovena průměrná procentuální odchylka.

Klíčová slova

Výpočetní kód; validace; SCALE; KENO; ICSBEP; benchmark; koeficient násobení

Abstract

In my thesis, I focus on the computational tool SCALE, which utilizes computational codes for modeling and calculating critical values of reactors. Prior to the practical section, there is a theoretical part that focuses on reactor physics and computational codes. The selected computational code is the KENO V.a code, which employs the Monte Carlo method for calculating the effective multiplication coefficient. The computational code is used for modeling selected benchmarks from the ICSBEP database. At the end of the thesis, the average percentage deviation will be determined.

Keywords

Computational code; validation; SCALE; KENO; ICSBEP; benchmark; multiplication factor

Bibliografická citace

BÍLÝ, Lukáš. *Výpočty vlastních čísel Boltzmannovy rovnice aktivních zón jaderných reaktorů, bazéni skladování vyhořelého jaderného paliva a skladovacích kontejnerů*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151306>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Lukáš Bílý*

VUT ID studenta: *211445*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *Výpočty vlastních čísel Boltzmannovy rovnice aktivních zón jaderných reaktorů, bazénu skladování vyhořelého jaderného paliva a skladovacích kontejnerů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. za odborné vedení a užitečné rady, díky kterým se mi povedlo práci zvládnout. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za psychickou podporu během studia.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
1. FYZIKA JADERNÉHO REAKTORU.....	12
1.1 VAZEBNÁ ENERGIE.....	12
1.2 JADERNÁ REAKCE	13
1.2.1 Fúzní reakce	13
1.2.2 Štěpná reakce.....	13
1.3 NEUTRONOVÁ INTERAKCE	14
1.3.1 Účinné průřezy	15
1.4 EFEKTIVNÍ KOEFICIENT NÁSOBENÍ	16
2. VÝPOČETNÍ METODY	17
2.1 DETERMINISTICKÉ METODY	17
2.1.1 Diskretizace	18
2.1.2 Deterministické výpočetní kódy.....	18
2.2 STATICKÉ METODY (MONTE CARLO).....	18
2.2.1 Statické výpočetní kódy (Monte Carlo).....	19
3. SCALE 6.2.....	20
3.1 GRAFICKÉ UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ – FULCRUM	20
3.2 KENO V.A	21
3.2.1 Vstupní soubor.....	21
3.2.2 Vzorový příklad	22
3.2.3 Výstupní soubor.....	30
4. INTERNATIONAL CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EVALUATION PROJECT	31
4.1 USPOŘÁDÁNÍ	31
4.2 VYBRANÉ EXPERIMENTY	32
4.2.1 LEU-COMP-THERM-020.....	32
4.2.2 LEU-COMP-THERM-021	37
4.2.3 LEU-COMP-THERM-030.....	42
4.2.4 LEU-COMP-THERM-053	47
4.2.5 LEU-COMP-THERM-061	52
4.2.6 LEU-COMP-THERM-064	60
4.2.7 LEU-COMP-THERM-070.....	65
4.2.8 LEU-COMP-THERM-075.....	70
4.2.9 LEU-COMP-THERM-085.....	76
4.2.10 LEU-COMP-THERM-094.....	81
5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	87
6. ZÁVĚR.....	93
LITERATURA	94
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	95
SEZNAM PŘÍLOH.....	98

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 Závislost vazebné energie na nukleon [1].....	12
Obr. č. 2: Štěpná reakce uranu-235 [1].....	13
Obr. č. 3: Neutronová bilance v sestavě tepelného štěpení neutronů. [3].....	16
Obr. č. 4: Šablona výpočetního kódu KENO V.a	22
Obr. č. 5: Vzorová nádrž 3D model bez reflektoru.....	23
Obr. č. 6: Vzorová nádrž, pohled shora	23
Obr. č. 7: Vzorová nádrž, pohled ze strany	24
Obr. č. 8: Definování složení.....	24
Obr. č. 9: Blok složení	25
Obr. č. 10: KENO V.a válec.....	26
Obr. č. 11: KENO V.a kvádr.....	27
Obr. č. 12: Mříže vzorového příkladu.....	28
Obr. č. 13: Vkládání mříže	28
Obr. č. 14: KENO V.a mříž.....	29
Obr. č. 15: KENO V.a <i>global unit</i>	29
Obr. č. 16: KENO V.a výstupní soubor.....	30
Obr. č. 17: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT020 [9]	33
Obr. č. 18: Schéma uložení palivového proutku do aktivní zóny LCT020 [9]	34
Obr. č. 19: Rozměry palivového proutku LCT020 [9]	34
Obr. č. 20: Mapa 4. kritické konfigurace LCT020 [9].....	35
Obr. č. 21: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT020.....	36
Obr. č. 22: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT020.....	36
Obr. č. 23: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT021 [9]	38
Obr. č. 24: Schéma uložení palivového proutku do aktivní zóny LCT021 [9]	39
Obr. č. 25: Rozměry palivového proutku LCT021 [9]	39
Obr. č. 26: Mapa 4. kritické konfigurace LCT021 [9].....	40
Obr. č. 27: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT021	41
Obr. č. 28: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT021	41
Obr. č. 29: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT030 [9]	43
Obr. č. 30: Rozměry palivového proutku LCT030 [9]	44
Obr. č. 31: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT030 [9].....	45
Obr. č. 32: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT030.....	46
Obr. č. 33: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT030.....	46
Obr. č. 34: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT053 [9]	48
Obr. č. 35: Rozměry palivového proutku LCT053 [9]	49
Obr. č. 36: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT053 [9].....	50
Obr. č. 37: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT053	51
Obr. č. 38: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT053.....	51
Obr. č. 39: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT061 [9]	53
Obr. č. 40: Rozměry palivového proutku LCT061 [9]	54
Obr. č. 41: Rozměry absorbérů a displaceru LCT061 [9]	54
Obr. č. 42: Horizontální řez konfigurace 1, 3, 5 a 7 - LCT061 [9].....	55
Obr. č. 43: Horizontální řez konfigurace 2, 4, 6 a 8 - LCT061 [9].....	56
Obr. č. 44: Horizontální řez konfigurace 9 - LCT061 [9].....	57
Obr. č. 45: Horizontální řez konfigurace 10 - LCT061 [9]	58
Obr. č. 46: KENO3D modely pohled shora LCT061	59
Obr. č. 47: KENO3D modely pohled ze strany LCT061.....	59
Obr. č. 48: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT064 [9]	61

Obr. č. 49: Rozměry palivového proutku LCT064 [9]	62
Obr. č. 50: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT064 [9].....	63
Obr. č. 51: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT064.....	64
Obr. č. 52: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT064.....	64
Obr. č. 53: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT070 [9]	66
Obr. č. 54: Rozměry palivového proutku LCT070 [9]	67
Obr. č. 55: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT070 [9].....	68
Obr. č. 56: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT070.....	69
Obr. č. 57: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT070.....	69
Obr. č. 58: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT075 [9]	71
Obr. č. 59: Rozměry palivového proutku a B ₄ C absorbéru LCT075 [9].....	72
Obr. č. 60: Horizontální řez konfigurace 1 a 4 - LCT075 [9].....	73
Obr. č. 61: Horizontální řez konfigurace 2 a 5 - LCT075 [9].....	73
Obr. č. 62: Horizontální řez konfigurace 3 a 6 - LCT075 [9].....	74
Obr. č. 63: KENO3D model pohled shora konfigurace 1, 2 a 3 - LCT075.....	75
Obr. č. 64: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 1, 2 a 3 - LCT075.....	75
Obr. č. 65: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT085 [9]	77
Obr. č. 66: Rozměry palivového proutku LCT085 [9]	78
Obr. č. 67: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT085 [9].....	79
Obr. č. 68: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT085.....	80
Obr. č. 69: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT085.....	80
Obr. č. 70: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT094 [9]	82
Obr. č. 71: Rozměry palivových prouků (vlevo 6,5 % a vpravo 4,4 %) LCT094 [9]	83
Obr. č. 72: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT094 [9].....	84
Obr. č. 73: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT094.....	85
Obr. č. 74: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT094.....	85
Obr. č. 75: Grafické zobrazení odchylek δk_{eff}	92

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Seznam datových bloků [7]	21
Tab. 2: Knihovny programu SCALE [8]	22
Tab. 3: Kritické konfigurace LCT020 [9].....	35
Tab. 4: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT020 [9].....	37
Tab. 5: Kritické konfigurace LCT021 [9].....	40
Tab. 6: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT021 [9].....	42
Tab. 7: Kritické konfigurace LCT030 [9].....	45
Tab. 8: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT030 [9].....	47
Tab. 9: Kritické konfigurace LCT053 [9].....	50
Tab. 10: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT053 [9].....	52
Tab. 11: Kritické konfigurace LCT061 [9].....	58
Tab. 12: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT061 [9].....	60
Tab. 13: Kritické konfigurace LCT064 [9].....	63
Tab. 14: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT064 [9].....	65
Tab. 15: Kritické konfigurace LCT070 [9].....	68
Tab. 16: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT070 [9].....	70
Tab. 17: Kritické konfigurace LCT075 [9].....	74
Tab. 18: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT075 [9].....	75
Tab. 19: Kritické konfigurace LCT085 [9].....	79
Tab. 20: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT085 [9].....	81
Tab. 21: Kritické konfigurace LCT094 [9].....	84
Tab. 22: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT094 [9].....	86
Tab. 23: Porovnání vypočtené hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-020.....	87
Tab. 24: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-021.....	87
Tab. 25: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-030.....	88
Tab. 26: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-053.....	88
Tab. 27: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-061.....	89
Tab. 28: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-064.....	89
Tab. 29: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-070.....	90
Tab. 30: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-075.....	90
Tab. 31: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-085.....	91
Tab. 32: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – LCT-094.....	91

ÚVOD

Výpočty vlastních čísel Boltzmannovy rovnice mají významný vliv na analýzu a studium fyzikálních procesů v aktivních zónách jaderných reaktorů, bazénů skladování vyhořelého jaderného paliva a skladovacích kontejnerů. Boltzmannova rovnice je základním matematickým nástrojem používaným k popisu chování neutronů v těchto prostředích. Výpočet vlastních čísel této rovnice umožňuje získat informace o rozložení neutronů, jejich energetickém spektru a průchodnosti prostředím.

Jaderné reaktory jsou zdrojem výroby elektrické energie prostřednictvím jaderného štěpení, při kterém se uvolňuje velké množství energie. Pro správné fungování a řízení těchto reaktorů je nezbytné znát chování neutronů uvnitř aktivní zóny. Výpočet vlastních čísel Boltzmannovy rovnice umožňuje předpovědět, jak se neutrony budou šířit, jak se budou množit nebo zmenšovat a jaký bude jejich vliv na štěpnou reakci. Tyto informace jsou klíčové pro návrh, optimalizaci a bezpečnost jaderných reaktorů.

Pro provádění výpočtů s Boltzmannovou rovnicí se používají specializované výpočetní kódy. Nejpoužívanější výpočetní kódy jsou MCNP (Monte Carlo N-Particle), SCALE (Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation) a Serpent. Jsou schopny simulačně popsat chování neutronů v aktivních zónách jaderných reaktorů, bazénech skladování vyhořelého jaderného paliva i skladovacích kontejnerech. Tyto kódy se vyznačují vysokou přesností a flexibilitou při modelování různých geometrií a materiálů.

International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project – ICSBEP je mezinárodní projekt zaměřený na sběr, hodnocení a sdílení kritických srovnávacích dat. Cílem projektu je poskytnout vědecké a technické informace pro analýzu kritičnosti (kritického stavu) jaderných materiálů a konstrukcí. Obsahuje velké množství experimentálních dat rozdělených do několika svazků. Data se následně využívají k validaci výpočetních kódů. Experimentální data slouží jako referenční body k porovnání s výpočty, což pomáhá ke zlepšení přesnosti a spolehlivosti výpočtů v oblasti kritické bezpečnosti.

Cílem práce je seznámení se s projektem ICSBEP. Dále pak výběr určitého množství benchmarků k modelování a vypočítání kritických hodnot. K modelování a počítání hodnot bude využit výpočetní nástroj SCALE 6.2.4. Pomocí výpočtů bude provedena validace.

1. FYZIKA JADERNÉHO REAKTORU

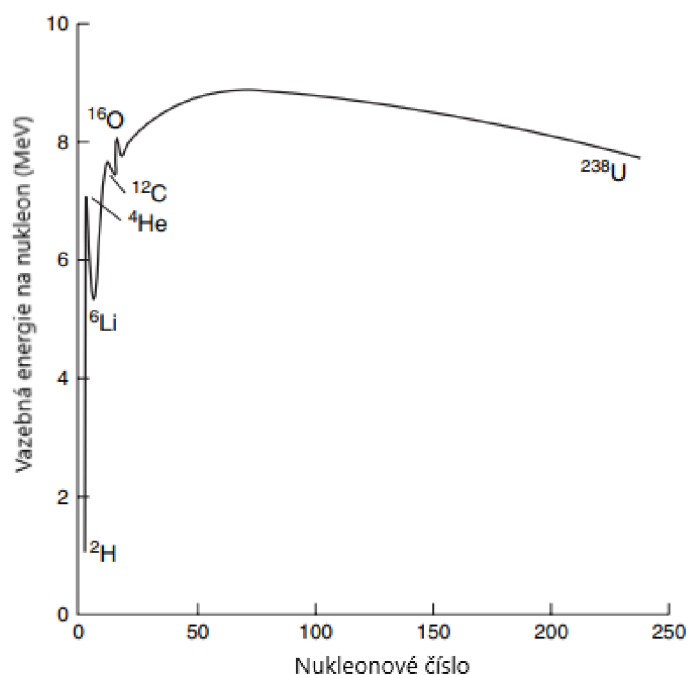
Fyzika jaderného reaktoru je oblast fyziky, která se zabývá výzkumem jaderných reaktorů a jejich chováním. Hlavním cílem fyziky jaderných reaktorů je správně porozumět fyzikálním procesům odehrávající se v jaderných reaktorech a následně navrhnout efektivní a bezpečné jaderné reaktory. Zabývá se studiem konstrukcí jaderných reaktorů, vlastností jaderných paliv, transportem neutronů v reaktoru, tepelným chováním a chladicími systémy, analýzou spolehlivosti a bezpečnosti reaktoru a dalšími faktory, které ovlivňují chod jaderného reaktoru.

1.1 Vazebná energie

Vazebná energie je množství energie potřebné k rozložení atomového jádra na jeho nukleony a ke vzájemnému oddělení. Zároveň je tato energie ekvivalentní energii, která se uvolní při vzniku jádra z nukleonů. Vazebná energie se obvykle vyjadřuje v jednotkách elektronvoltů (eV) nebo milionů elektronvoltů (MeV).

Význam vazebné energie spočívá v jejím vztahu k stabilitě jádra. Vyšší hodnota vazebné energie naznačuje, že jádro je stabilnější a má menší pravděpodobnost rozpadu. Naopak, nižší hodnota vazebné energie signalizuje, že jádro je méně stabilní a má vyšší pravděpodobnost rozpadu.

Vazebná energie je důležitým faktorem při studiu jaderných reakcí a stability jader. Pomáhá nám porozumět, jak se energie ukládá a uvolňuje v jádrech a jaké faktory ovlivňují jejich stabilitu. Znalost vazebné energie nám umožňuje předpovídat stabilitu různých jader a porozumět procesům, které se v jádrech odehrávají.



Obr. č. 1 Závislost vazebné energie na nukleon [1]

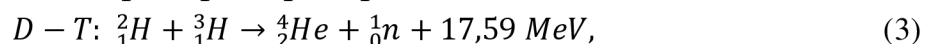
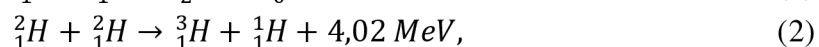
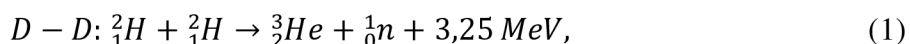
Na (Obr. č. 1) můžeme vidět křivku vazebné energie na nukleon. Při nízké atomové hmotnosti křivka rychle stoupá. Pro větší atomové hmotnosti nad 40 křivka pomalu stoupá, dokud nedosáhne maxima kolem 9 MeV a poté postupně klesá. [1]

1.2 Jaderná reakce

Jaderná reakce je proces, kdy dochází k interakci mezi jádry atomů. Existuje několik druhů jaderných reakcí, jako například jaderné štěpení, při kterém se jádro rozpadne na dvě nebo více menších částí a jaderná fúze, kdy se spojí dvě jádra do jednoho většího jádra.

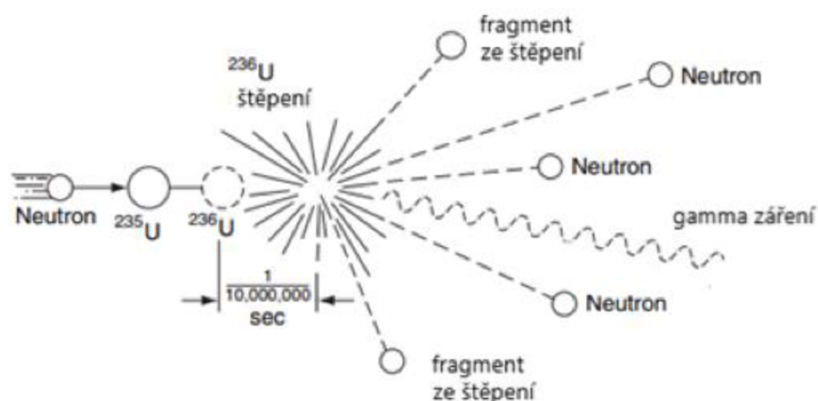
1.2.1 Fúzní reakce

Jedná se o proces, při kterém dochází ke slučování lehkých jader za vzniku těžších jader a uvolnění energie. Pro fúzní reakce je potřeba vysokých tlaků a teplot pro překonání odpudivé elektrostatické síly mezi protony v jádrech. Z praktického hlediska toho nelze dosáhnout pomocí urychlovače částic, protože urychlovač by spotřeboval mnohem více energie, než by bylo vyrobeno reakcí. Spíše je třeba najít prostředky k dosažení teplot srovnatelných s teplotami uvnitř slunce. Potom by zvýšená kinetická energie částic překonala Coulombovu bariéru a došlo by k termonukleární reakcím. Nejčastěji se fúzní reakce provádějí s izotopy vodíku deuteriem a tritiem: [1]



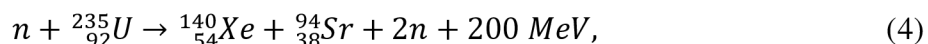
1.2.2 Štěpná reakce

Jedná se o jadernou reakci, kde dochází k rozpadu těžších jader (nejčastěji uranu nebo plutonia) na menší jádra a uvolnění energie. Pro příklad budeme uvažovat štěpnou reakci pro ${}^{235}\text{U}$. (Obr. č. 2) Ze štěpné reakce získáme přibližně 200 MeV energie, dva nebo tři neutrony, dvě lehčí jádra neboli fragmenty a gama záření. Fragmenty postupně podléhají radioaktivnímu rozpadu za vzniku dalších štěpných produktů. Energie produkovaná štěpením, neutrony a štěpné produkty, všechny hrají zásadní roli ve fyzice jaderných reaktorů.



Obr. č. 2: Štěpná reakce uranu-235 [1]

Výsledkem štěpení může být řada různých párů štěpných fragmentů. Ve většině případů má jeden podstatě těžší hmotnost než druhý. Jako příklad tady máme rovnici:



Tato rovnice ukazuje pouze jeden příklad z více než čtyřiceti různých párů fragmentů, které jsou výsledkem štěpení. Fragменты mají atomová hmotnostní čísla mezi 72 až 160. Při řetězové štěpné reakci musíme rozlišovat materiály na štěpné a štěpitelné. Štěpné materiály jsou takové, které mohou být bombardovány neutrony jakékoliv energie (například izotop ${}^{235}\text{U}$). Štěpitelné materiály jsou takové, které zachytí neutron a přemění se radioaktivním rozpadem na štěpný materiál (${}^{238}\text{U}$). Štěpitelný materiál může být také součástí štěpné reakce, ale pouze pokud je zasažen neutronem s vysokou energií.

1.3 Neutronová interakce

Neutronová interakce popisuje chování neutronu v prostředí, kde se setkává s jinými částicemi a mění svůj stav. Neutron může být rozptýlen, absorbován, zpomalován nebo reagovat a spustit jadernou reakci popsanou v předchozí kapitole.

Pružný rozptyl – Při tomto procesu narazí neutron na jádro, které je téměř vždy v základním stavu, neutron se znovu objeví a jádro se vrátí do základního stavu. Neutron v tomto případě byl pružně rozptýlen jádrem. Interakce je značena symbolem (n, n).

Nepružný rozptyl – Tento proces je identický s pružným rozptylem kromě toho, že jádro je ponecháno v excitovaném stavu. Protože je energie zadržována jádrem, jedná se jednoznačně o endotermickou interakci. Nepružný rozptyl je označen symbolem (n, n'). Vybuzevané jádro se rozpadá s emisí gama záření. Jelikož gama záření pocházejí z nepružného rozptylu, nazývají se nepružné gama záření.

Radiační záchyt – Zde je neutron zachycen jádrem a je emitováno jedno nebo více paprsků gama záření - tzv. záchytných paprsků gama. Toto je exotermická interakce a označuje se (n, γ). Protože původní neutron je absorbován, je tento proces příkladem třídy interakcí známých jako absorpční reakce.

Reakce nabitých částic – Neutrony mohou také zmizet v důsledku absorpčních reakcí typu (n, α) a (n, p). Takové reakce mohou být buď exotermické nebo endotermické.

Reakce produkující neutrony – S energetickými neutrony dochází k reakcím (n, 2n) a (n, 3n). Tyto reakce jsou jasně endotermické, protože při (n, 2n) reakci jsou ze zasaženého jádra extrahovány jeden neutron a při (n, 3n) reakci 2 neutrony. Reakce (n, 2n) je zvláště

důležitá v reaktorech obsahujících těžkou vodu nebo beryllium, protože ^2H a ^9Be mají volně vázané neutrony, které mohou být snadno vyvrženy. [2]

1.3.1 Účinné průřezy

Mikroskopický účinný průřez (σ) vyjadřuje pravděpodobnost interakce neutronu s jádrem atomu při srážce na mikroskopické úrovni. Jedná se o průměrnou plochu, na kterou by neutron narazil, kdyby při srážce s jádrem došlo k interakci. Mikroskopický účinný průřez je obvykle řádově v 10^{24} cm^2 , z historických důvodů je tato jednotka označována jako barn. Každá neutronová interakce popsaná v minulé kapitole má svůj vlastní účinný průřez. Součtem rozptylových a absorpčních účinných průřezů získáme totální mikroskopický účinný průřez (5). Pro zjednodušení můžeme totální mikroskopický účinný průřez rozdělit na účinný průřez pro rozptyl (6) a absorpci (7). [2]

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a, \quad (5)$$

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i, \quad (6)$$

kde:

σ_e ... účinný průřez pružného rozptylu

σ_i ... účinný průřez nepružného rozptylu

$$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha, \quad (7)$$

kde:

σ_a ... absorpční účinný průřez

σ_γ ... účinný průřez radiačního záchytu

σ_f ... účinný průřez štěpení

σ_p ... účinný průřez reakce (n, p)

σ_α ... účinný průřez reakce (n, α)

Makroskopický účinný průřez (Σ) je naopak veličina, která udává, s jakou pravděpodobností dojde k interakci neutronu s celou látkou na makroskopické úrovni. Udává se v jednotkách cm^{-2} . Makroskopický účinný průřez získáme vynásobením mikroskopického účinného průřezu a atomové hustoty: [2, 3]

$$\Sigma = N \cdot \sigma, \quad (8)$$

kde:

N ... atomová hustota

σ ... mikroskopický účinný průřez

1.4 Efektivní koeficient násobení

Efektivní koeficient nám říká, jak se počet neutronů v jaderném reaktoru mění v jedné generaci v průměru vzhledem k neutronům, které způsobily štěpení. Efektivní koeficient je dán násobkem koeficientem násobení složeném z tzv čtyř koeficientů a dvou pravděpodobností úniků.

$$k_{eff} = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p \cdot P_1 \cdot P_2 = k_{\infty} \cdot P_1 \cdot P_2, \quad (9)$$

kde:

k_{∞} ... koeficient násobení v nekonečné soustavě

η ... regenerační faktor paliva

f ... koeficient využití tepelných neutronů

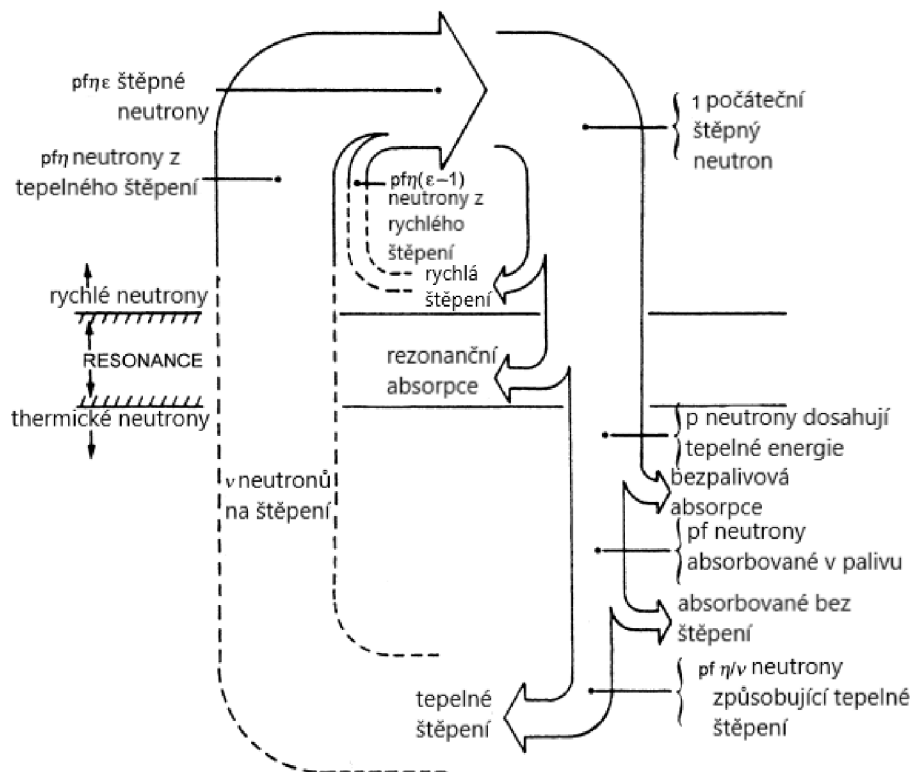
ε ... koeficient násobení rychlými neutrony

p ... pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu

P_1 ... pravděpodobnost, že neutron neunikne během zpomalování

P_2 ... pravděpodobnost, že neutron neunikne během difúze

Pokud v průměru přežije pouze jeden neutron a způsobí další štěpení, tak se bavíme o stavu označovaném jako kritický ($k_{eff} = 1$), populace neutronů v sestavě zůstane konstantní. Pokud v průměru přežije méně než jeden neutron, aby vyvolal další štěpnou reakci, říkáme tomu stav podkritický ($k_{eff} < 1$), populace neutronů se sníží. Pokud v průměru přežije více než jeden štěpný neutron a způsobí další štěpení, je to stav nadkritický ($k_{eff} > 1$), populace neutronů v sestavě se tak zvýší.



Obr. č. 3: Neutronová bilance v sestavě tepelného štěpení neutronů. [3]

2. VÝPOČETNÍ METODY

Transport neutronů je proces obsahující absorpci, rozptyl a štěpení. Výpočetní metody pro transport neutronů se používají k modelování tohoto procesu a k určování množství neutronů, které se dostávají z jedné oblasti do druhé. Výpočetní metody pro transport neutronů můžeme rozdělit do dvou skupin: [4, 5]

- a) Deterministické
 - Přímé řešení rovnice transportu neutronů
 - Diskretizace nezávislé proměnných
 - Přibližné metody pro vyčíslení integrálů a derivací
 -
- b) Statické (Monte Carlo)
 - Simulace pohybu jednotlivých svazků neutronů prostředím
 - Pravděpodobnostní popis drah neutronů i jejich interakcí
 - Statické metody pro získání požadovaných informací

Obě metody se zabývají linearizovanou Boltzmannovu transportní rovnicí. Boltzmannova rovnice popisuje chování neutronů v prostředí jako proud neutronů, který se může šířit, rozptylovat, absorbovat a produkovat další neutrony. Pro oblast jaderných reaktorů ve stacionárním tvaru můžeme psát Boltzmannovu rovnici:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})}{\partial t} = & -\boldsymbol{\Omega} \cdot \text{grad} \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) \\ & -\Sigma(\mathbf{r}, E) \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}) \\ & + \int_{4\pi} \int_0^{\infty} \Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \boldsymbol{\Omega}) \Phi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}') dE' d\boldsymbol{\Omega}' \\ & + Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}), \end{aligned} \quad (10)$$

- $\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})}{\partial t}$ představuje rychlost změny toku neutronů
- $\boldsymbol{\Omega} \cdot \text{grad} \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})$ představuje únik neutronů
- $\Sigma(\mathbf{r}, E) \Phi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})$ představuje rozptyl a absorpci neutronů.
- $\int_{4\pi} \int_0^{\infty} \Sigma_s(\mathbf{r}, E' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega}' \rightarrow \boldsymbol{\Omega}) \Phi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}') dE' d\boldsymbol{\Omega}'$ představuje rozptyl neutronů z jiných směrů a energií.
- $Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})$ představuje vznik neutronů. [4]

2.1 Deterministické metody

Deterministické výpočty jsou používány už od počátku vývoje jaderné energetiky k získání globálních řešení neutronového toku založených na transportním modelu. Z počátku byla využívána linearizovaná Boltzmannova transportní rovnice. S postupem času se vyvinulo

mnoho odvětví s různými funkcemi se zámkou zvýšit přesnost výsledků provedením výpočtů pro jednotlivé části zvláště. Deterministická metoda je bohužel hodně náročná na výkon výpočetních strojů, proto přistupujeme k diskretizaci prostoru, energii a úhlu.

2.1.1 Diskretizace

Pro numerické řešení transportní rovnice se často používá diskretizace prostoru, úhlu a energií. Toto rozdělení umožňuje aproximovat transportní rovnici s konečným počtem rovnic, které jsou následně řešeny numericky.

- Prostorová diskretizace je založená na rozdělení fyzikálního prostoru na malé části, například na malé hexagony nebo krychle, a aproximaci řešení v každé části. Tímto postupem získáme řešení komplexních geometrií a umožní nám to snadnou implementaci výpočetních metod například metod uzlových.
- Úhlová diskretizace se používá k aproximaci řešení transportní rovnice v určitém směru. Rozděluje se celkový prostor úhlů do konečného počtu diskretních směrů.
- Diskretizace energie umožňuje rozdělit rozsah energií neutronů na konečný počet diskretních energií a aproximovat řešení v každé energii. To umožňuje modelovat interakce neutronů s materiálem v různých energetických oblastech. Pro některé problémy s tepelným reaktorem mohou stačit jen 2 skupiny, ale rychlý reaktor vyžaduje mnohem více výpočtů. [6]

2.1.2 Deterministické výpočetní kódy

- DORT/TORT (DOORS) (ORNL) – 1D, 2D a 3D kartézské a válcové geometrie
- PARTISN (LANL) – Paralelní, časově závislý, 1D, 2D, 3D kartézská a cylindrická geometrie
- Denovo (ORNL) – Vysoce paralelní, kartézská geometrie, pokročilé metody zrychlení
- RAPTOR-M3G (Westinghouse) – Paralelní, 3D kartézská a válcová geometrie
- PENTRAN – Paralelní, 3D kartézská geometrie

2.2 Statické metody (Monte Carlo)

Na rozdíl od řešení rozsáhlých sad algebraických rovnic pro diskretizovanou formu transportní rovnice, metoda Monte Carlo simuluje jednotlivé „historie“ částic, od začátku emitování ze zdroje přes materiály a na závěr úniku z modelového prostoru nebo příčinou absorpce. Metodu Monte Carlo lze považovat za numerickou integraci transportní rovnice. Všechny fyzikální interakce se vyjadřují jako funkce rozdělení pravděpodobnosti a ke vzorkování jednotlivých událostí jsou použita náhodná čísla. Stejně jako ve skutečném měření obsahují všechny výsledky stochastické nejistoty. [5]

Výhody metody Monte Carlo:

- Dokáže zpracovat velké množství fyzikálních detailů: geometrie, materiály a účinné průřezy
- Může poskytnout konkrétní množství: toky, reakční rychlosti, na povrchu, nad objemem, přes síťový záznam

- Uvádí nejistotu spojenou s každým výsledkem

Nevýhody:

- Pomalé
- Není dobrý pro globální řešení bez velmi účinného snížení rozptylu
- Částice nemusí dobře vzorkovat celý fázový prostor
- Snížení rozptylu velmi pomáhá, ale jeho dobrá implementace vyžaduje zkušenosti [4]

2.2.1 Statické výpočetní kódy (Monte Carlo)

- MCNP6 (LANL) – paralelní, neutrální a nabité částice, velmi široce používané
- SCALE/Monaco (ORNL) – transport neutronů a fotonů
- Shift (ORNL) – vysoce paralelní transport neutronů a fotonů
- TART (LLNL) – transport neutronů a fotonů
- Mercury (LLNL) – Moderní konstrukce pro paralelní provoz
- MCBEND (Serco/Sellafield) – neutron, foton
- TRIPOLI (CEA) – paralelní, transport neutronů a fotonů

3. SCALE 6.2

Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation (SCALE) je počítačový softwarový systém vyvíjený, testovaný a udržovaný v Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Tento systém obsahuje modelovací a simulační sady pro analýzu a návrh jaderné bezpečnosti. Poskytuje komplexní, ověřené a uživatelsky přátelské sady nástrojů pro bezpečnost jaderné kritičnosti, reaktorovou fyziku, radiační stínění, charakterizaci termínu vyhořelého paliva a radioaktivního zdroje, analýzu citlivosti a nejistoty. Od roku 1980 používají regulátoři, držitelé licencí a výzkumné instituce po celém světě program SCALE pro návrh bezpečné analýzy. SCALE zahrnuje aktuální knihovny jaderných dat a za pomoci grafického rozhraní lze jednoduše namodelovat systém s pohodlným přístupem k požadovaným výsledkům. SCALE obsahuje integrovanou strukturu s desítkami výpočetních modulů včetně tří deterministických a tří založených na metodě Monte Carlo. Pro příklad uvádím nejvíc používané: [7]

- KENO – kód pro výpočet kritických a nadkritických stavů jaderných reaktorů pomocí metody Monte Carlo
- SCALE/MAVRIC – kód pro výpočet neutronového pole v reaktoru pomocí metody Monte Carlo a pro simulaci chování palivových proutků a reaktorových komponent
- SCALE/TRITON – kód pro výpočet průběhu neutronového toku v jaderném reaktoru pomocí metody Monte Carlo
- SCALE/ORIGEN – kód pro výpočet produkce a rozpadu radioaktivních izotopů v jaderných palivech, jako jsou například jaderné palivové proutky
- SCALE/NEWT – kód pro výpočet neutronových polí v reaktoru pomocí difuzní teorie
- SCALE/TSUNAMI – kód pro výpočet tepelné hydrauliky v jaderných reaktorech a dalších jaderných zařízeních
- SCALE/RELAP5 – kód pro simulaci chování jaderného reaktoru za různých podmínek, včetně havarijních situací

3.1 Grafické uživatelské rozhraní – Fulcrum

Fulcrum je grafické uživatelské rozhraní pro různé platformy určené k vytváření, ověřování, upravování a vizuálně zobrazování vstupních a výstupních souborů systému SCALE. Historicky SCALE poskytoval řadu speciálních uživatelských rozhraní, která fungují pouze na konkrétních platformách. Fulcrum je určen k poskytnutí jediného uživatelského rozhraní, které přímo integruje s interními zdroji systému SCALE a poskytuje konzistentní zkušenost mezi Fulcrumem a rozhraním příkazového řádku SCALE.

Koncept je založen na víceletých zpětných vazbách, který byly získány od uživatelů prostřednictvím vydání mnoha rozhraní. V porovnání se SCALE 6.1 GeeWiz rozhraním které obsahuje spoustu dialogových oken je Fulcrum tvořen textovou formou vstupního souboru

a zároveň obsahuje funkce, které pomáhají při vytváření správných vstupních souborů. Fulcrum poskytuje editaci vstupu a navigaci, interaktivní vizualizaci geometrie pro KENO V, KENO VI a NEWT, provádění úloh, překrývání výsledků sítě a vykreslování dat z většiny souborových SCALE formátů. Nechybí analyzátor pro kontrolu chyb, který identifikuje špatně vytvořený vstup buď s pravopisnými chybami, nebo vynechanými daty. [7]

3.2 KENO V.a

Jak už bylo zmíněno jedná se o výpočetní kód programu SCALE pro analýzu kritických stavů jaderných systémů s využitím metody Monte Carlo. Podporuje 3D geometrie jaderných reaktorů, má schopnost modelovat složité materiálové struktury a více komponentní materiály. Integruje s dalšími kódy programu SCALE pro analýzu jaderných systémů, jako jsou MONTEBURNS a TSUNAMI. Výstupem jsou pak hodnoty efektivního koeficientu násobení a další kritické veličiny.

3.2.1 Vstupní soubor

Vstupní soubor je rozdělen do třinácti různých datových bloků, které mají vždy svůj začátek a konec. Stručný přehled běžně používaných bloků je v následující tabulce:

Tab. 1: Seznam datových bloků [7]

Typ	Start	Komentář	Konec
Složení	READ COMPOSITION	Zadejte požadované složení materiálů	END COMPOSITION
Parametry	READ PARAMETER	Zadejte požadované parametry	END PARAMETER
Geometrie	READ GEOMETRY	Zadejte požadovaná geometrická data	END GEOMETRY
Mříž	READ ARRAY	Zadejte požadovaná data k mříži	END ARRAY
Okrajové podmínky	READ BOUNDS	Zadejte požadovanou hranici	END BOUNDS
Hranice energetických skupin	READ ENERGY	Zadejte požadovanou energii neutronů	END ENERGY
Počáteční data nebo počáteční zdroj	READ START	Zadejte požadovaná počáteční data	END START
Data grafu	READ PLOT	Zadejte požadovaná data grafu	END PLOT
Data geometrie sítě	READ GRID	Zadejte požadovaná data k síti	END GRID
KENO V.a datový konec	END DATA	Vstup pro signalizaci konce všech údajů kódu KENO V.a	

Vstupní soubor však nemusí obsahovat všechny zmíněné datové bloky. Na obrázku (Obr. č. 4) je vidět šablona v uživatelské rozhraní Fulcrum pro výpočetní kód KENO V.a. Šablona obsahuje jen ty nejdůležitější bloky pro jednoduchý výpočet.

```

1 =csas5
2 title-goes-here
3 xslib-goes-here
4
5 read comp
6
7 ' TODO: define comp
8
9 end comp
10
11
12 read geometry
13
14 global unit 1
15
16 ' TODO: define global unit here
17
18
19 ' TODO: add units below
20
21 end geometry
22
23
24 end data
25 end

```

Obr. č. 4: Šablona výpočetního kódu KENO V.a

První řádek říká programu, který modul chceme použít. Pro výpočetní kód KENO V.a se tento modul nazývá CSAS (Criticality Safety Analysis Sequence). Hned po prvním řádku se nachází místo pro titulek a knihovnu účinných průřezů kterou chceme použít. Od verze SCALE 6.2.4 existují čtyři knihovny účinných průřezů, které jsou primárně určeny pro použití ve výpočtech kritičnosti. Při provádění výpočtů pomocí SCALE je nutné odkazovat na knihovny pomocí specifických identifikátorů. Každá z knihoven má těchto identifikátorů více (Tab. 2).

Tab. 2: Knihovny programu SCALE [8]

Identifikátor	Knihovna
v7-238; v7-238n; v7.0-238n	ENDF/B-VII.0 238-group neutron library
v7-252; v7-252n; v7.1-252n	ENDF/B-VII.1 252-group neutron library
ce_v7; ce_v7_endf; ce_v7.0_endf	ENDF/B-VII.0 CE library
ce_v7.1; ce_v7.1_endf	ENDF/B-VII.1 CE library

Pro program SCALE jsou přístupné i další knihovny, ale pro výpočty kritičnosti se nedoporučují. Ostatní bloky budou popsány v následující kapitole na vzorovém příkladu.

3.2.2 Vzorový příklad

Pro porozumění programu použijí vzorový příklad, kde sestavím zjednodušený model. K příkladu vysvětlím i jednotlivé bloky, které vzorový příklad obsahuje.

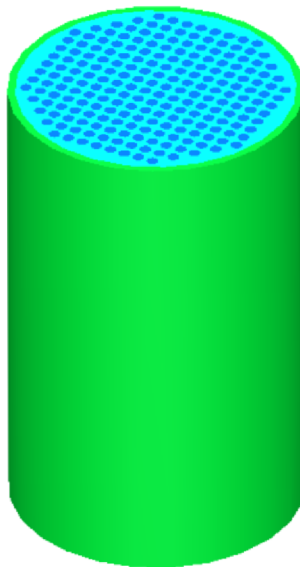
Palivový proutek

- Vnější průměr: 0,75 cm
- Délka: 30 cm

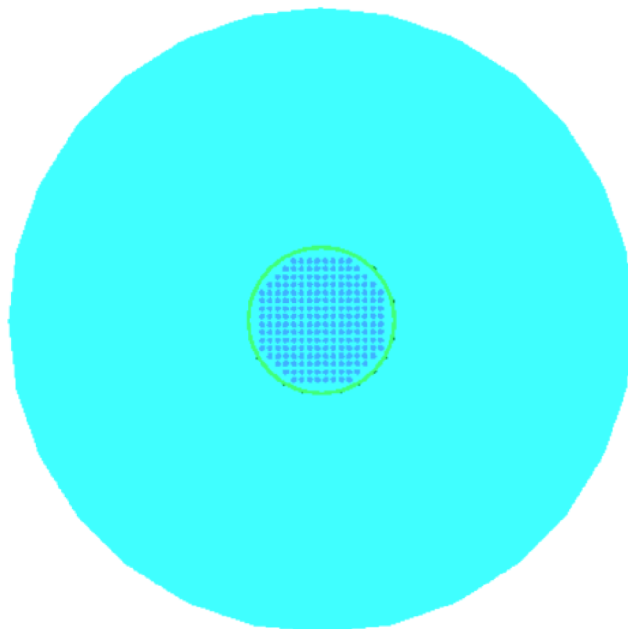
- Rozteč: 1,0 cm
- Palivo: 20 % ^{235}U , 80 % ^{238}U (palivo neobsahuje ^{234}U ani ^{236}U)

Nádrž

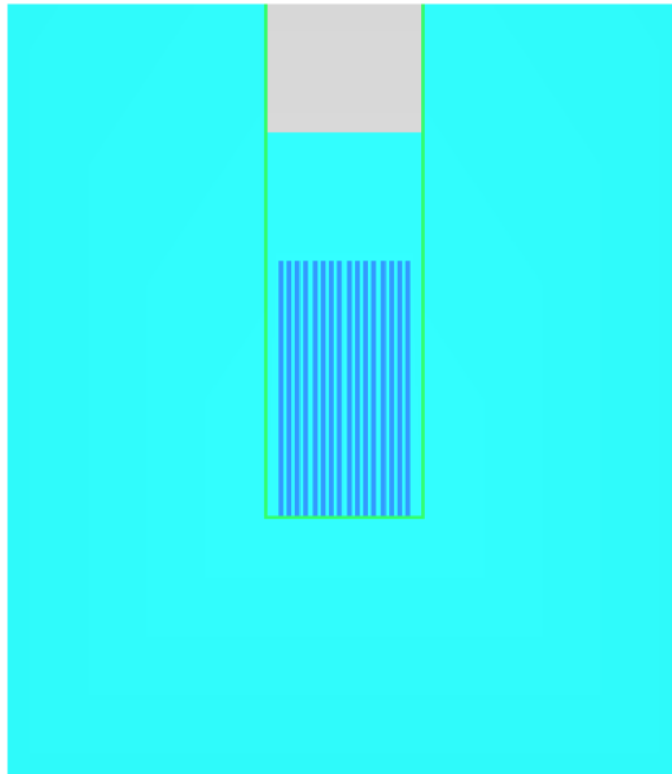
- Vnitřní průměr: 18 cm
- Výška: 60 cm
- Tloušťka aluminiové stěny a dna: 0,5 cm
- Nádrž je naplněná do 45 cm vodou
- Reflektorem je voda s tloušťkou po krajích a ze spodu nádrže 30 cm



Obr. č. 5: Vzorová nádrž 3D model bez reflektoru



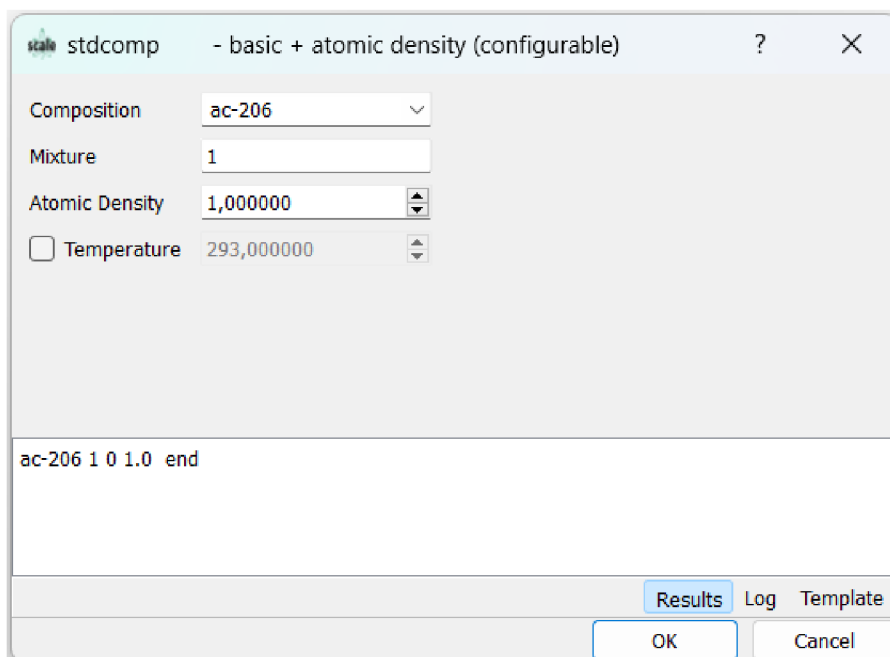
Obr. č. 6: Vzorová nádrž, pohled shora



Obr. č. 7: Vzorová nádrž, pohled ze strany

Složení

Blok složení nám pomáhá k definování materiálů. Pro vložení složení kompozic existuje v programu mnoho formátů. Jedním z formátů je na následujícím obrázku. Můžeme zde nadefinovat číslo takzvané směsi, atomovou hustotu a teplotu. Pro náš příklad jsem nadefinoval celkem tři směsi.



Obr. č. 8: Definování složení

Pro tento formát jsem v první řadě vypočítal atomovou hustotu podle vzorce:

$$N_i = \frac{\rho_i \cdot W_{f,i} \cdot N_A}{A_{W,i} \cdot 10^{24}}, \quad (11)$$

kde:

N_i ... atomová hustota prvku i

ρ_i ... hustota materiálu obsahující prvek i

$W_{f,i}$... hmotnostní zlomek prvku i v materiálu

N_A ... Avogadrova konstanta ($6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

$A_{W,i}$... atomová hmotnost prvku i

```

5 read composition
6
7 U-235      1 0 9.76173E-03 291.15 END
8 U-238      1 0 3.85537E-02 291.15 END
9
10 H         2 0 6.67634E-02 291.15 END
11 O         2 0 3.33817E-02 291.15 END
12
13 AL        3 0 6.02626E-02 291.15 END
14
15 end composition

```

Obr. č. 9: Blok složení

Parametry

Jak už název napovídá v tomto bloku si budeme definovat parametry výpočtu. Nastavitelných parametrů je celá řada, ale nám budou stačit jen tři. Parametr *GEN* slouží k nastavení počtu neutronových generací se kterými má program počítat. Druhý parametr s označením *NPG* slouží k nastavení počtu netronů na generaci. Posledním parametrem je parametr *NSK* ten říká programu kolik počátečních generací má program přeskočit. U vzorového příkladu jsem nastavil, aby program počítal dohromady se 200 000 aktivními a 3 000 neaktivními neutrony.

```

16 read parameters
17
18 GEN=203
19 NPG=1000
20 NSK=3
21
22 end parameters

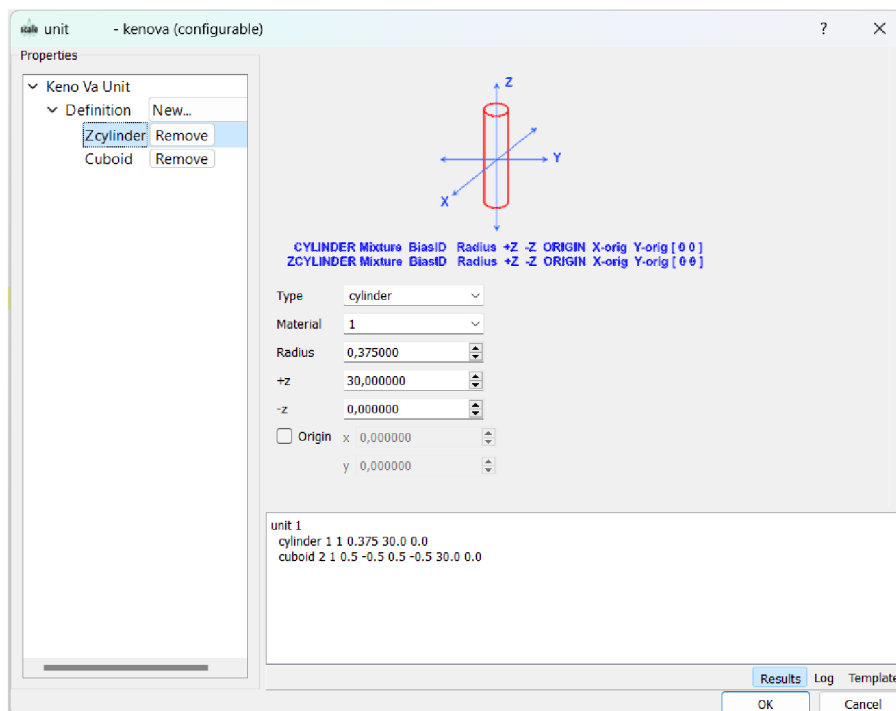
```

Geometrie

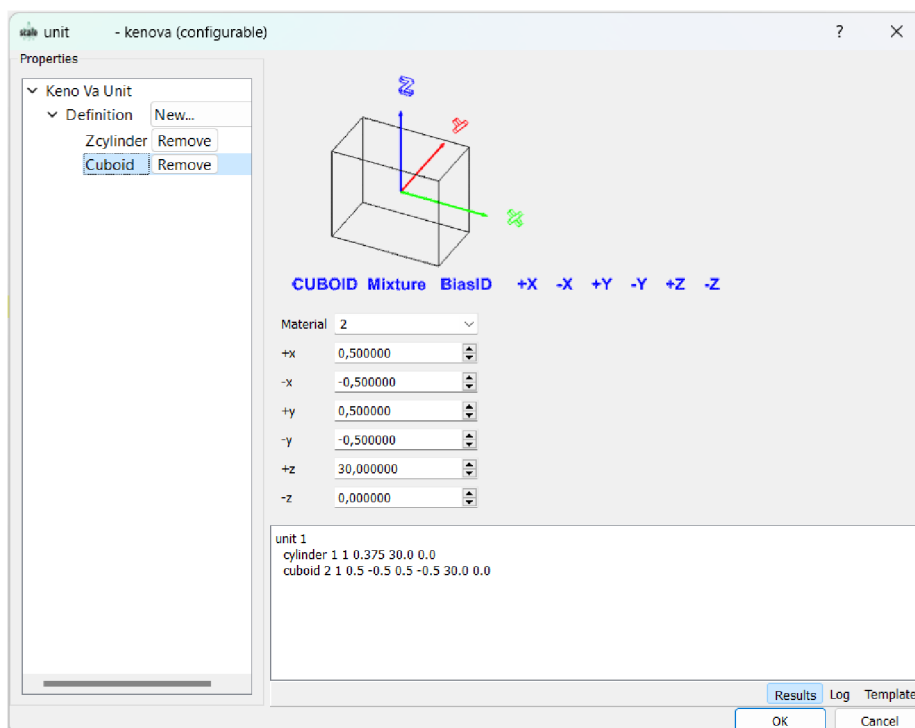
KENO V.a používá sadu základních tvarů k sestavení různých typů modelů. Mezi základní tvary patří například krychle, kvádr, koule, válec, polokoule a nebo poloválec. K vytvoření geometrického tvaru je zapotřebí znát jeho parametry a dodržovat jednoduchá pravidla. Existuje celkem sedm pravidel:

- Tvary jsou budovány do společné sekce zvané *unit*. Každá *unit* je nezávislá na všech ostatních a má svůj vlastní souřadnicový systém.
- *Units* jsou stavěny zevnitř ven pomocí regionů. V rámci každé *unit* musí oblast plně zahrnovat všechny dříve definované.
- Regiony se nesmí protínat.
- Všechny tvary jsou orientovány podél hlavní osy a nelze s nimi otáčet.
- Pro umístění *unit* do oblasti jiné *unit* musí být použita funkce *hole*. Jejich okraje se stejně jako u *unit* nesmí protínat.
- *Array* představuje souhrn *unit*. Okraje sousedních *unit* uvnitř *array* musí mít stejnou velikost. Uvnitř *unit* může být pouze jedna *array*. V případě vložení další *array* musí být použita funkce *hole*.
- Pro každý výpočet musí být definována speciální *global unit*, která definuje hranice výpočtu. [8]

Pro náš vzorový příklad využiji kombinaci válců a kvádrů. Jako první si vytvořím válec představující palivový proutek (Obr. č. 10). Jelikož budu chtít vytvořit celou mříž budu muset tento válec uzavřít to kvádru (Obr. č. 11). Pro válec se zadává typ složení v našem případě uran, poloměr a souřadnice $+z$ a $-z$. Pro definování kvádru musíme zadat místo poloměru tloušťku směrem po ose x a y . Základními jednotky v kódu KENO V.a jsou centimetry. Dole pod modelem vidíme formát v textovém tvaru, který bude vepsán do programu.



Obr. č. 10: KENO V.a válec

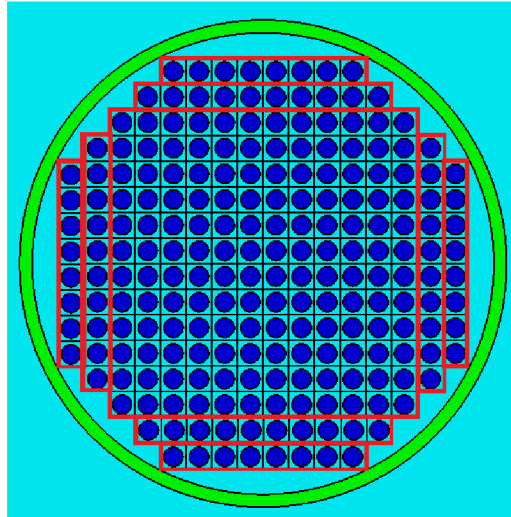


Obr. č. 11: KENO V.a kvádr

Mříž

Mříže jsou vytvářeny skládáním jednotlivých jednotek na sebe (krychle, nebo kvádr). Rozměry ploch sousedních jednotek se musí shodovat. Mříže se řídí pravidlem stejně jako jednotky a tím pravidlem je že se nesmí protínat s jinými mřížemi. V našem případě budeme muset použít více než jednu mříž. Pokud bychom tak neudělali mříž by se nám protнула s vnějším válcem. Pro náš příklad použijí následující mříže (Obr. č. 12):

- Mříž 1 je centrální mříží 12 x 12
- Mříž 2 je kratší vertikální mříž 1 x 8
- Mříž 3 je delší vertikální mříž 1 x 10
- Mříž 4 je kratší horizontální mříž 8 x 1
- Mříž 5 je delší horizontální mříž 10 x 1



Obr. č. 12: Mříže vzorového příkladu

Druhým pravidlem pro umístění mříží je jedna jednotka nesmí obsahovat více jak jednu mříž, proto vložíme do jednotky pouze mříž o rozměrech 12 x 12. Zbýlých osm postranních mříží vložíme pomocí funkce *hole*. Mříž můžeme vložit dvěma způsoby (Obr. č. 13). První způsob je více přehledný, ale u rozsáhlejších sítí zabírá hodně příkazových řádků. Druhý způsob využívá zkratky *f1* pro vyplnění mříže jednotkou 1.

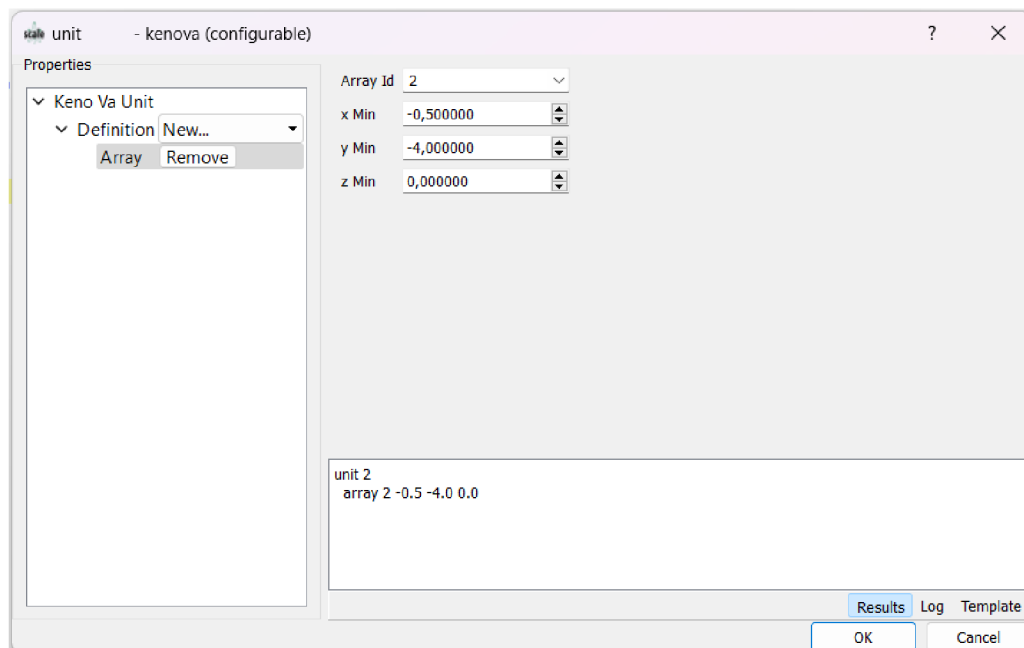
```

53  ara=1
54  nux=12
55  nuy=12
56  nuz=1
57  fill
58  ' z = 1
59    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
60    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
61    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
62    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
63    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
64    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
65    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
66    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
67    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
68    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
69    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
70    1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
71  end fill
53  ara=1 nux=12 nuy=12 nuz=1
54  fill f1 end fill

```

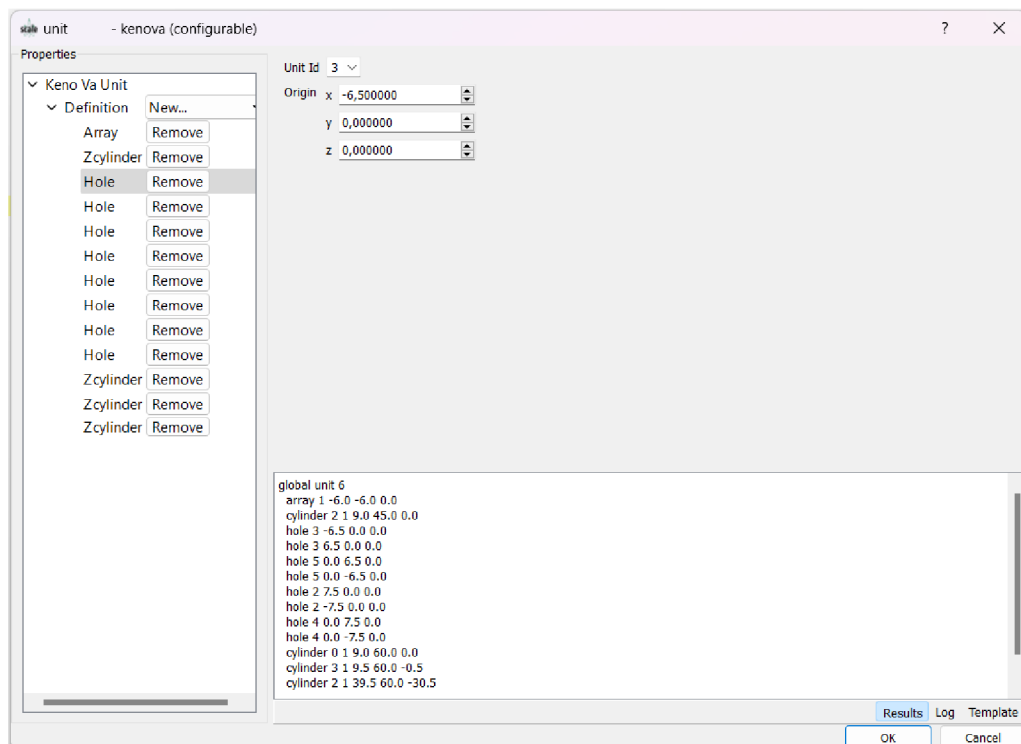
Obr. č. 13: Vkládání mříže

Stejným způsobem vytvoříme zbylé mříže. Dalším krokem defínuji mříž jako geometrický tvar. Vráťím se do geometrického bloku a defínuji *Id* mříže a okrajové podmínky.



Obr. č. 14: KENO V.a mříž

Global unit je poslední částí v geometrickém bloku. V tomto bloku jsem sestavil finální model, se kterým má program pracovat. Jelikož jsem se řídil pravidlem „zevnitř ven“, tak jsem začal mříží 12 x 12. Poté jsem mříž usadil do nádrže (válce) a pomocí díry jsem vložil zbylé mříže (Obr. č. 12). Nakonec jsem nadefinoval tloušťkou stěny nádrže a velikost reflektoru. Díra se definuje pomocí souřadnic x , y , z a označení jednotky pro kterou je díra určena.



Obr. č. 15: KENO V.a *global unit*

3.2.3 Výstupní soubor

Výstupní soubor má koncovku *.out*. V souboru najdeme běžné informace jako jsou den, čas nebo autor dokumentu. Kromě běžných informací zde můžeme najít zkopírovaný vstupní soubor, tabulku složení různých materiálů, parametry, co byly zadány nebo jsou nadefinovány automaticky v základu, závislost přeskočených generací na přesnosti atd. Hlavním pozorovaným parametrem ve výstupním souboru je efektivní koeficient násobení a přesnost, která je závislá na počtu neutronů.

```
*****
***
*** primer example: pins in a tank
***
*****
***
***          *****   final results table   *****
***
*** best estimate system k-eff                0.8681 + or - 0.0016
***
*** Energy of average lethargy of Fission (ev)  2.09630E+01 + or - 2.56380E-01
***
*** system nu bar                               2.47906E+00 + or - 2.41244E-04
***
*** system mean free path (cm)                 4.93394E-01 + or - 3.38365E-04
***
*** number of warning messages                  5
***
*** number of error messages                   0
***
*** k-effective satisfies the chi**2 test for normality at the 95 % level
***
***
*****
***
*** there are      125   source meshes
***
*** source convergence tests failed
***
*****
```

Obr. č. 16: KENO V.a výstupní soubor

4. INTERNATIONAL CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EVALUATION PROJECT

Projekt *The Criticality Safety Benchmark Evaluation Project* (CSBEP) byl zahájen Ministerstvem energetiky Spojených států amerických (DOE) v roce 1992. Projekt byl řízen laboratoří *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory* (INEEL), ale zapojili se do projektu i celostátní známí odborníci na bezpečnost kritických stavů z jiných laboratoří. Během roku 1994 se změnil název na *International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project* (ICSBEP). Na projektu se dnes už podílejí i zástupci z Velké Británie, Francie, Japonska, Ruské federace, Maďarska, Kazachstánu, Koreje, Slovinska, Jugoslávie, Španělska a Izraele. V prosinci 1994 se ICSBEP stal oficiální činností prostřednictvím společnosti *Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency* (OECD-NEA). Součástí projektu je publikace *International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments*, která shromažďuje a hodnotí experimentální data a benchmarky související s bezpečností kritičnosti.

Cíle projektu ICSBEP jsou:

- Identifikovat a vyhodnotit komplexní soubor relevantních benchmarků kritických, podkritických, radiačních a základních experimentálních dat fyziky
- Ověřovat data v možném rozsahu a přezkoumat originální revidované dokumenty
- Vyhodnotit data a kvalifikovat nejistoty pomocí analýz
- Zpracovat data do standardizovaného formátu
- Provést vzorové výpočty experimentů pomocí výpočetních kódů kritičnosti
- Formálně zdokumentovat do jediného zdroje ověřených dat [9]

4.1 Uspořádání

Data z benchmarků jsou rozdělená do celkem sedmi svazků. Každý z těchto svazků obsahuje data reprezentující jeden ze sedmi typů systémů štěpných materiálů. Svazek VIII obsahuje benchmarky zaměřené na radiační záření, které lze použít k problematice stínění nebo k rozmístění alarmů. Poslední svazek obsahuje typy základních fyzikálních měření, které mají spojitost s kritickou bezpečností. Názvy jednotlivých svazků jsou:

- Svazek I: Plutoniové systémy (PU)
- Svazek II: Systémy vysoce obohaceného uranu (HEU)
- Svazek III: Systémy středně a různě obohaceného uranu (IEU)
- Svazek IV: Systémy nízko obohaceného, přírodního nebo ochuzeného uranu (LEU)
- Svazek V: Systémy s ^{233}U (U233)
- Svazek VI: Smíšené systémy plutonium-uran (MIX)
- Svazek VII: Speciální izotopové systémy (SPEC)
- Svazek VIII: Benchmarky kritického alarmu/stínění (ALARM)
- Svazek IX: Měření základní fyziky (FUND)

Každý ze sedmi prvních svazků je navíc rozdělen do čtyř hlavních částí, představující fyzickou formu štěpných materiálů.

- Kovové systémy (MET)
- Složené systémy (COMP)
- Roztokové systémy (SOL)
- Smíšené systémy (MISC)

Dále jsou tyto systémy rozděleny na rychlé (FAST), střední (INTER), tepelné (THERM) a smíšené systémy (MIXED). Experimenty pak nesou název podle typu systémů. [9]

4.2 Vybrané experimenty

Mnoho experimentálních výzkumů pro reaktory VVER bylo provedeno na kritickém zařízení SF-9 a P, který provozoval *Russian Research Centre "Kurchatov Institute" (RRC KI)*. Kritické zařízení SF-9 bylo postaveno v roce 1966 a kritické zařízení P v roce 1987. Obě zařízení sloužila k výzkumu neutronové fyziky lehké-vodních palivových mříží a palivových souborů VVER-440 a VVER-1000.

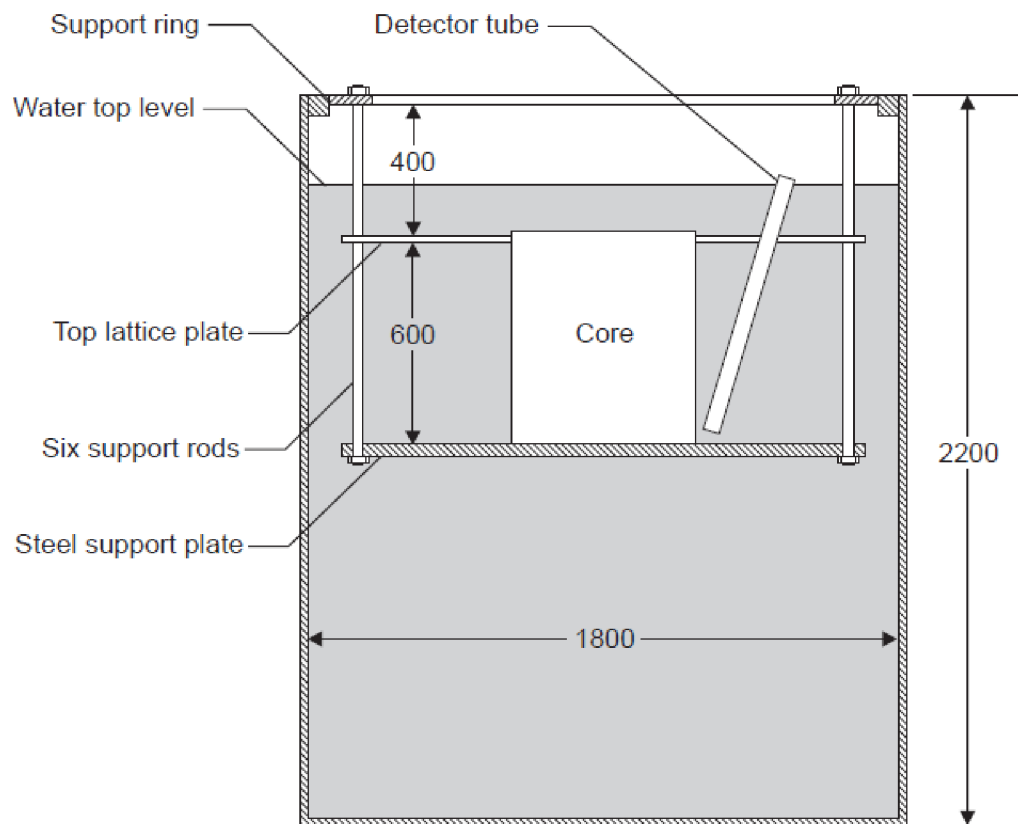
Zařízení SF-9 má aktivní zónu umístěnou uvnitř válcové nádrže z nerezové oceli (12X18H10T). Nádrž je nahoře otevřená s vnitřním průměrem 2040 mm, tloušťka stěny je 4 mm a výška 3700 mm. Nádrž je naplněná moderátorem (čistou vodou nebo lehkou vodou s kyselinou boritou) do výšky H_{cr} . Palivové proutky jsou upevněny ve spodní a horní mřížkové desce. Mřížkové desky jsou zpevněny pomocí šesti nerezových podpěr o tloušťce 20 mm. Tloušťka moderátora pod spodní deskou je více než 1600 mm. Zařízení P má vnitřní průměr 2300, tloušťka stěny má 5 mm a výška nádrže je 5613 mm. U některých experimentů byla použita střední mřížka ke zlepšení pravidelnosti mřížky.

Účelem experimentů bylo získat parametry kritičnosti relativně těsné mřížky typu VVER s relativně vysokým obohacením paliva při různých kritických rozměrech aktivní zóny. Jednotlivé konfigurace v experimentu se od sebe odlišují ve výšce hladiny moderátora a v různých délkách suchých palivových proutků nad hladinou. [9]

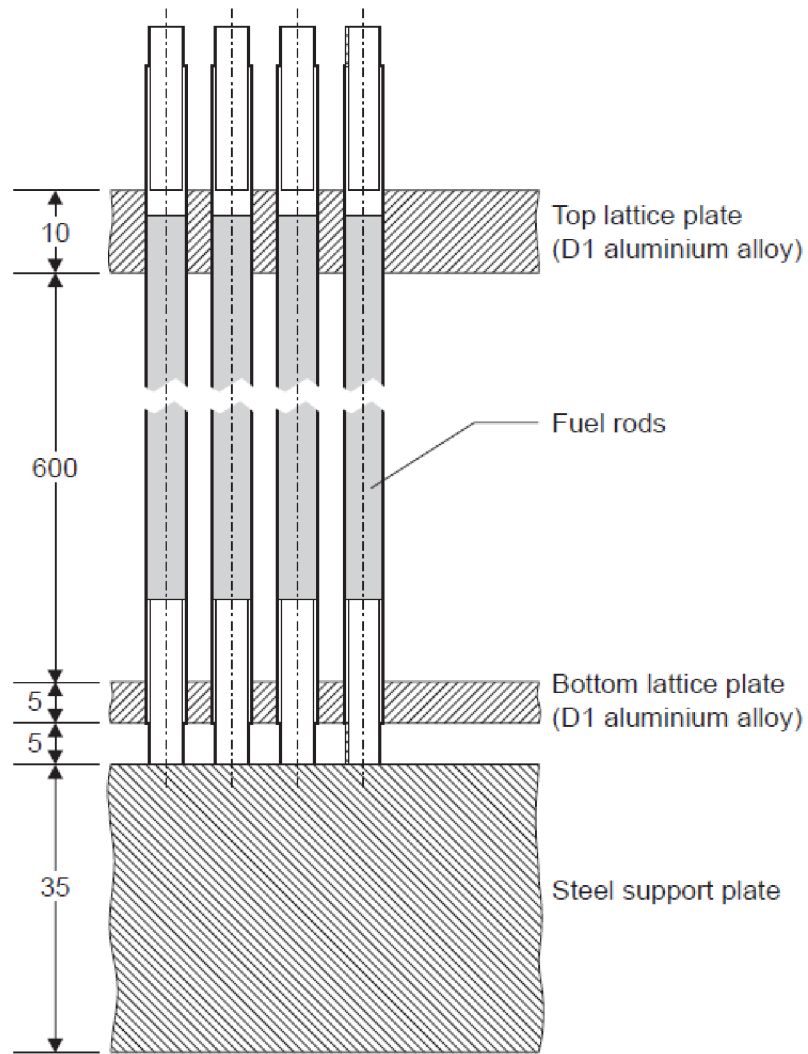
4.2.1 LEU-COMP-THERM-020

Experimenty jsou prováděny uvnitř ocelové nádrže s otevřenou střechou o tloušťce 2,5 cm (Obr. č. 17). Vnitřní průměr nádrže je 180 cm a její výška je 220 cm. Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde měřeno 7 konfigurací (Tab. 3). Prvních šest experimentů mělo palivové proutky zatopené jen částečně, ale u sedmé konfigurace byly zatopeny úplně. Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,3 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 180 cm. Spodní reflektor se skládá ze dvou částí. První část reflektoru se skládá z ocelové nosné desky s tloušťkou 3,5 cm a druhá část se skládá z vrstvy vody s tloušťkou 20 cm. Celková výška modelu je 87,5 cm. Experimenty používají palivové proutky s obohacením 5 % (Obr. č. 19). Průměr mřížkové desky není určen. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 0,5 cm. Desky jsou z hliníkové slitiny. Otvory v horních a spodních deskách mají průměr 0,61 cm. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 20).

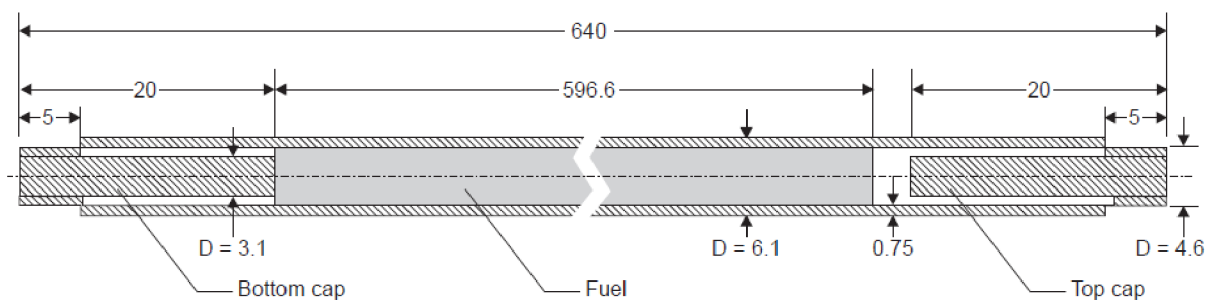
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven $1,000 \pm 0,002$. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl stanoven na $1,0000 \pm 0,0061$ pro všech 7 konfigurací. [9]



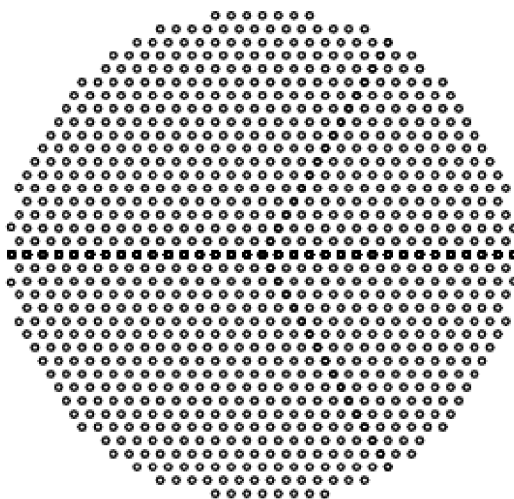
Obr. č. 17: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT020 [9]



Obr. č. 18: Schéma uložení palivového proutku do aktivní zóny LCT020 [9]



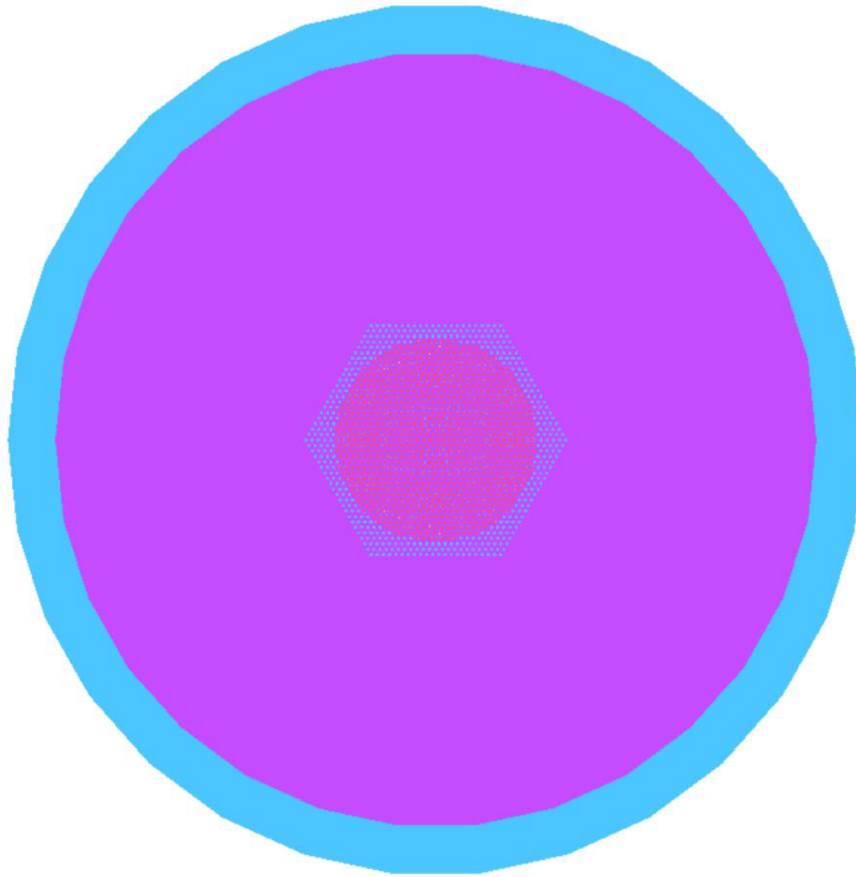
Obr. č. 19: Rozměry palivového proutku LCT020 [9]



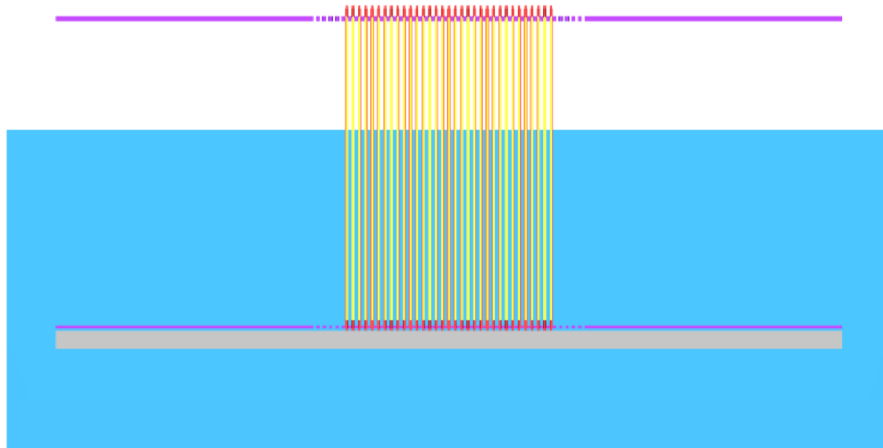
Obr. č. 20: Mapa 4. kritické konfigurace LCT020 [9]

Tab. 3: Kritické konfigurace LCT020 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	3267	$21,38 \pm 0,1$
2	1305	$30,07 \pm 0,1$
3	1051	$34,74 \pm 0,1$
4	952	$37,55 \pm 0,1$
5	842	$42,36 \pm 0,1$
6	785	$46,15 \pm 0,1$
7	654	$> 89,00$



Obr. č. 21: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT020



Obr. č. 22: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT020

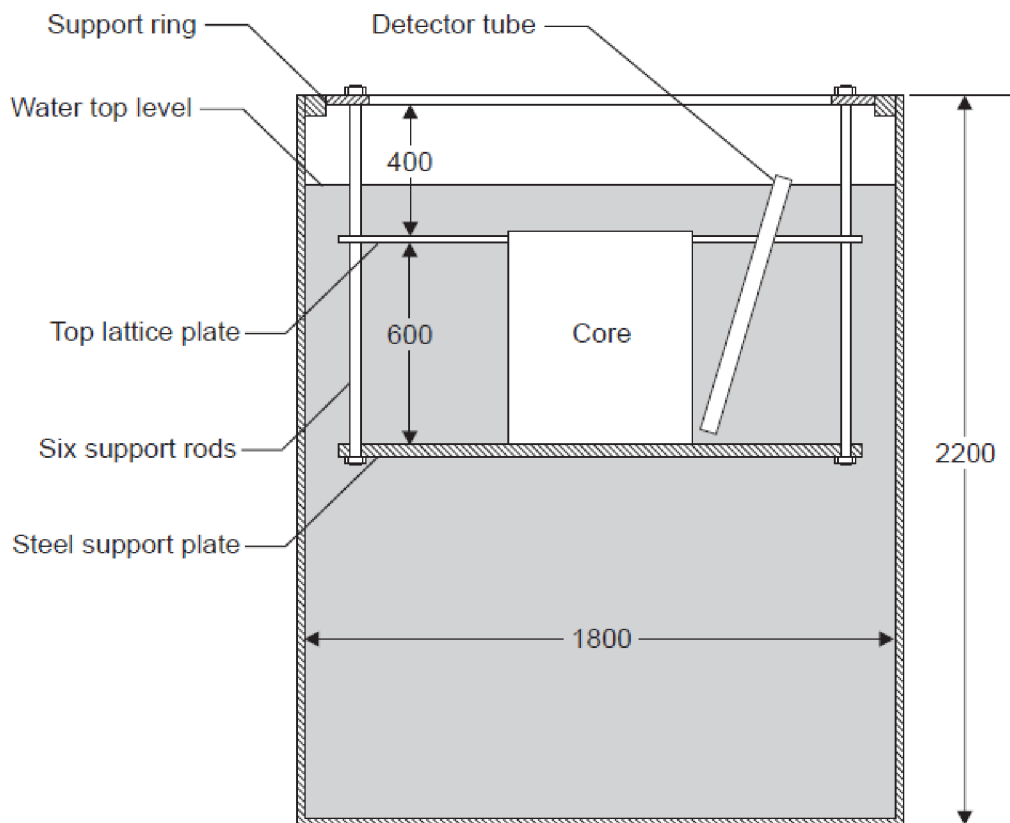
Tab. 4: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT020 [9]

Výpočetní kód →	MCNP	KENOV.a
Knihovna →	Continous-Energy ENDF/B-V	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	0,9957 ± 0,0011	0,99513 ± 0,00018
2	1,0029 ± 0,0011	1,00012 ± 0,00020
3	1,0003 ± 0,0010	1,00262 ± 0,00017
4	1,0024 ± 0,0010	1,00226 ± 0,00021
5	1,0051 ± 0,0011	1,00322 ± 0,00019
6	1,0052 ± 0,0010	1,00349 ± 0,00018
7	1,0031 ± 0,0010	1,00362 ± 0,00018

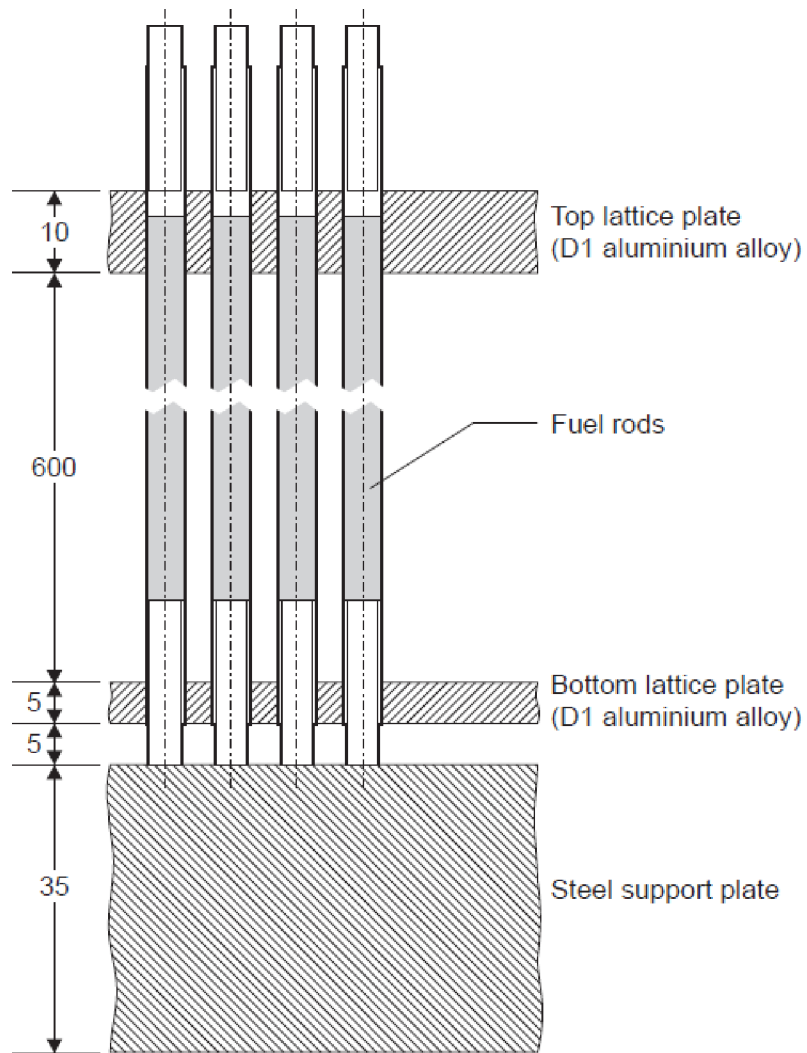
Na (Obr. č. 21) a (Obr. č. 22) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsal do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

4.2.2 LEU-COMP-THERM-021

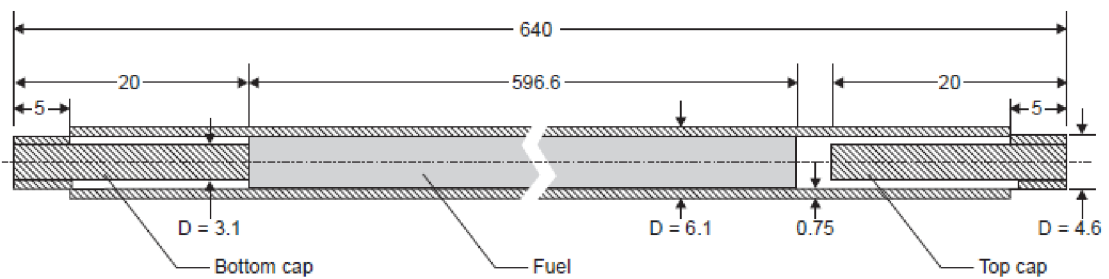
Experimenty jsou prováděny uvnitř ocelové nádrže s otevřenou střechou o tloušťce 2,5 cm (Obr. č. 23). Vnitřní průměr nádrže je 180 cm a její výška je 220 cm. Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 6 konfigurací (Tab. 5). Jednotlivé experimenty se liší v počtu palivových tyčí, hladiny moderátoru, roztečí a koncentrací kyseliny borité. Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži u prvních tří konfigurací rozteč 1,0 cm, zbylé experimenty mají rozteč 1,3 cm. Průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 180 cm. Spodní reflektor se skládá ze dvou částí. První část reflektoru se skládá z ocelové nosné desky s tloušťkou 3,5 cm a druhá část se skládá z vrstvy vody s kyselinou boritou s tloušťkou 20 cm. Celková výška modelu je 87,5 cm. Experimenty používají palivové proutky s obohacením 5 % (Obr. č. 25). Průměr mřížkové desky není určen. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 0,5 cm. Desky jsou z hliníkové slitiny. Otvory v horních a spodních deskách mají průměr 0,61 cm. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 26). Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven $1,000 \pm 0,003$. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl stanoven na $1,0000 \pm 0,0072$ pro konfigurace 1-3 a pro 4-6 je koeficient $1,0000 \pm 0,0050$. [9]



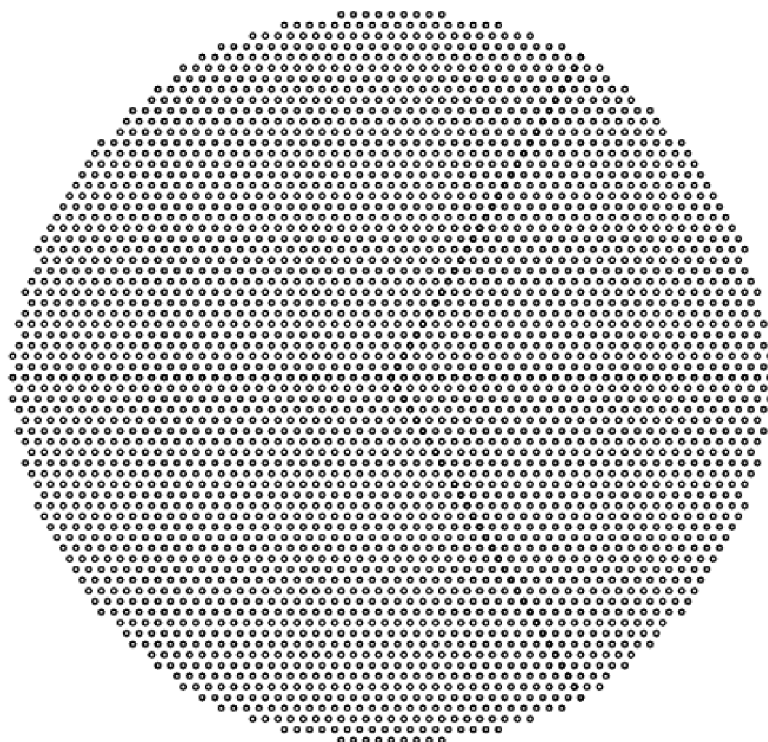
Obr. č. 23: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT021 [9]



Obr. č. 24: Schéma uložení palivového proutku do aktivní zóny LCT021 [9]



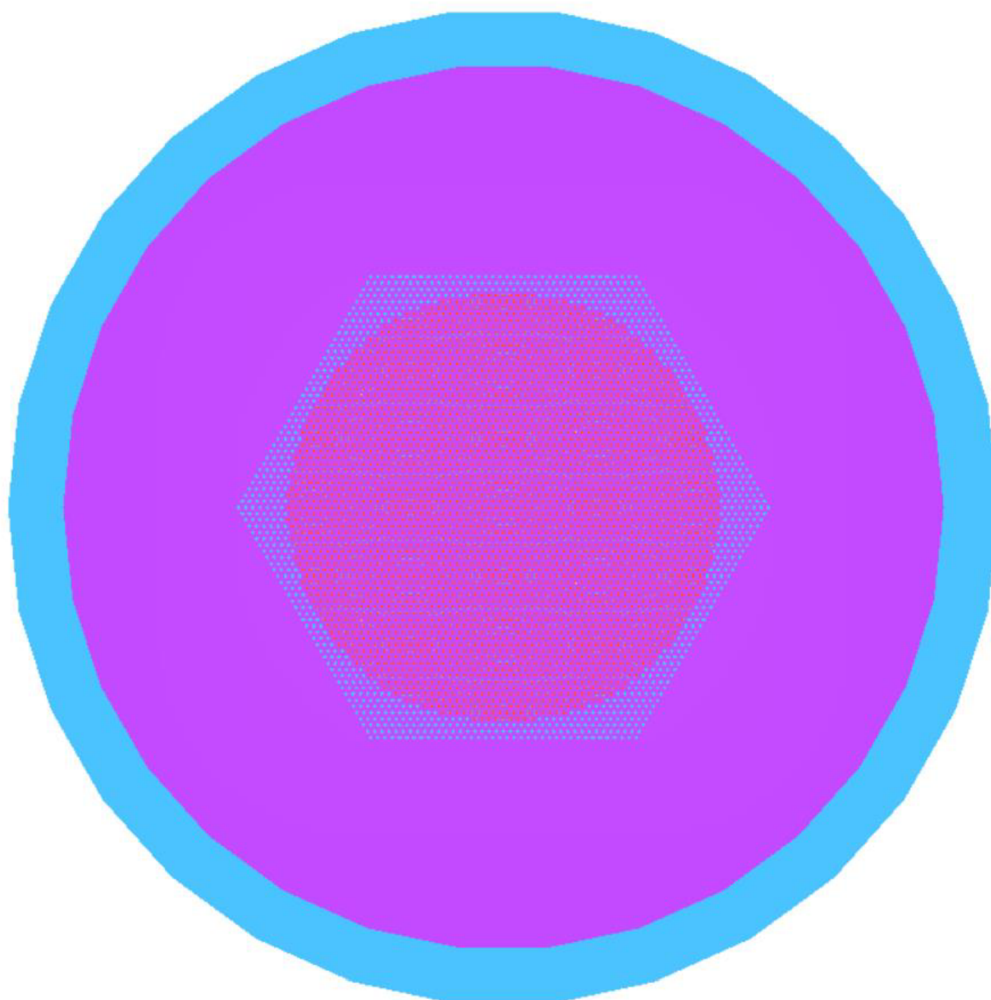
Obr. č. 25: Rozměry palivového proutku LCT021 [9]



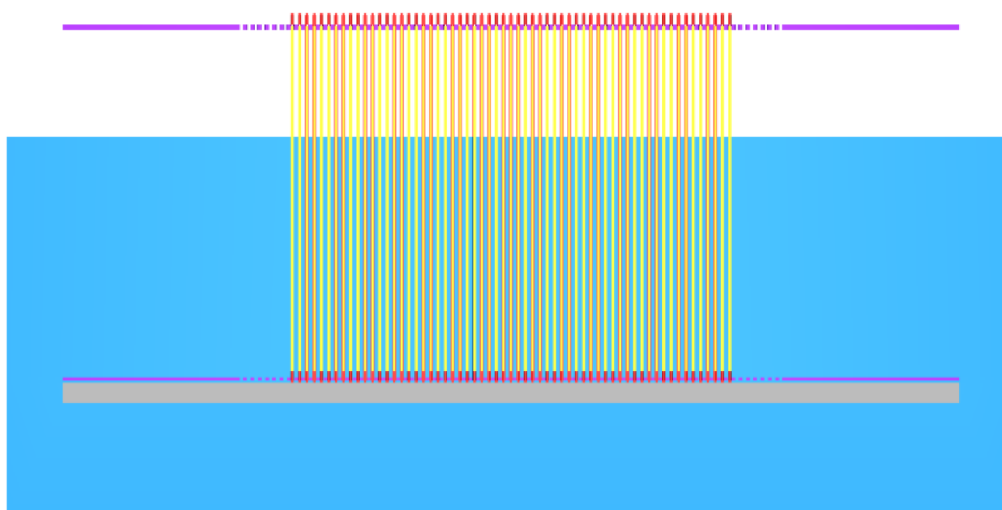
Obr. č. 26: Mapa 4. kritické konfigurace LCT021 [9]

Tab. 5: Kritické konfigurace LCT021 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)	Rozeč palivových proutků (cm)	Koncentrace kyseliny borité (gH ₃ BO ₃ /l)
1	2612	40,52 ± 0,1	1,0	3,15 ± 0,20
2	2300	45,47 ± 0,1	1,0	3,15 ± 0,20
3	2128	49,74 ± 0,1	1,0	3,15 ± 0,20
4	3267	40,59 ± 0,1	1,3	2,36 ± 0,15
5	2865	43,40 ± 0,1	1,3	2,36 ± 0,15
6	2307	49,93 ± 0,1	1,3	2,36 ± 0,15



Obr. č. 27: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT021



Obr. č. 28: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT021

Tab. 6: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT021 [9]

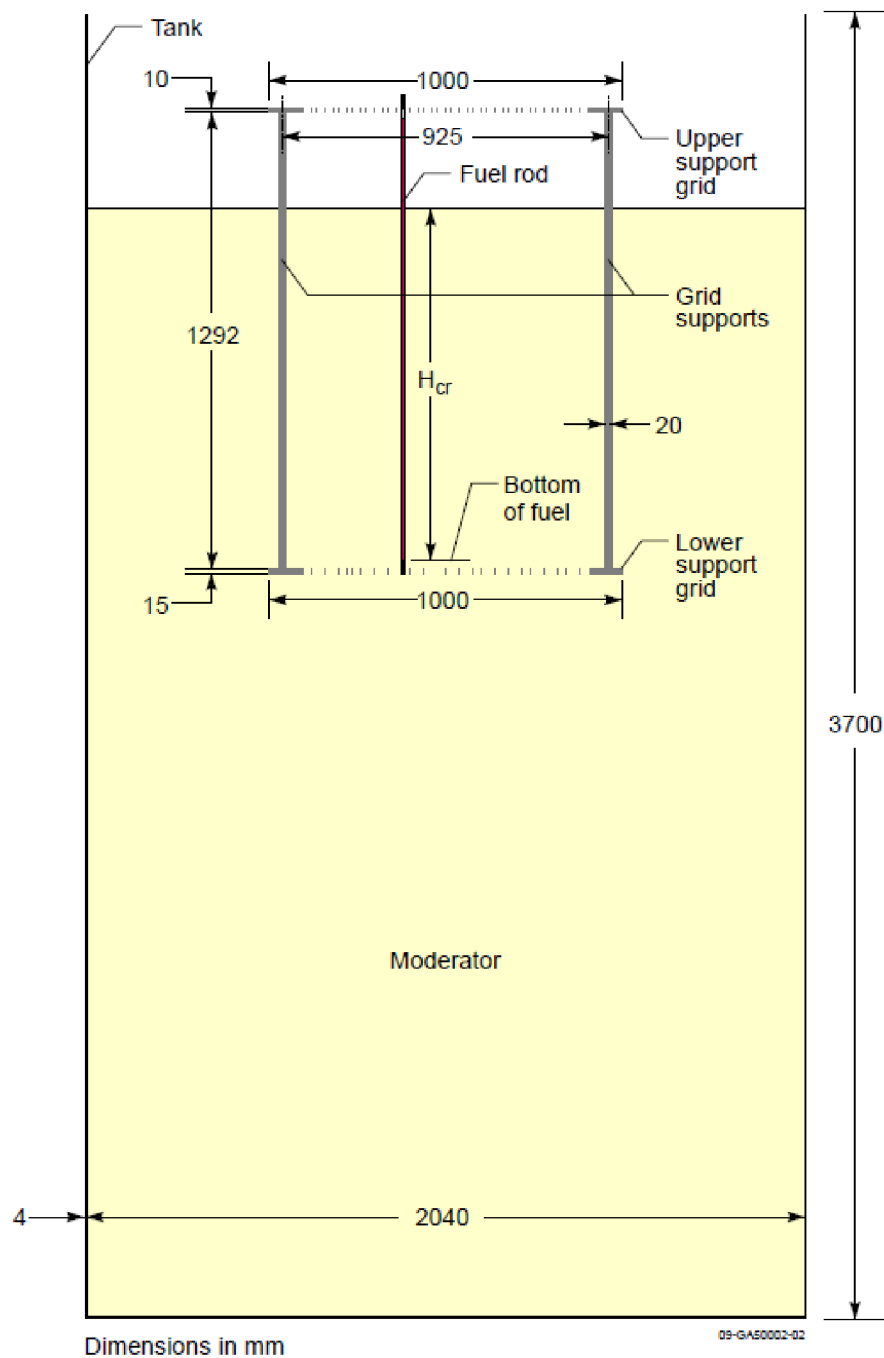
Výpočetní kód →	MCNP	KENOV.a
Knihovna →	Continous-Energy ENDF/B-V	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0090 ± 0,0012	1,01208 ± 0,00020
2	1,0095 ± 0,0011	1,01206 ± 0,00020
3	1,0098 ± 0,0012	1,01206 ± 0,00021
4	1,0121 ± 0,0012	1,01204 ± 0,00019
5	1,0059 ± 0,0011	1,01246 ± 0,00019
6	1,0087 ± 0,0012	1,01198 ± 0,00020

Na (Obr. č. 27) a (Obr. č. 28) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsal do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

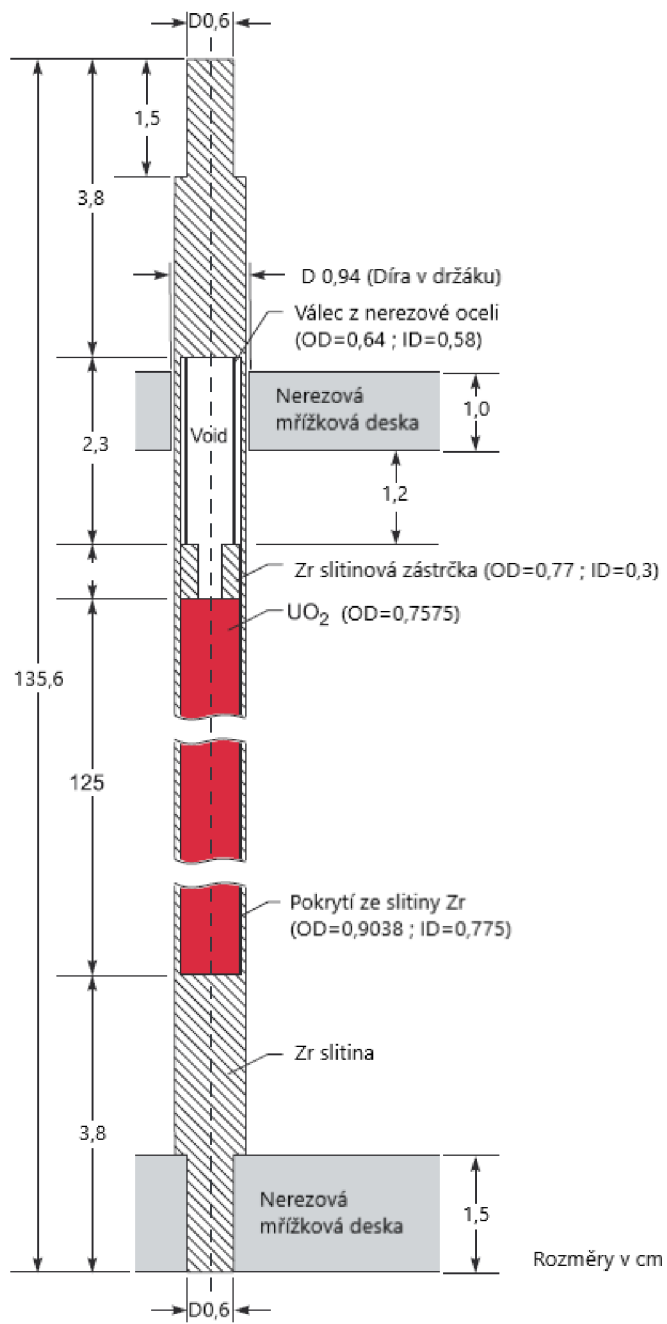
4.2.3 LEU-COMP-THERM-030

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení SF-9 (Obr. č. 29). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 12 konfigurací (Tab. 7). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,27 cm a průměr modeluje ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 30 cm. Celková výška modelu je 165,6 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 30). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Otvory v horních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 3,5 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 31).

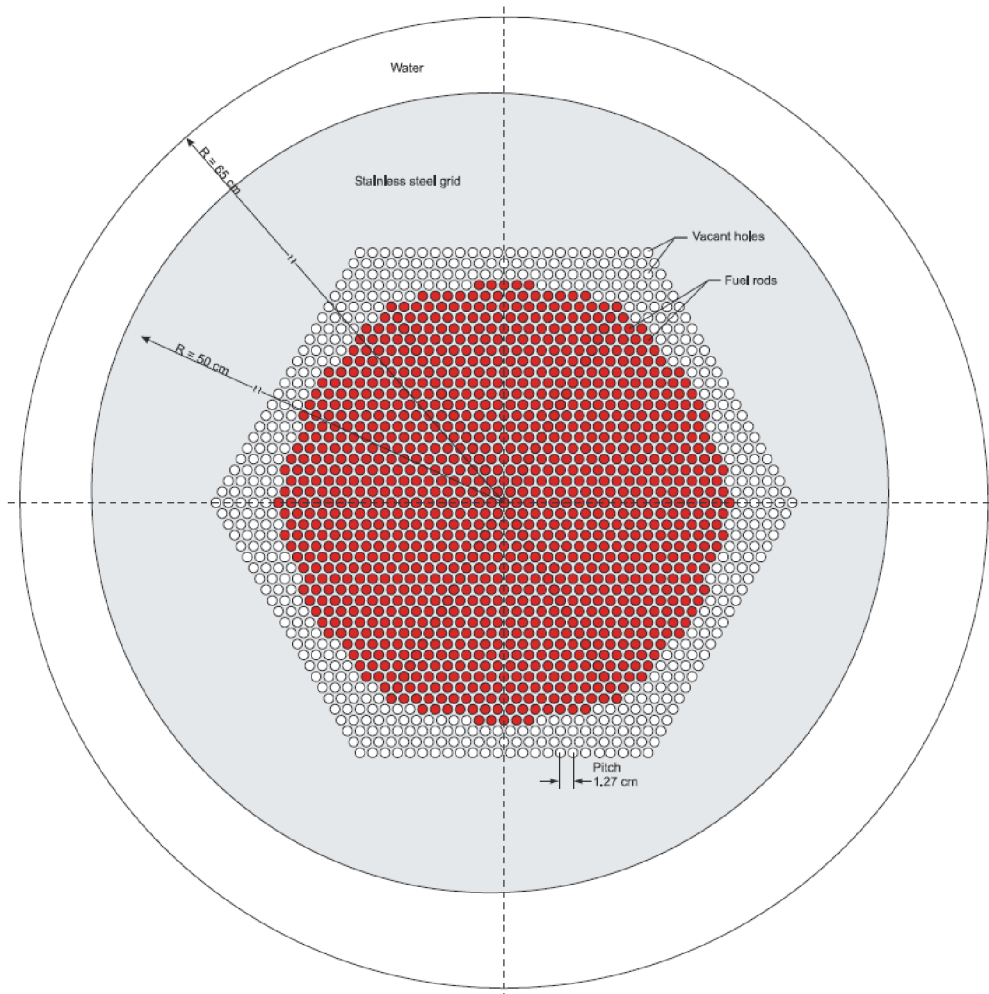
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0006 \pm 0,0018$ pro všech 12 konfigurací. [9]



Obr. č. 29: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT030 [9]



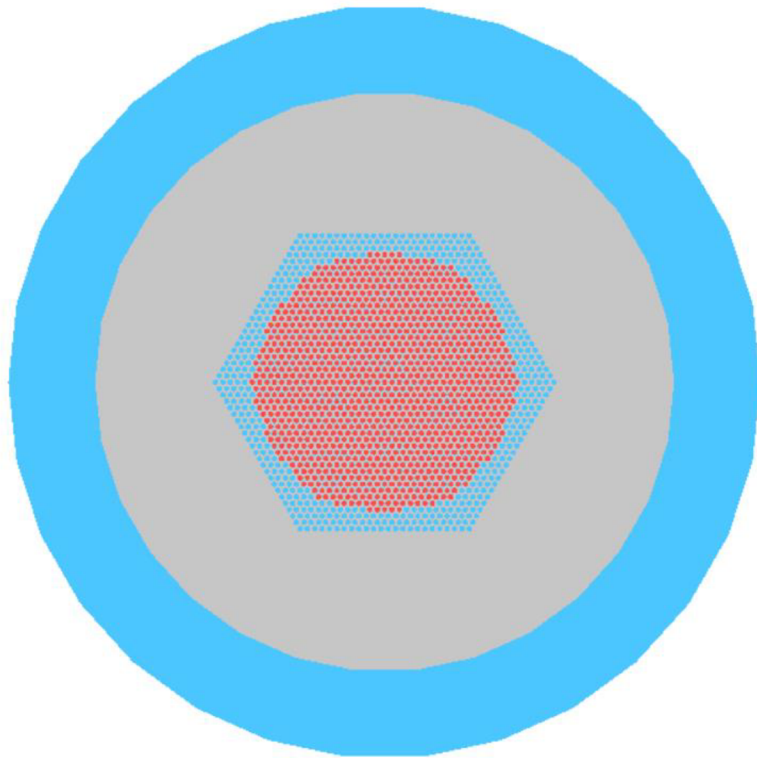
Obr. č. 30: Rozměry palivového proutku LCT030 [9]



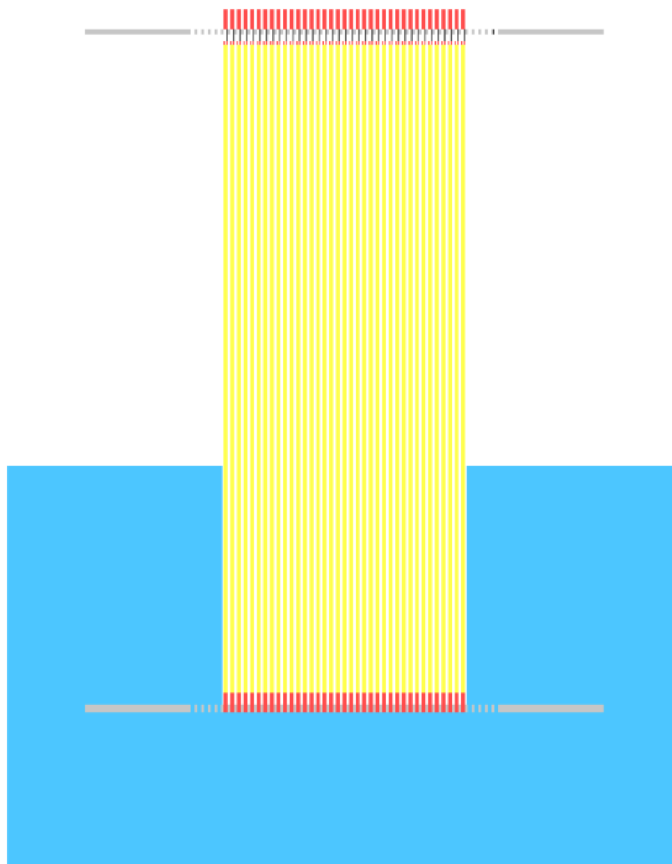
Obr. č. 31: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT030 [9]

Tab. 7: Kritické konfigurace LCT030 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	1897	30,68
2	1495	35,31
3	1357	37,88
4	1141	43,81
5	931	55,15
6	823	67,23
7	793	72,52
8	769	78,03
9	745	85,66
10	727	94,00
11	709	104,60
12	691	117,89



Obr. č. 32: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT030



Obr. č. 33: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT030

Tab. 8: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT030 [9]

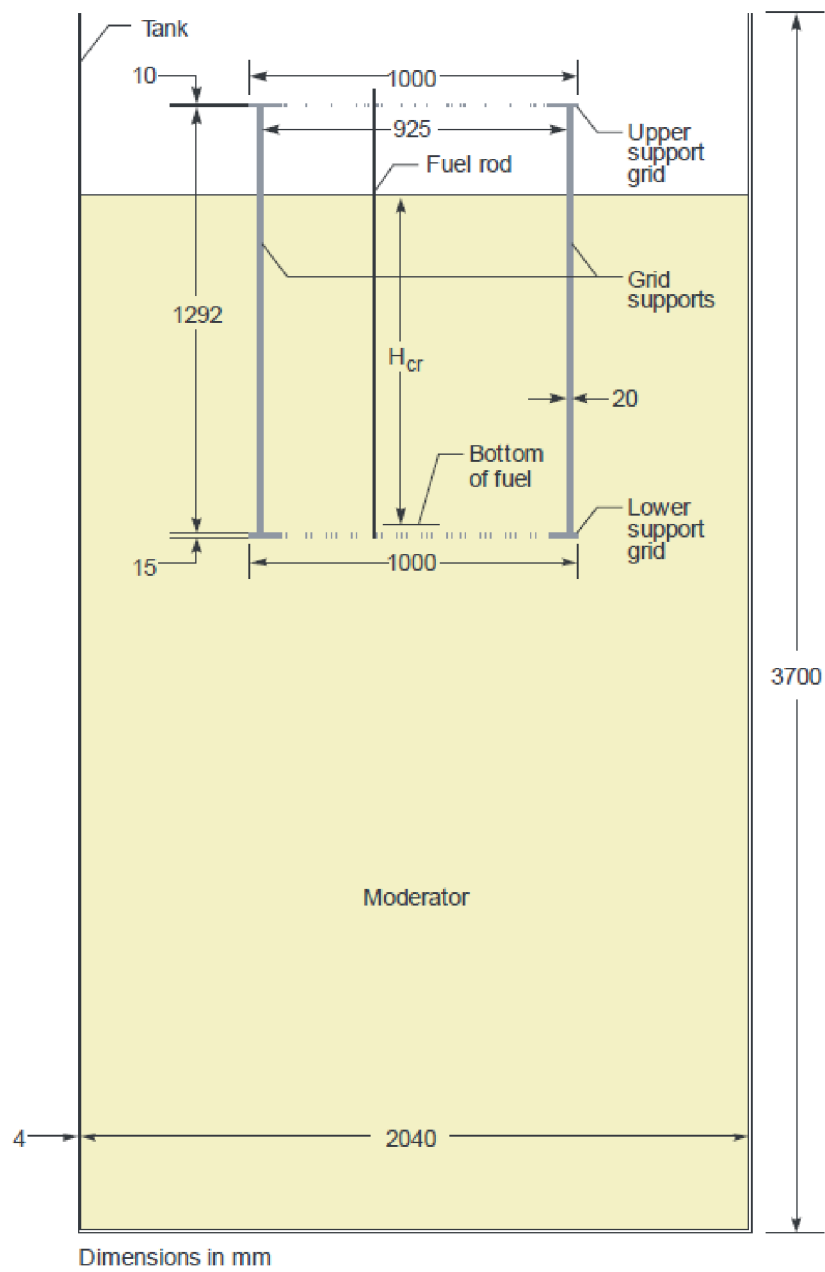
Výpočetní kód →	MCU-REA	MONKA9A(RU1)	MONKA9A(RU1)	KENOV.a	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.2	Continous Energy JEF2.2	Continous Energy JEF3.1	Continous-Energy ENDF/B-VII.0	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0055 ± 0,0006	1,0142 ± 0,0003	1,0143 ± 0,0003	1,0158 ± 0,0001	1,01639 ± 0,00020
2	1,0059 ± 0,0006	1,0144 ± 0,0003	1,0147 ± 0,0003	1,0160 ± 0,0001	1,01629 ± 0,00019
3	1,0074 ± 0,0006	1,0143 ± 0,0003	1,0142 ± 0,0003	1,0160 ± 0,0001	1,01572 ± 0,00018
4	1,0055 ± 0,0006	1,0127 ± 0,0003	1,0130 ± 0,0003	1,0149 ± 0,0001	1,01490 ± 0,00019
5	1,0030 ± 0,0006	1,0099 ± 0,0003	1,0105 ± 0,0003	1,0126 ± 0,0001	1,01250 ± 0,00021
6	1,0012 ± 0,0006	1,0083 ± 0,0003	1,0081 ± 0,0003	1,0101 ± 0,0001	1,01015 ± 0,00020
7	1,0001 ± 0,0006	1,0071 ± 0,0003	1,0073 ± 0,0003	1,0095 ± 0,0001	1,00948 ± 0,00020
8	1,0003 ± 0,0006	1,0059 ± 0,0003	1,0064 ± 0,0003	1,0086 ± 0,0001	1,00847 ± 0,00019
9	0,9990 ± 0,0006	1,0059 ± 0,0003	1,0069 ± 0,0003	1,0086 ± 0,0001	1,00870 ± 0,00019
10	0,9994 ± 0,0006	1,0065 ± 0,0003	1,0064 ± 0,0003	1,0086 ± 0,0001	1,00846 ± 0,00020
11	0,9989 ± 0,0006	1,0067 ± 0,0003	1,0078 ± 0,0003	1,0094 ± 0,0001	1,00891 ± 0,00018
12	0,9986 ± 0,0006	1,0057 ± 0,0003	1,0057 ± 0,0003	1,0079 ± 0,0001	1,00779 ± 0,00018

Na (Obr. č. 32) a (Obr. č. 33) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsál do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

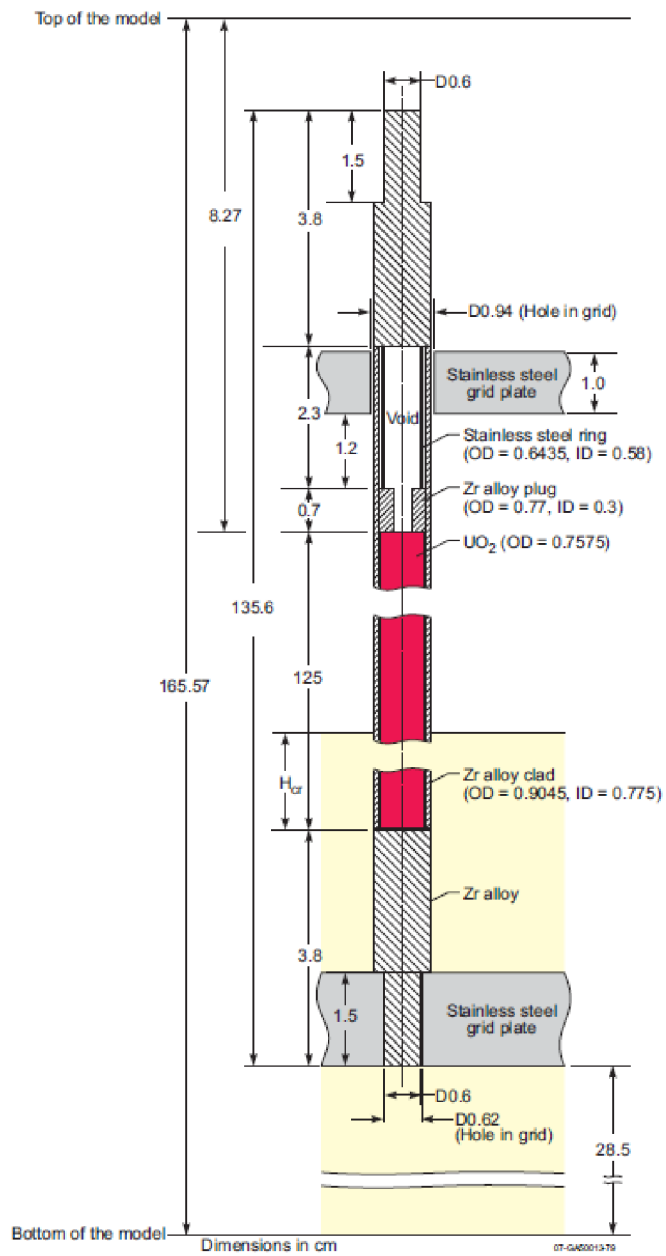
4.2.4 LEU-COMP-THERM-053

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení SF-9 (Obr. č. 34). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 14 konfigurací (Tab. 9). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,27 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 35). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Otvory v horních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 4,4 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 36).

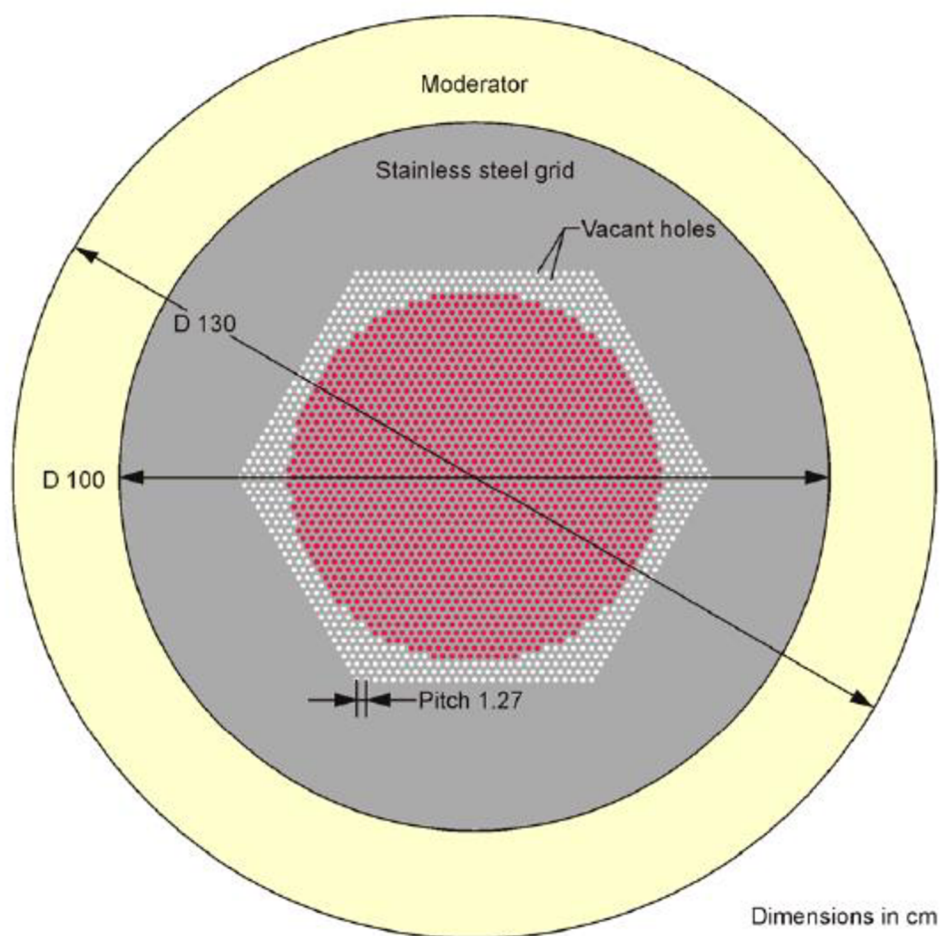
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0005 \pm 0,0016$ pro všech 14 konfigurací. [9]



Obr. č. 34: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT053 [9]



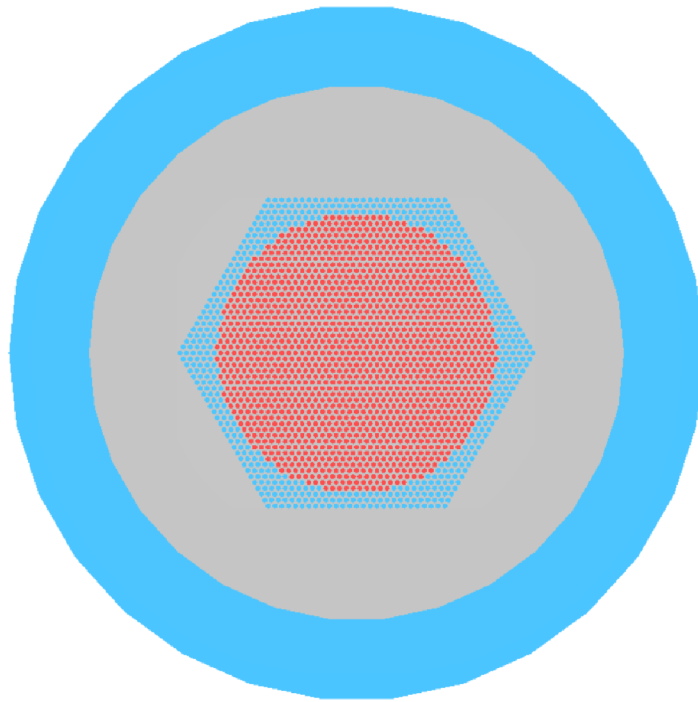
Obr. č. 35: Rozměry palivového proutku LCT053 [9]



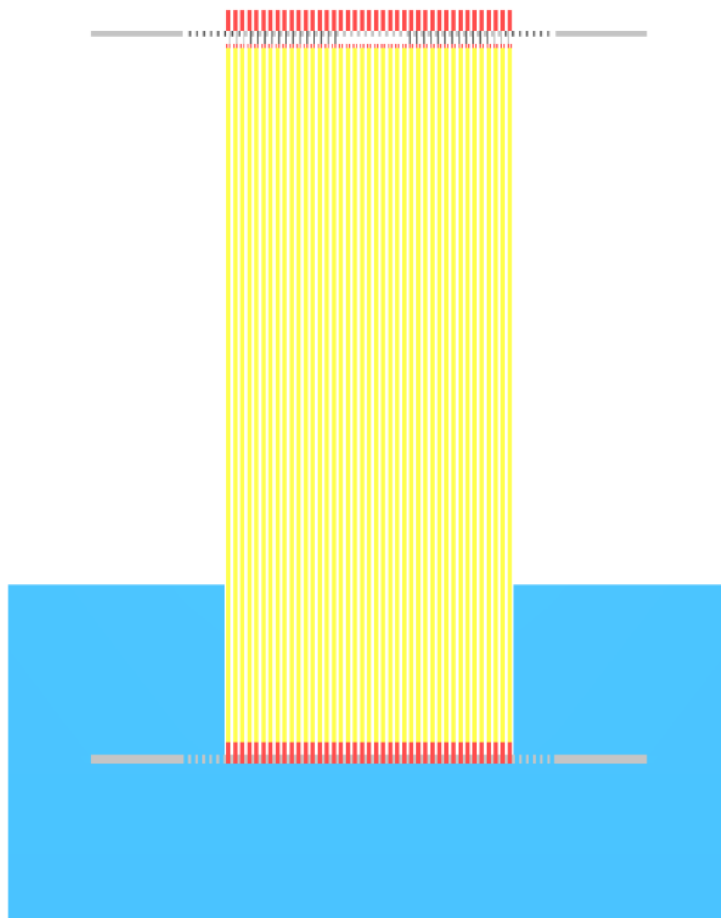
Obr. č. 36: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT053 [9]

Tab. 9: Kritické konfigurace LCT053 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	2683	22,16
2	2395	22,88
3	1939	25,05
4	1531	28,24
5	1189	33,12
6	1123	34,33
7	955	39,90
8	847	44,53
9	745	54,47
10	721	55,10
11	685	63,75
12	637	77,06
13	619	79,56
14	601	93,19



Obr. č. 37: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT053



Obr. č. 38: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT053

Tab. 10: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT053 [9]

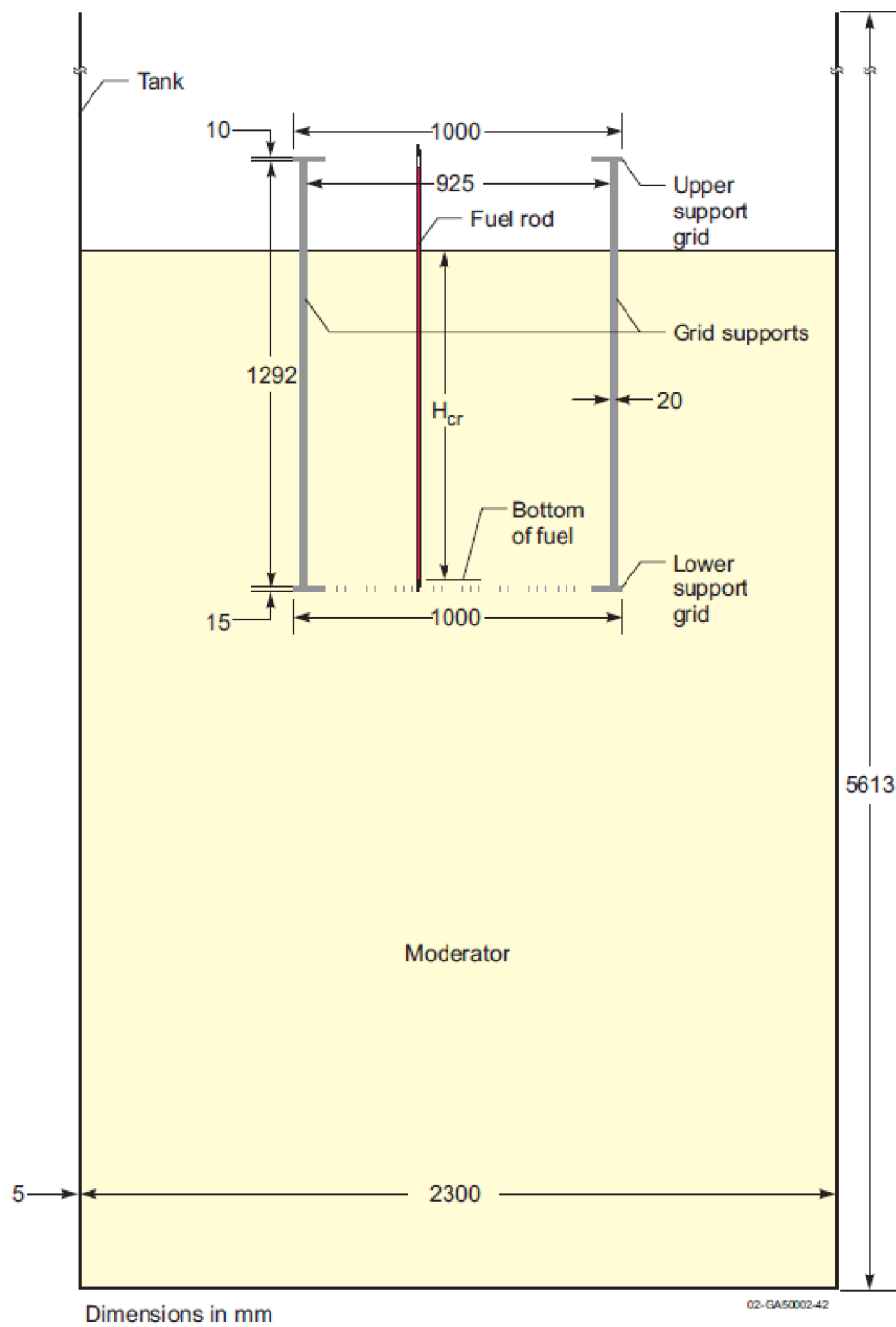
Výpočetní kód →	MCU-REA	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.1	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0023 ± 0,0006	1,00707 ± 0,00019
2	0,9995 ± 0,0006	1,00425 ± 0,00020
3	1,0004 ± 0,0006	1,00535 ± 0,00022
4	0,9999 ± 0,0006	1,00622 ± 0,00019
5	1,0004 ± 0,0006	1,00685 ± 0,00018
6	1,0000 ± 0,0006	1,00582 ± 0,00019
7	1,0015 ± 0,0006	1,00740 ± 0,00025
8	0,9997 ± 0,0006	1,00511 ± 0,00018
9	1,0009 ± 0,0006	1,00783 ± 0,00020
10	0,9965 ± 0,0006	1,00522 ± 0,00021
11	1,0003 ± 0,0006	1,00772 ± 0,00018
12	1,0012 ± 0,0006	1,00869 ± 0,00019
13	0,9966 ± 0,0006	1,00451 ± 0,00019
14	0,9995 ± 0,0006	1,00712 ± 0,00017

Na (Obr. č. 37) a (Obr. č. 38) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsal do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

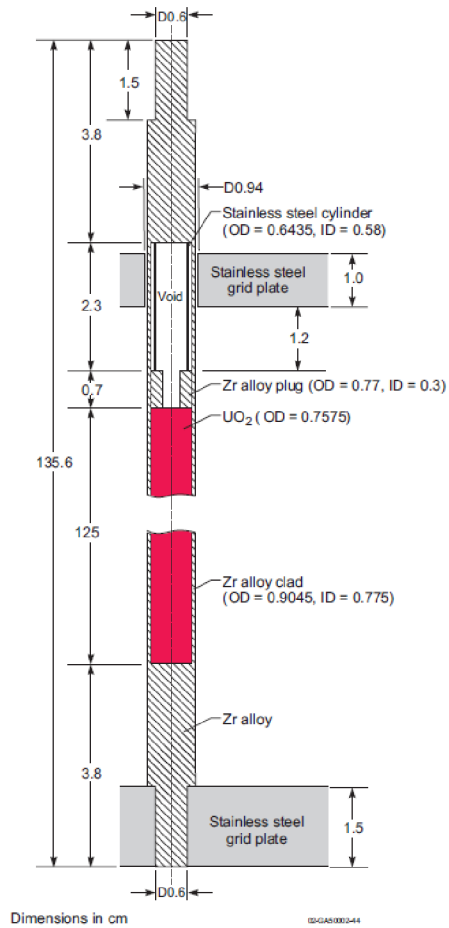
4.2.5 LEU-COMP-THERM-061

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení P (Obr. č. 39). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 10 konfigurací (Tab. 11). V prvních osmi experimentech byly použité absorbery z bóru, hafnia a dysprosia. U devátého a desátého experimentu byla palivová mříž narušená vodní mezerou s nebo bez hliníkových trubek. Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,27 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 40) a absorbery na (Obr. č. 41). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Otvory v horních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 4,4 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 42-45).

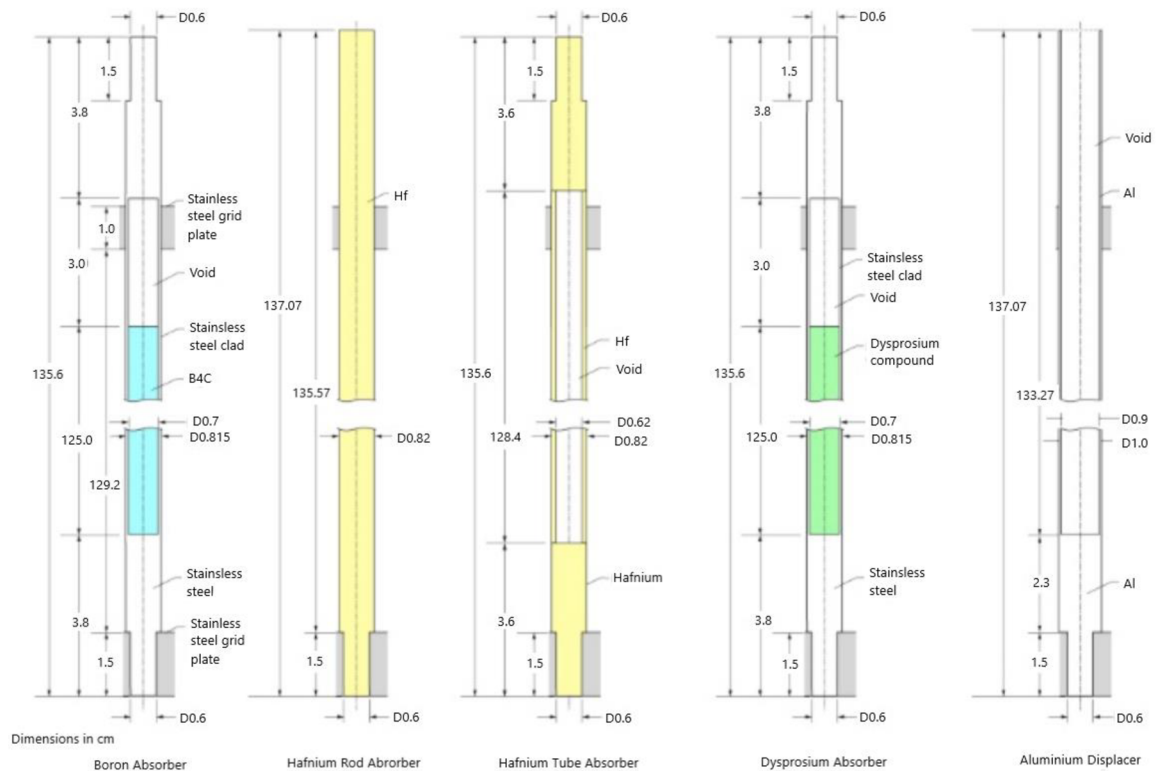
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0005 \pm 0,0023$ pro všech 10 konfigurací. [9]



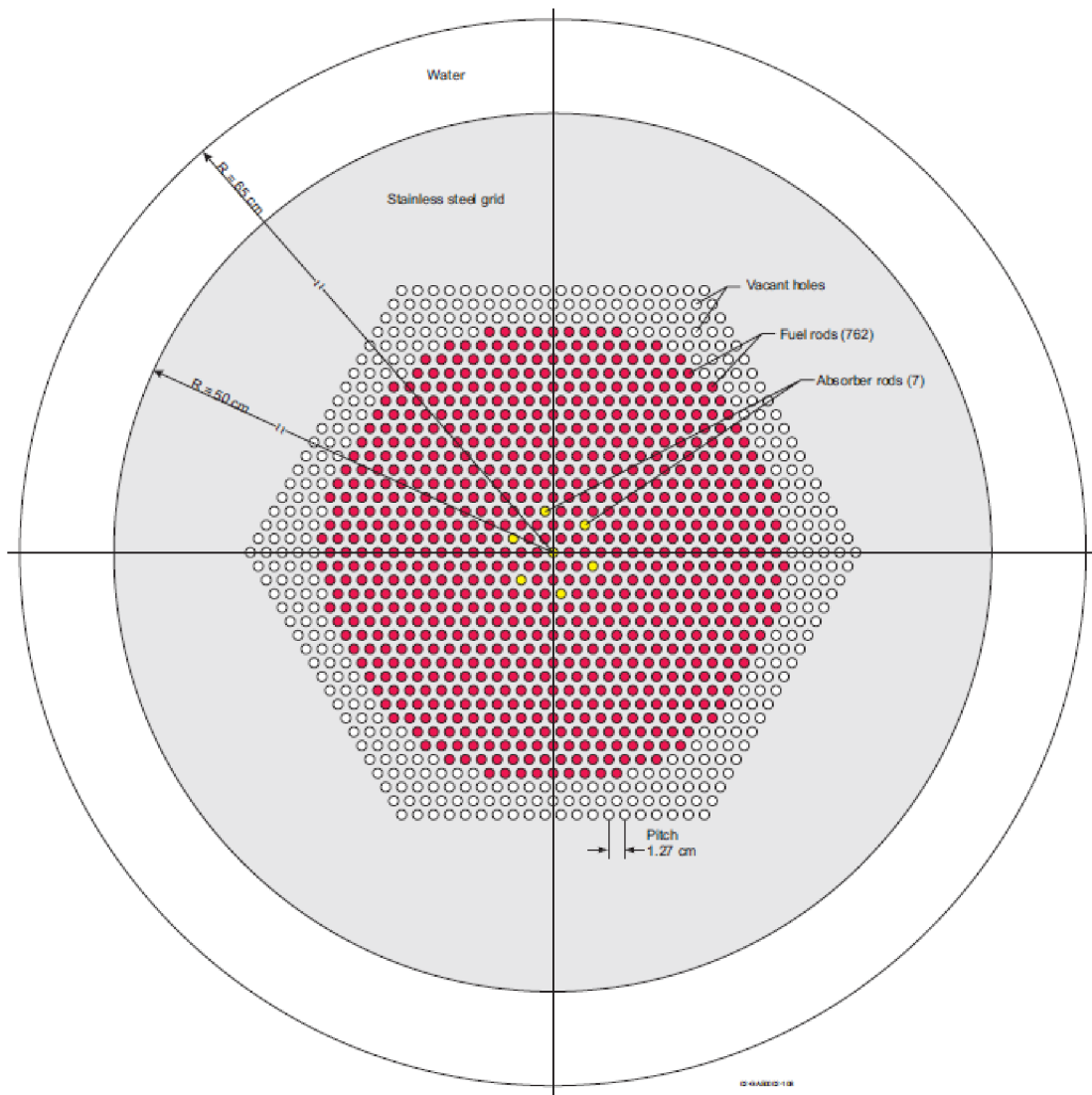
Obr. č. 39: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT061 [9]



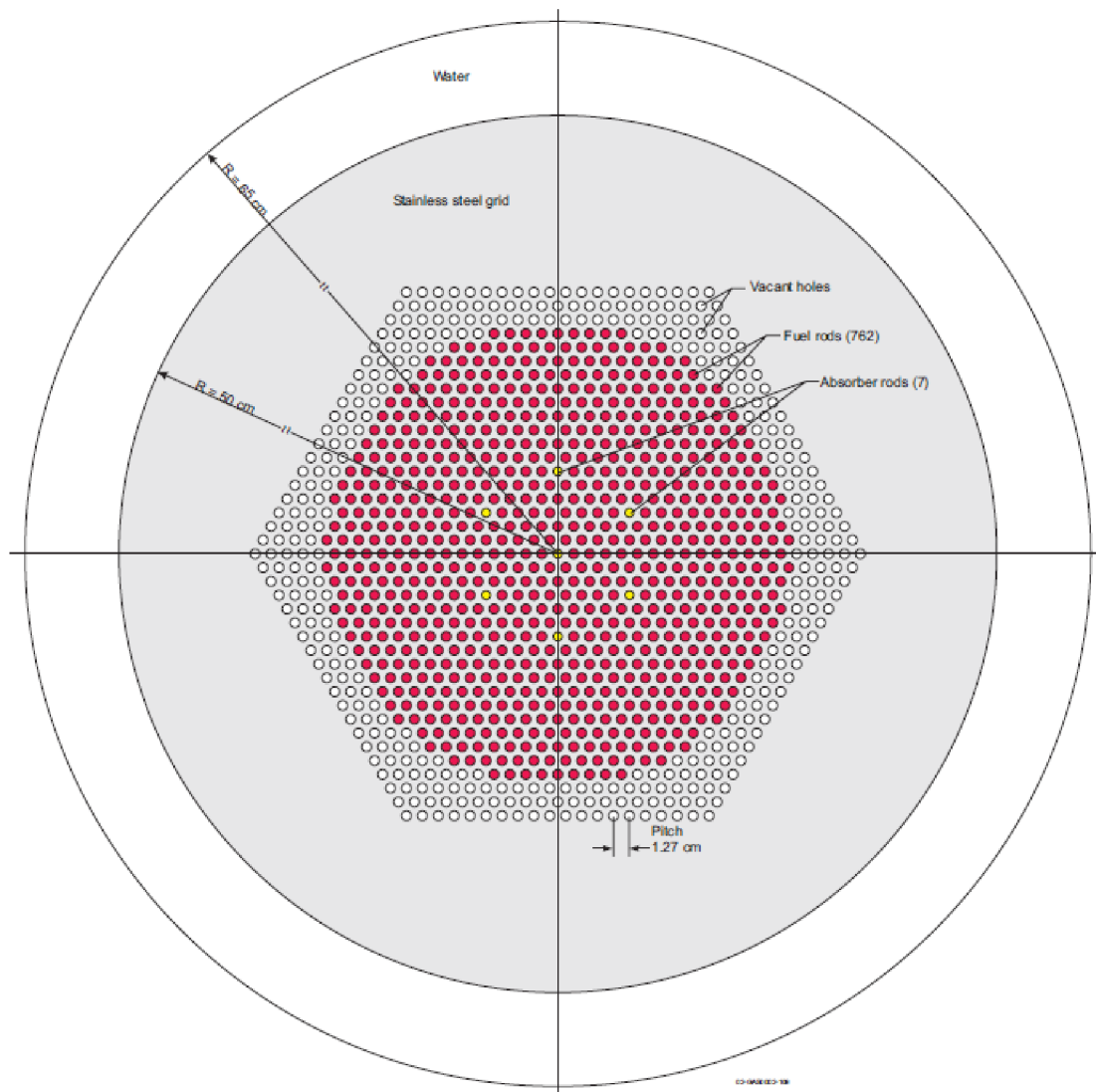
Obr. č. 40: Rozměry palivového proutku LCT061 [9]



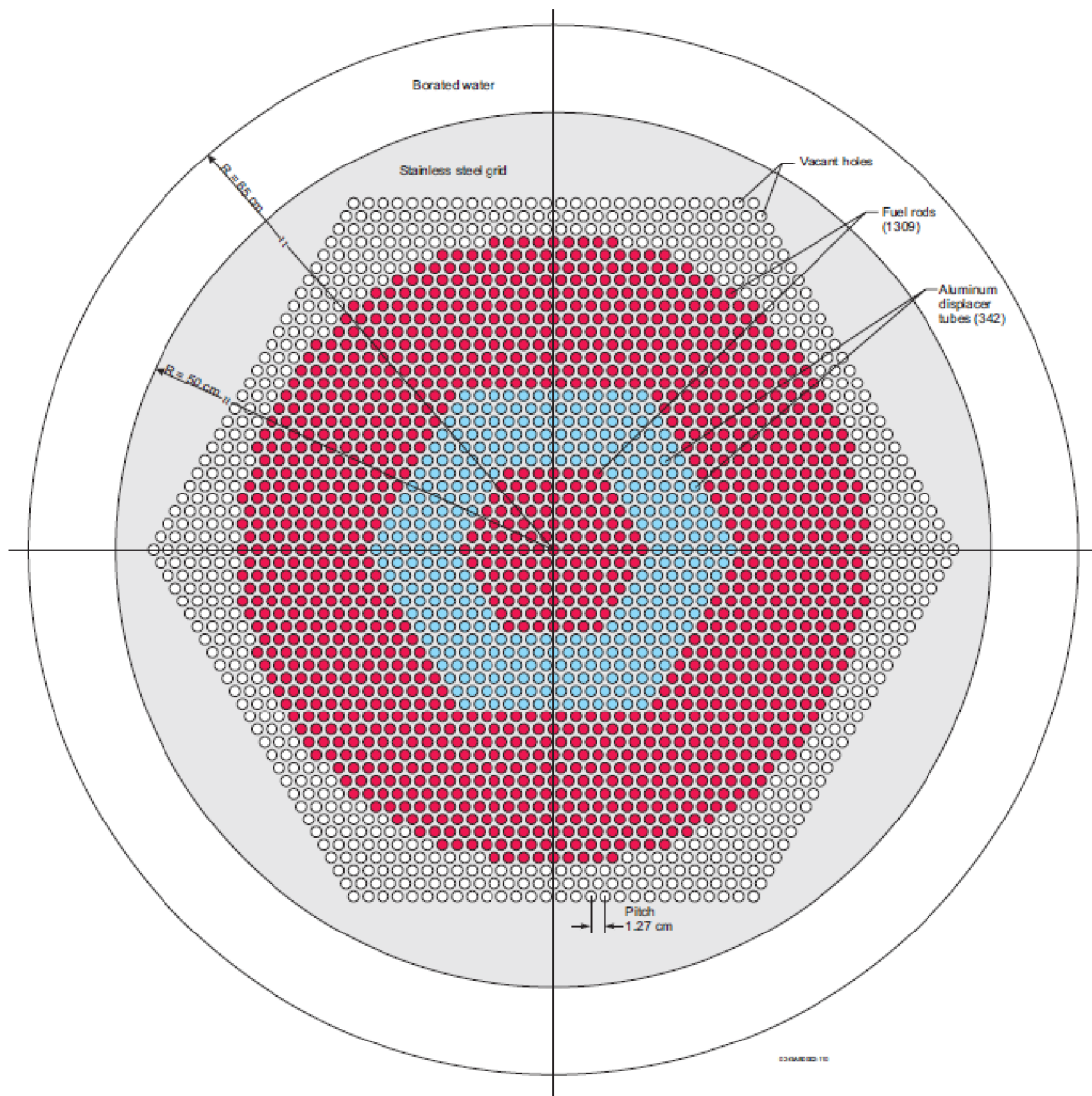
Obr. č. 41: Rozměry absorberů a displaceru LCT061 [9]



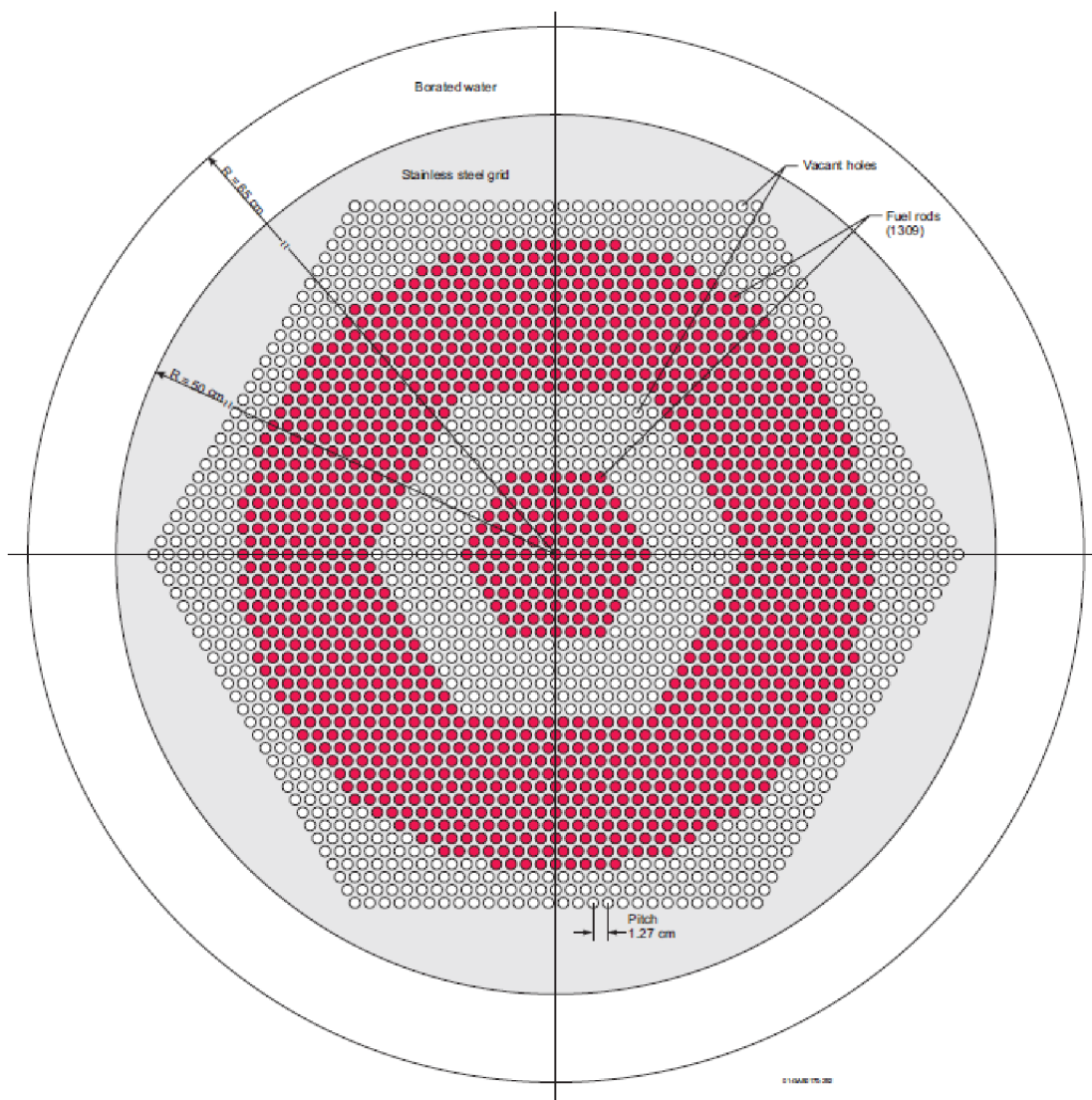
Obr. č. 42: Horizontální řez konfigurace 1, 3, 5 a 7 - LCT061 [9]



Obr. č. 43: Horizontální řez konfigurace 2, 4, 6 a 8 - LCT061 [9]



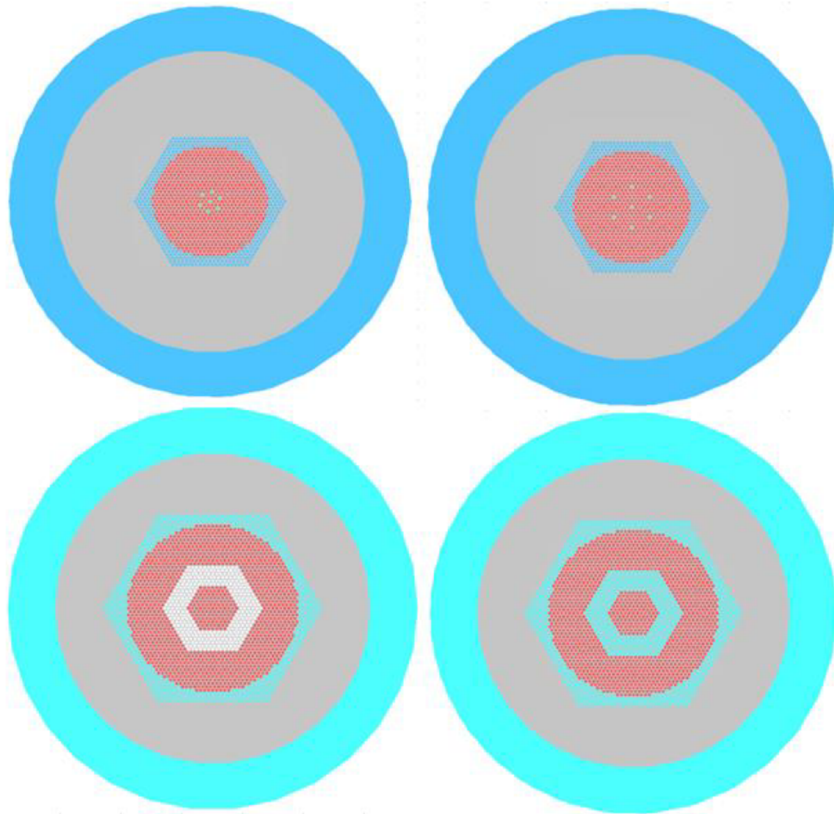
Obr. č. 44: Horizontální řez konfigurace 9 - LCT061 [9]



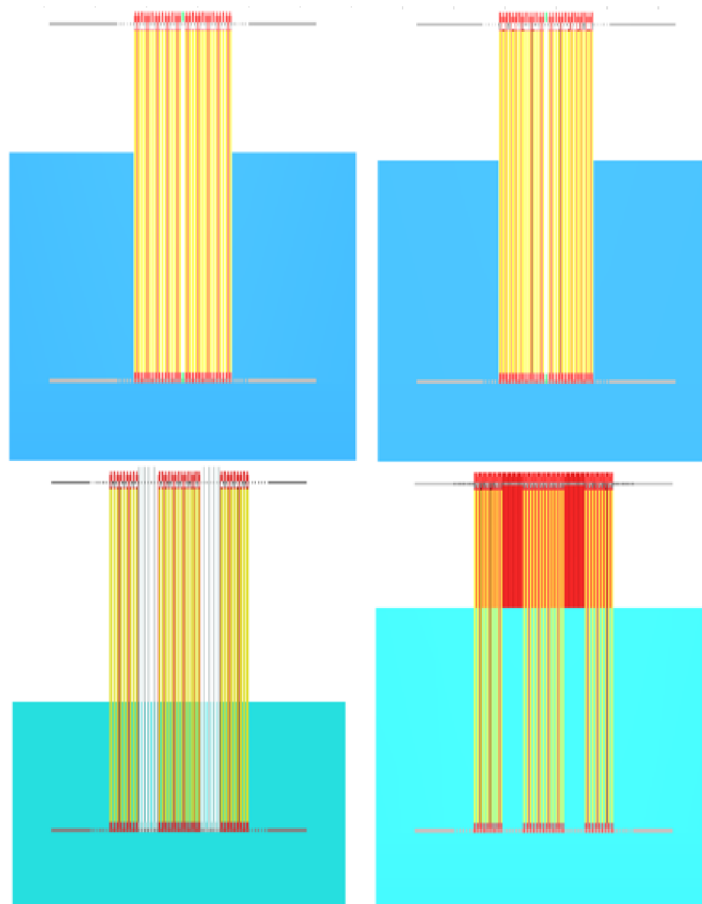
Obr. č. 45: Horizontální řez konfigurace 10 - LCT061 [9]

Tab. 11: Kritické konfigurace LCT061 [9]

Konfigurace	Absorbéry nebo displacer	Výška moderátora H_{cr} (cm)	Moderátor	Uspořádání
1	B ₄ C	96,60	voda	1 (Obr. č. 42)
2	B ₄ C	96,27	voda	2 (Obr. č. 43)
3	Hf _{rod}	91,99	voda	1 (Obr. č. 42)
4	Hf _{rod}	90,48	voda	2 (Obr. č. 43)
5	Hf _{tube}	80,30	voda	1 (Obr. č. 42)
6	Hf _{tube}	77,66	voda	2 (Obr. č. 43)
7	Dy ₂ O ₃ ·TiO ₂	77,32	voda	1 (Obr. č. 42)
8	Dy ₂ O ₃ ·TiO ₂	75,41	voda	2 (Obr. č. 43)
9	Al displacer	45,22	0,500 g/l H ₃ BO ₃ v roztoku	3 (Obr. č. 44)
10	-	80,88	0,510 g/l H ₃ BO ₃ v roztoku	4 (Obr. č. 45)



Obr. č. 46: KENO3D modely pohled shora LCT061



Obr. č. 47: KENO3D modely pohled ze strany LCT061

Tab. 12: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT061 [9]

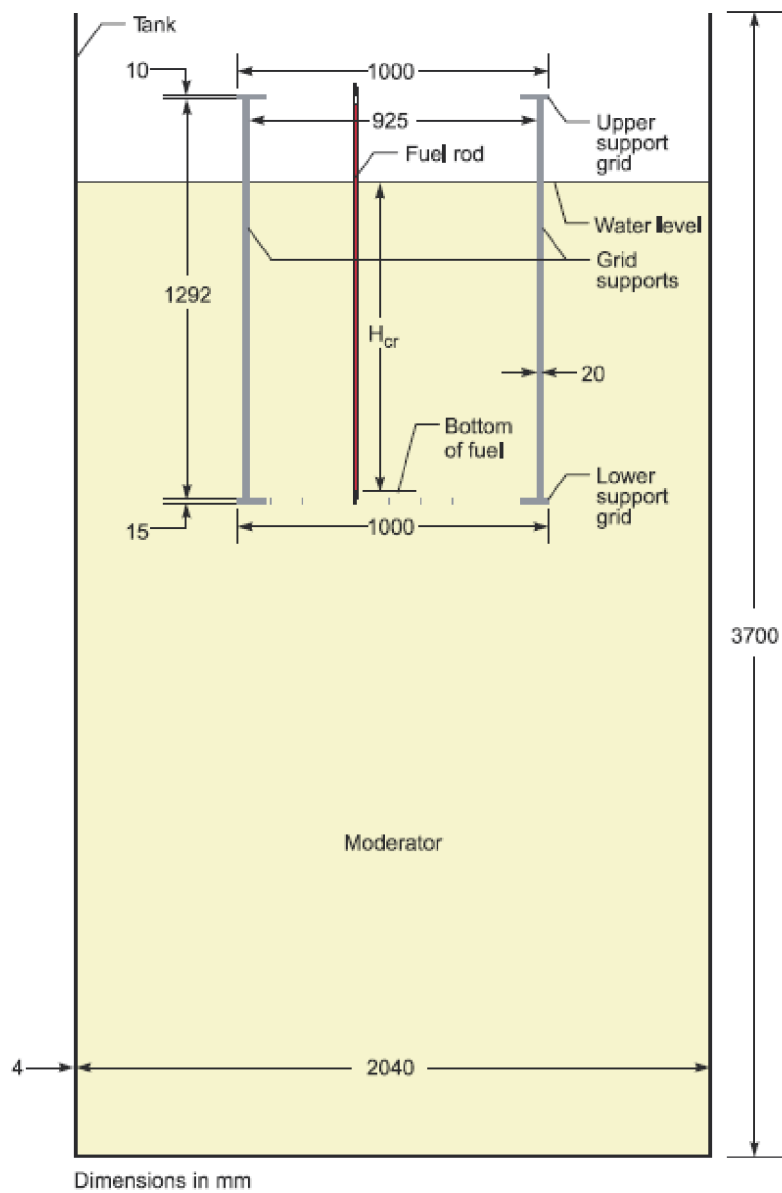
Výpočetní kód →	MCU-REA	KENO	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.1	238-group ENDF/B-V	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0001 ± 0,0006	0,9974 ± 0,0009	1,00403 ± 0,00023
2	0,9997 ± 0,0006	0,9948 ± 0,0007	1,00383 ± 0,00019
3	1,0011 ± 0,0006	0,9972 ± 0,0007	1,00507 ± 0,00018
4	0,9997 ± 0,0006	0,9980 ± 0,0007	1,00427 ± 0,00020
5	1,0032 ± 0,0006	1,0002 ± 0,0006	1,00819 ± 0,00018
6	1,0021 ± 0,0006	0,9986 ± 0,000	1,00700 ± 0,00019
7	1,0011 ± 0,0006	0,9965 ± 0,0008	1,00571 ± 0,00019
8	1,0012 ± 0,0006	0,9961 ± 0,0008	1,00520 ± 0,00018
9	1,0007 ± 0,0006	0,9997 ± 0,0009	1,00529 ± 0,00018
10	0,9980 ± 0,0006	0,9951 ± 0,0009	1,00184 ± 0,00018

Na (Obr. č. 46) a (Obr. č. 47) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsals do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

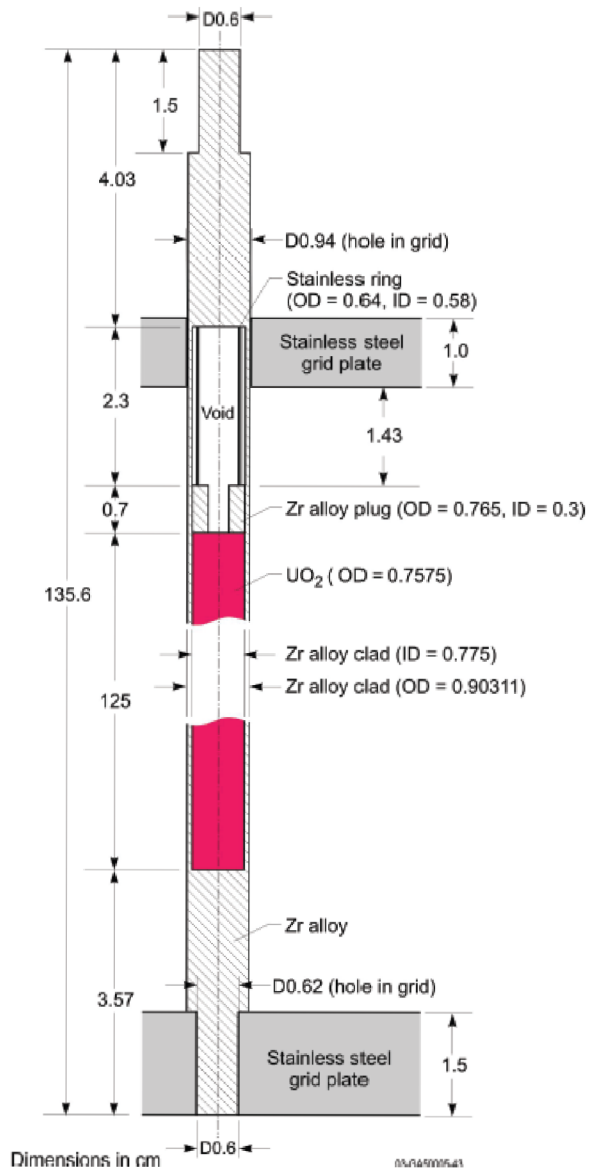
4.2.6 LEU-COMP-THERM-064

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení SF-9 (Obr. č. 48). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 7 konfigurací (Tab. 13). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,27 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 30 cm. Celková výška modelu je 165,6 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 49). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Otvory v horních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 2,4 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 50).

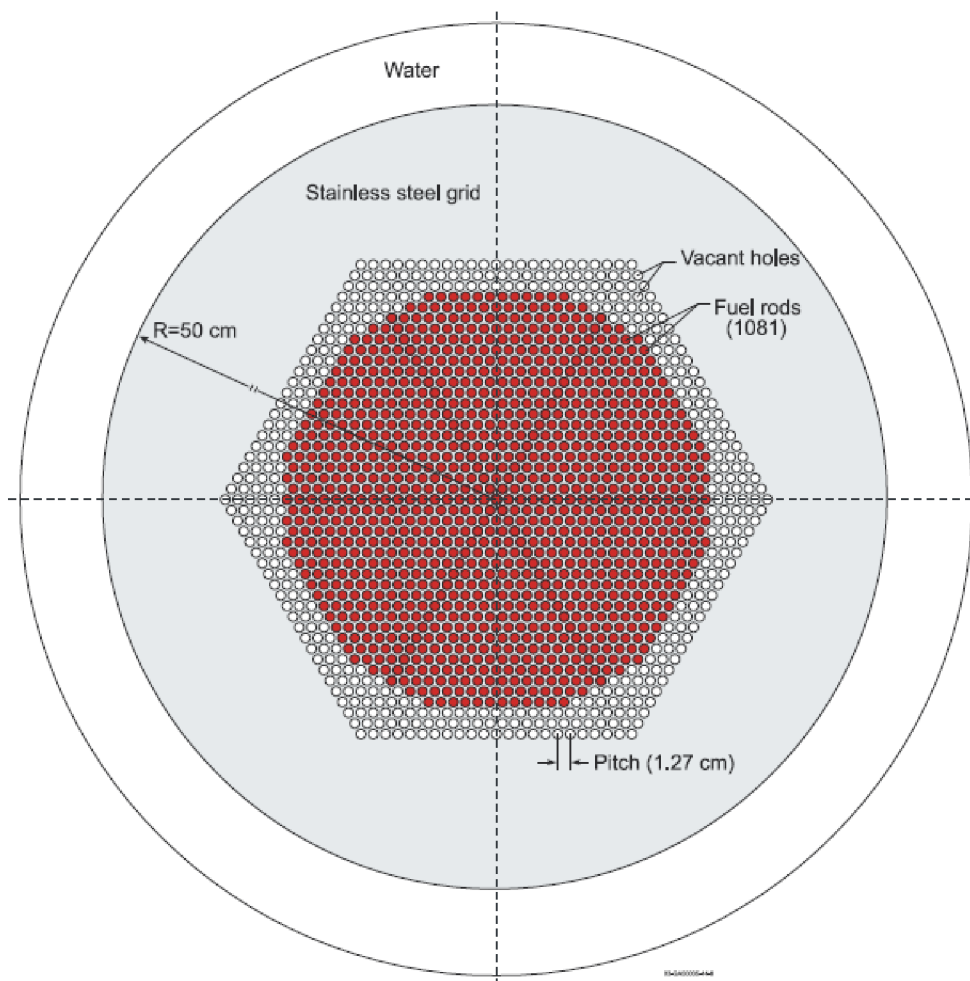
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0009 \pm 0,0028$ pro všech 7 konfigurací. [9]



Obr. č. 48: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT064 [9]



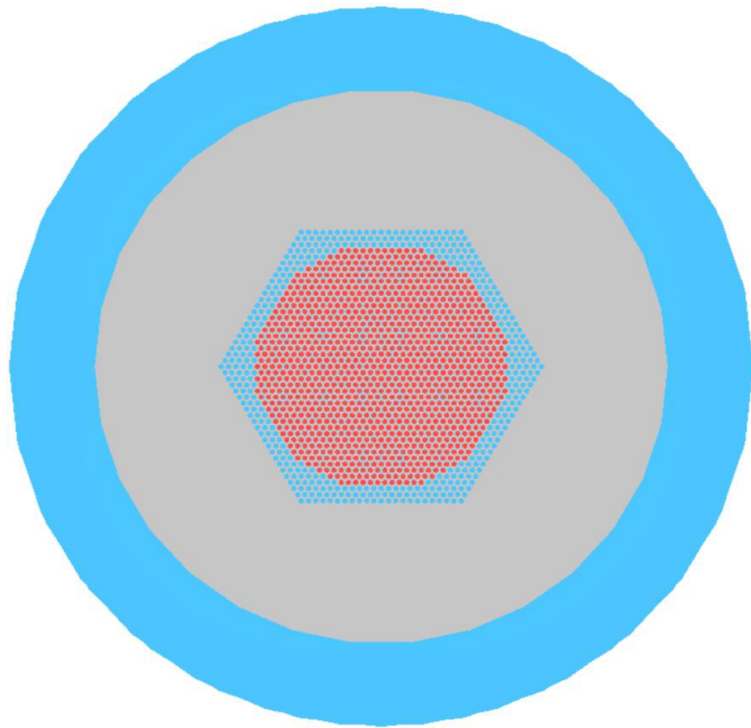
Obr. č. 49: Rozměry palivového proutku LCT064 [9]



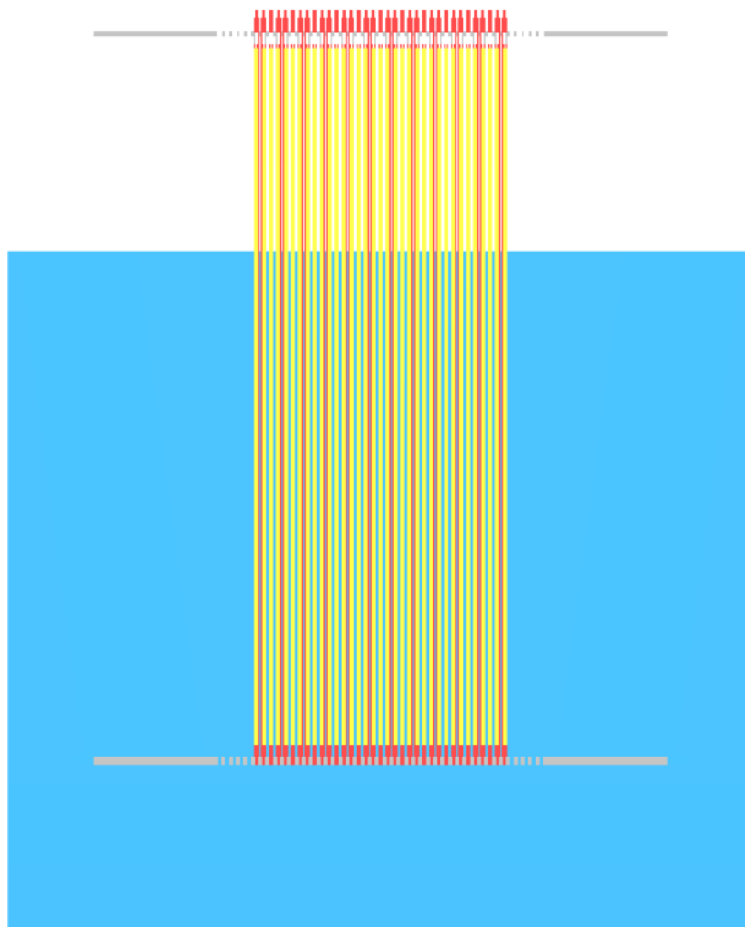
Obr. č. 50: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT064 [9]

Tab. 13: Kritické konfigurace LCT064 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	1897	43,35
2	1495	50,87
3	1135	78,37
4	1081	88,54
5	1057	94,61
6	1039	99,53
7	1021	105,76



Obr. č. 51: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT064



Obr. č. 52: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT064

Tab. 14: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT064 [9]

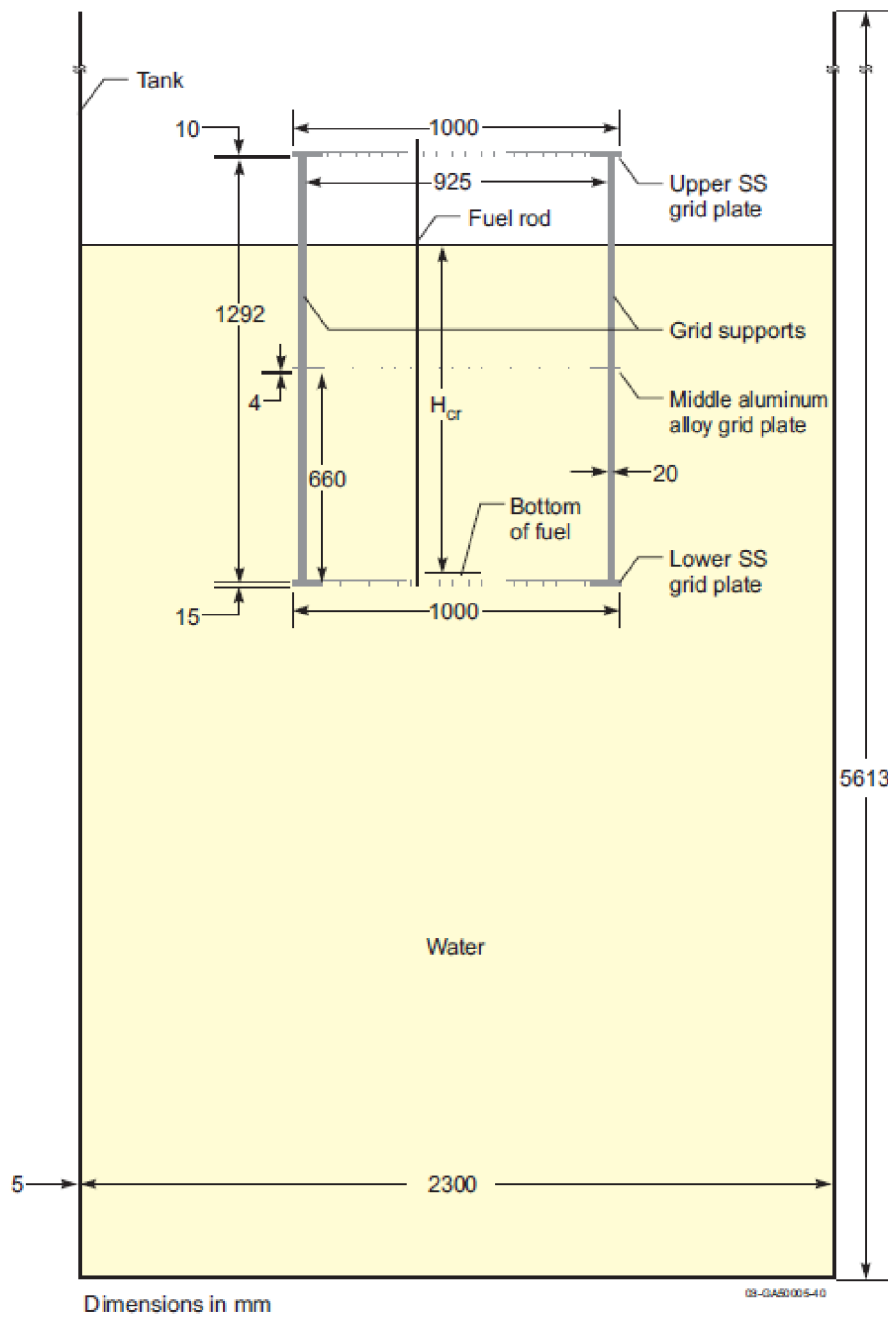
Výpočetní kód →	MCUPD	MCNP5	KENOV.a
Knihovna →	MDBPD50	JENDL3.3	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0074 ± 0,0004	1,01534 ± 0,00022	1,01340 ± 0,00020
2	0,9999 ± 0,0004	1,00802 ± 0,00022	1,00628 ± 0,00018
3	1,0013 ± 0,0004	1,01150 ± 0,00022	1,00730 ± 0,00017
4	1,0008 ± 0,0004	1,01104 ± 0,00023	1,00695 ± 0,00017
5	1,0006 ± 0,0004	1,01150 ± 0,00021	1,00684 ± 0,00018
6	1,0014 ± 0,0004	1,01113 ± 0,00019	1,00672 ± 0,00019
7	1,0002 ± 0,0004	1,01152 ± 0,00021	1,00637 ± 0,00020

Na (Obr. č. 51) a (Obr. č. 52) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsál do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

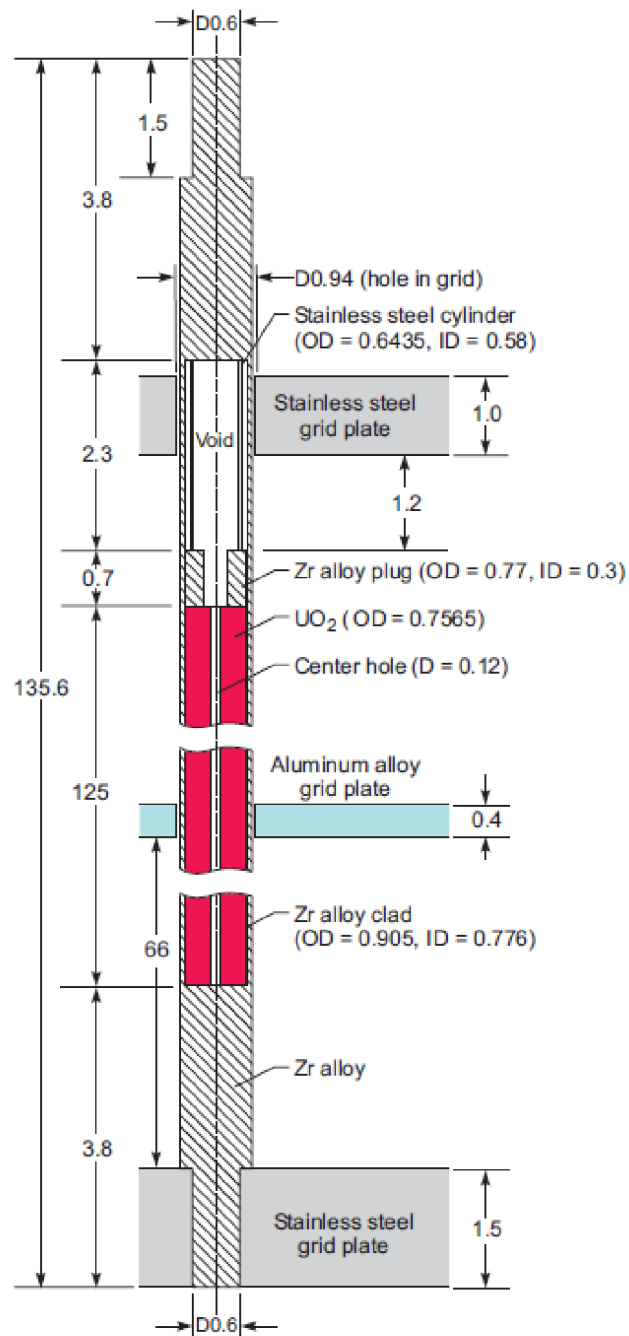
4.2.7 LEU-COMP-THERM-070

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení P (Obr. č. 53). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 12 konfigurací (Tab. 15). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,1 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 54). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Pro zpevnění a udržení tvaru je u experimentů použita střední deska z hliníkové slitiny o tloušťce 0,4 cm. Otvory v horních a středních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 6,5 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 55).

Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0004 \pm 0,0016$ pro všech 12 konfigurací. [9]



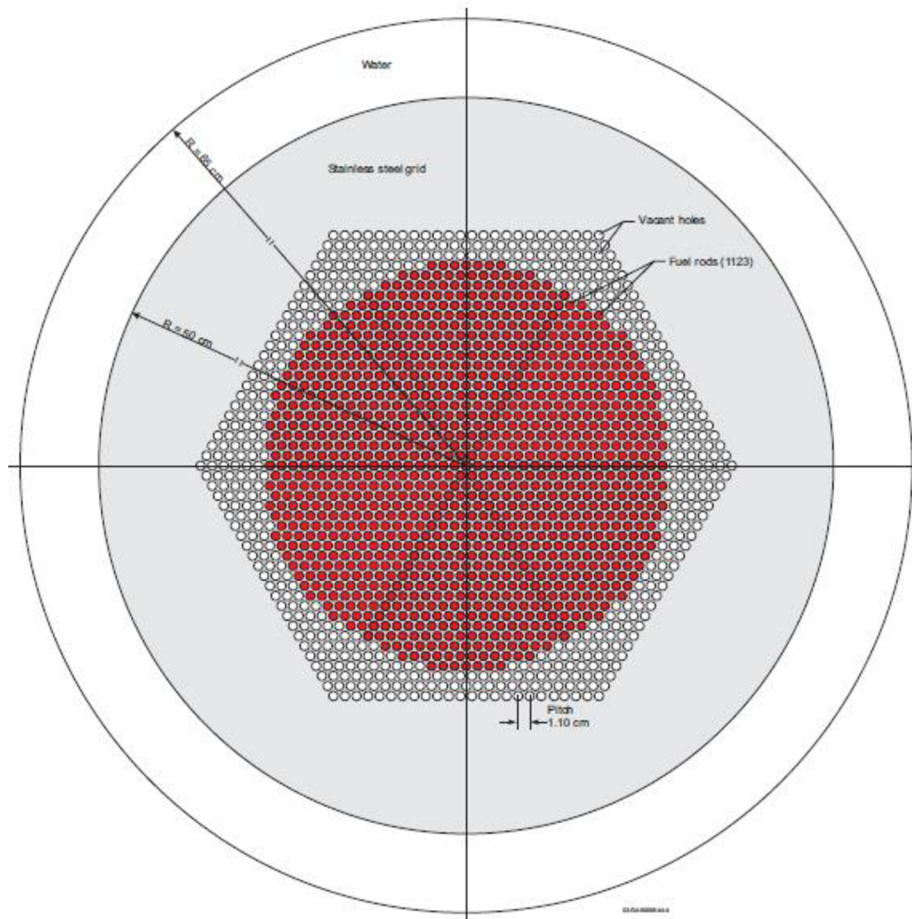
Obr. č. 53: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT070 [9]



Dimensions in cm

03-GA80005-43

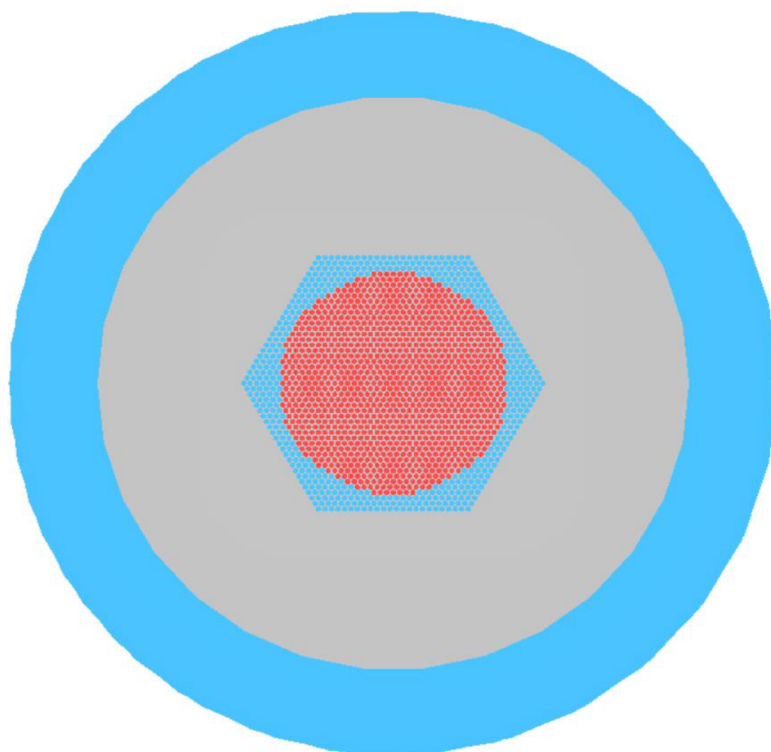
Obr. č. 54: Rozměry palivového proutku LCT070 [9]



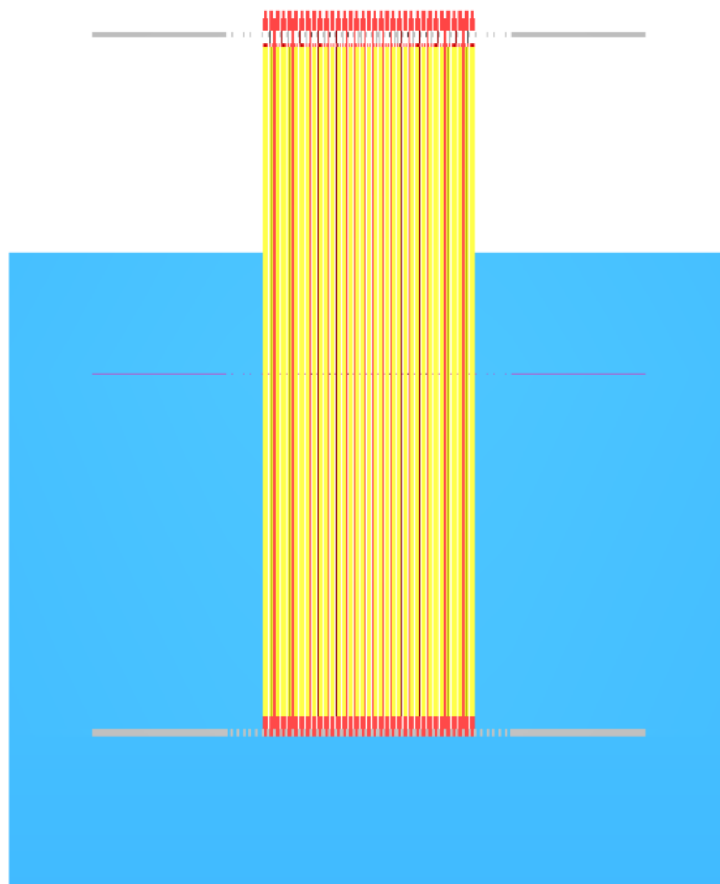
Obr. č. 55: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT070 [9]

Tab. 15: Kritické konfigurace LCT070 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	1201	73,11
2	1165	78,52
3	1147	81,49
4	1123	86,55
5	1099	91,89
6	1081	97,83
7	1069	102,18
8	1057	105,82
9	1045	110,74
10	1033	115,51
11	1021	121,26
12	1015	130,19



Obr. č. 56: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT070



Obr. č. 57: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT070

Tab. 16: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT070 [9]

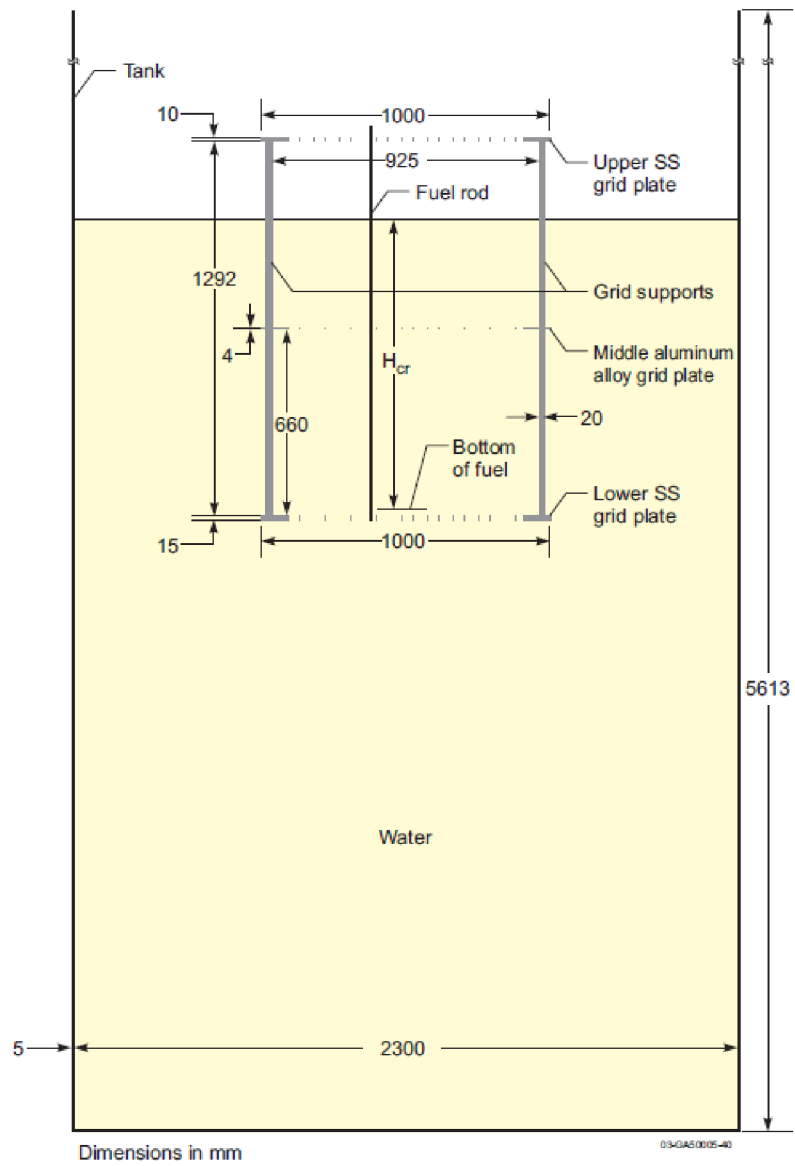
Výpočetní kód →	MCU-REA	KENO	APOLLO2-MORET4	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.1	238-group ENDF/B-V	172-group JEF2.2	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0029 ± 0,0006	0,9990 ± 0,0002	1,0077 ± 0,0003	1,00574 ± 0,00018
2	1,0027 ± 0,0006	0,9992 ± 0,0002	1,0080 ± 0,0003	1,00621 ± 0,00020
3	1,0010 ± 0,0006	0,9988 ± 0,0002	1,0083 ± 0,0003	1,00619 ± 0,00018
4	1,0025 ± 0,0006	0,9982 ± 0,0002	1,0088 ± 0,0003	1,00581 ± 0,00022
5	1,0024 ± 0,0006	0,9976 ± 0,0002	1,0098 ± 0,0003	1,00548 ± 0,00018
6	1,0026 ± 0,0006	0,9973 ± 0,0002	1,0100 ± 0,0003	1,00490 ± 0,00019
7	1,0023 ± 0,0006	0,9973 ± 0,0002	1,0100 ± 0,0003	1,00535 ± 0,00019
8	1,0023 ± 0,0006	0,9976 ± 0,0002	1,0101 ± 0,0003	1,00489 ± 0,00017
9	1,0017 ± 0,0006	0,9972 ± 0,0002	1,0090 ± 0,0003	1,00463 ± 0,00021
10	1,0020 ± 0,0006	0,9966 ± 0,0002	1,0090 ± 0,0003	1,00462 ± 0,00019
11	1,0008 ± 0,0006	0,9967 ± 0,0002	1,0078 ± 0,0003	1,00423 ± 0,00018
12	1,0010 ± 0,0006	0,9965 ± 0,0002	1,0076 ± 0,0003	1,00433 ± 0,00018

Na (Obr. č. 56) a (Obr. č. 57) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsals do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

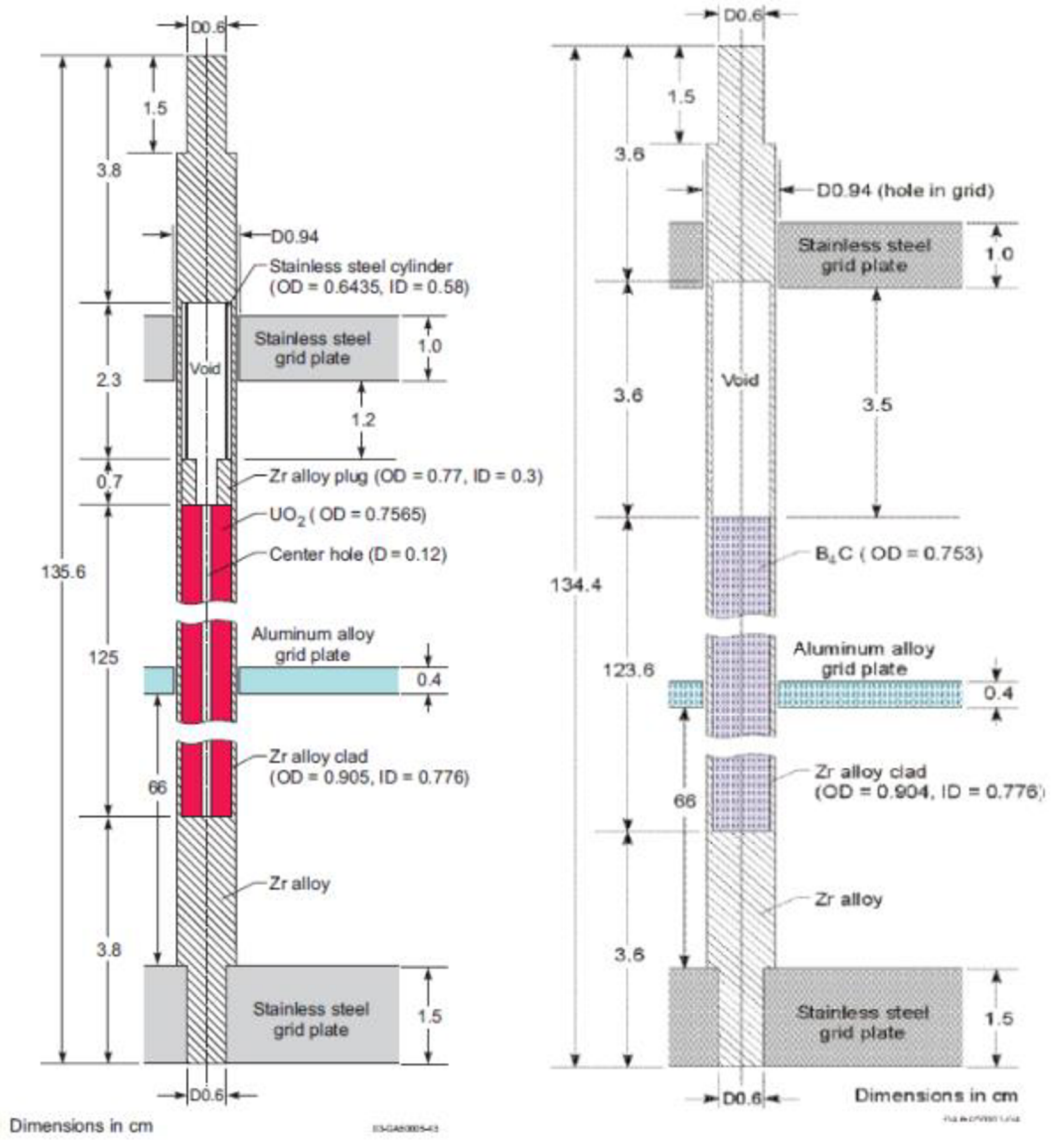
4.2.8 LEU-COMP-THERM-075

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení P (Obr. č. 58). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 6 konfigurací (Tab. 17), které zkoumají účinky poruch mřížky nahrazením některých palivových proutků borovými absorpčními proutky, nebo vodními otvory. Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,1 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Model palivového proutku a absorbéru je na (Obr. č. 59). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Pro zpevnění a udržení tvaru je u experimentů použita střední deska z hliníkové slitiny o tloušťce 0,4 cm. Otvory v horních a středních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 6,5 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 60-62).

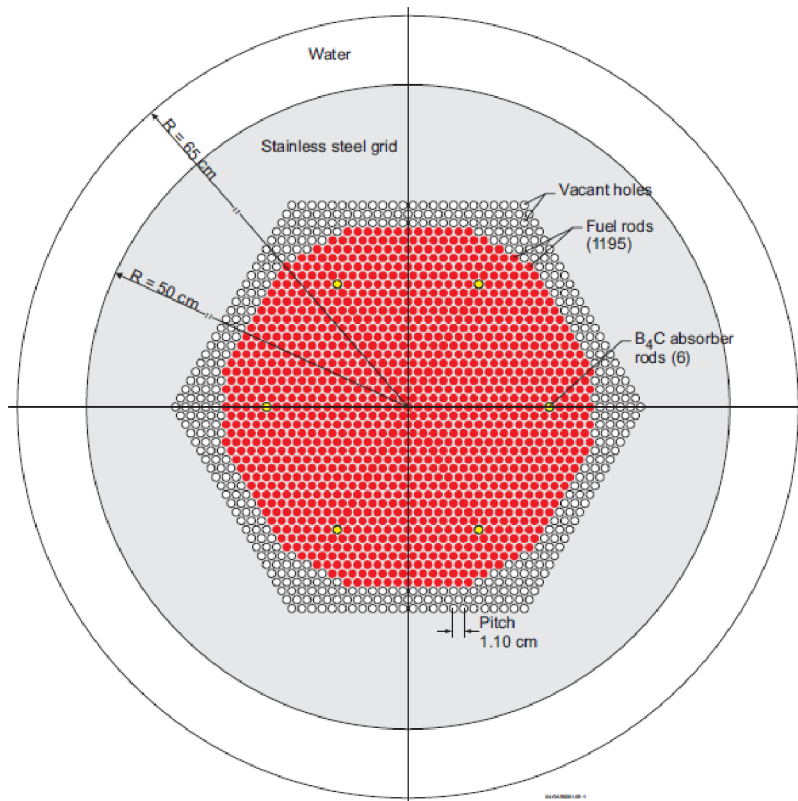
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0003 \pm 0,0017$ pro konfigurace 1 a 2. Pro konfiguraci 3 je $0,9981 \pm 0,0017$ a pro konfigurace 4-6 je $1,0004 \pm 0,0017$. [9]



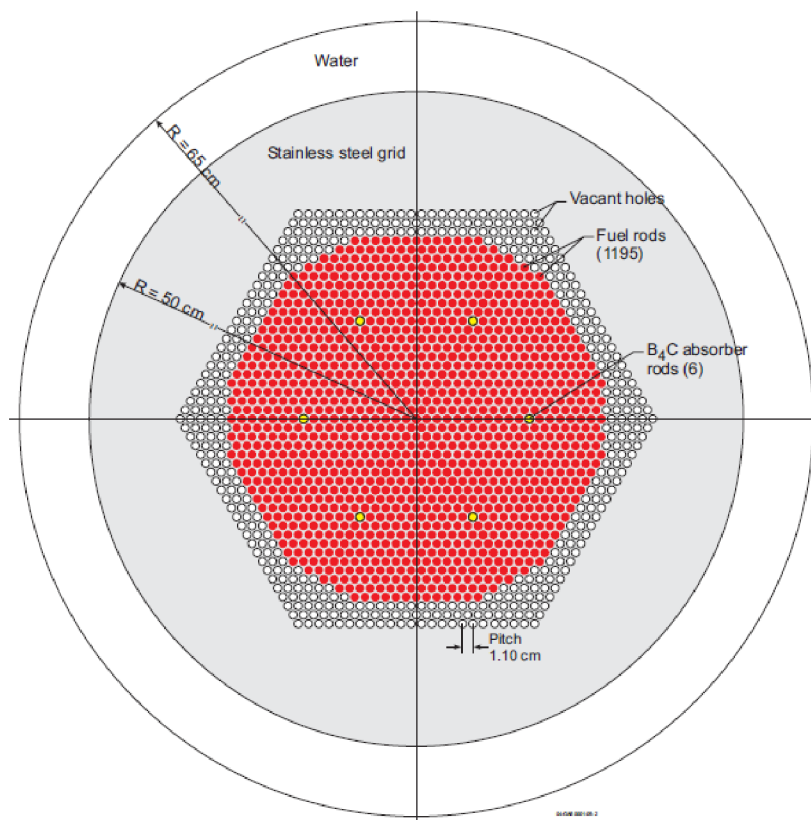
Obr. č. 58: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT075 [9]



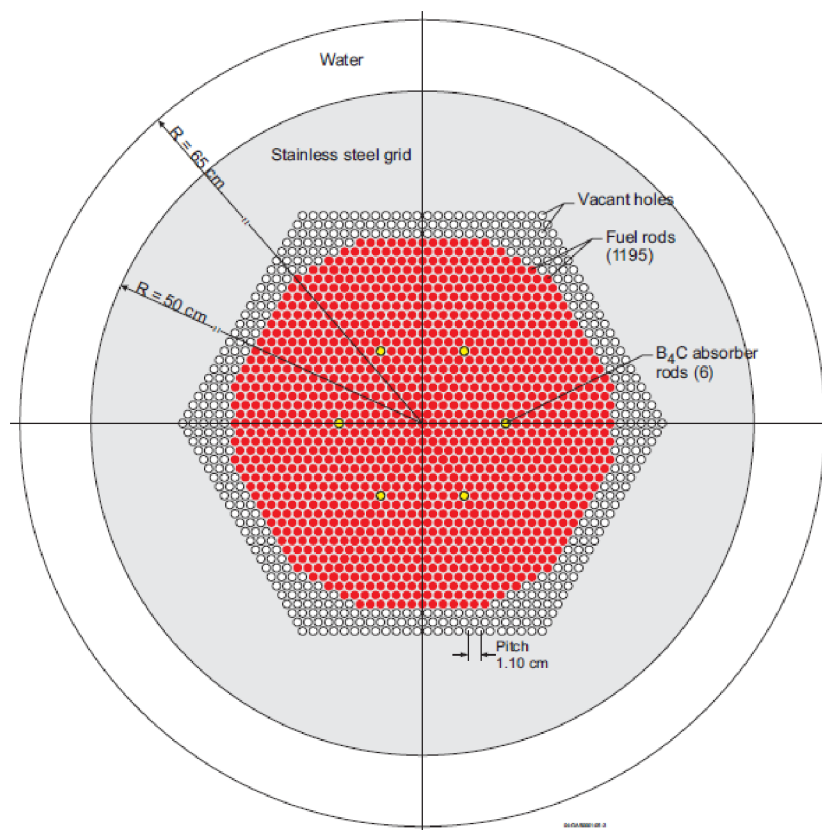
Obr. č. 59: Rozměry palivového proutku a B₄C absorbéru LCT075 [9]



Obr. č. 60: Horizontální řez konfigurace 1 a 4 - LCT075 [9]



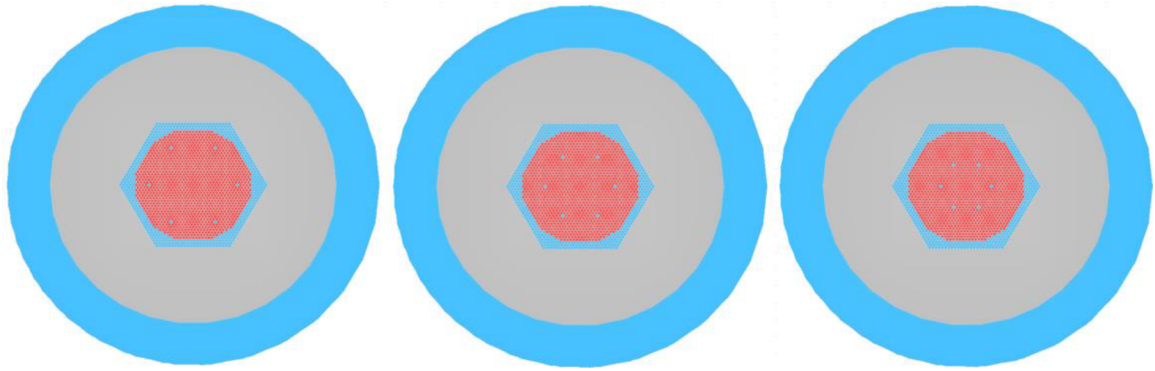
Obr. č. 61: Horizontální řez konfigurace 2 a 5 - LCT075 [9]



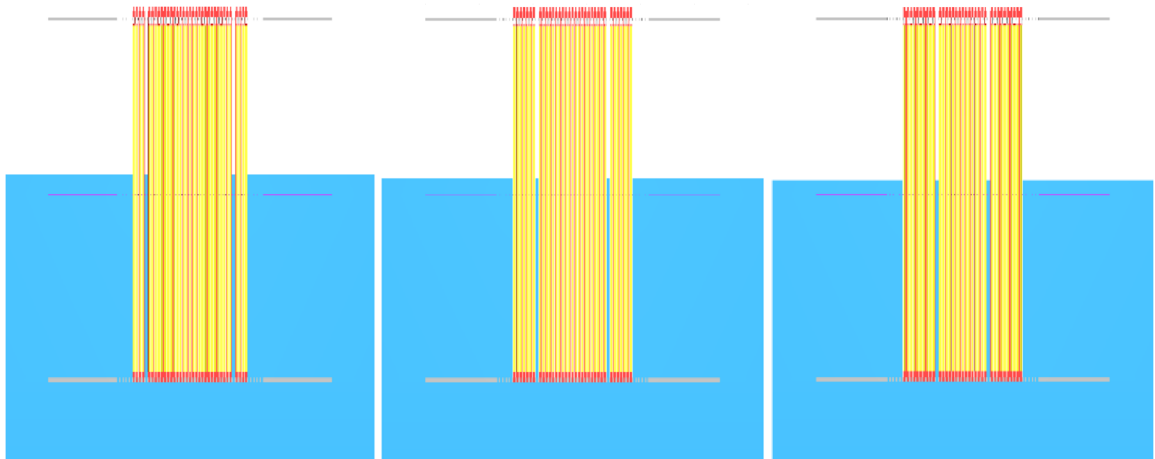
Obr. č. 62: Horizontální řez konfigurace 3 a 6 - LCT075 [9]

Tab. 17: Kritické konfigurace LCT075 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)	B ₄ C absorbér / vodní díra	Počet B ₄ C absorbérů / vodních děr	Vzdálenost B ₄ C absorbérů / vodních děr od středu	Uspořádání
1	1195	93,83	B ₄ C absorbér	6	15,4	1 (Obr. č. 60)
2	1195	109,62	B ₄ C absorbér	6	12,1	2 (Obr. č. 61)
3	1195	125,00	B ₄ C absorbér	6	8,8	3 (Obr. č. 62)
4	1195	71,12	vodní díra	6	15,4	1 (Obr. č. 60)
5	1195	69,98	vodní díra	6	12,1	2 (Obr. č. 61)
6	1195	69,09	vodní díra	6	8,8	3 (Obr. č. 62)



Obr. č. 63: KENO3D model pohled shora konfigurace 1, 2 a 3 - LCT075



Obr. č. 64: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 1, 2 a 3 - LCT075

Tab. 18: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT075 [9]

Výpočetní kód →	MCU-REA	KENOV.a	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.1	238-group ENDF/B-V	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	$1,0017 \pm 0,0006$	$0,9970 \pm 0,0002$	$1,00502 \pm 0,00019$
2	$1,0002 \pm 0,0006$	$0,9965 \pm 0,0002$	$1,00475 \pm 0,00020$
3	$0,9971 \pm 0,0006$	$0,9927 \pm 0,0002$	$1,00154 \pm 0,00019$
4	$1,0018 \pm 0,0006$	$0,9987 \pm 0,0002$	$1,00655 \pm 0,00018$
5	$1,0024 \pm 0,0006$	$0,9986 \pm 0,0002$	$1,00680 \pm 0,00019$
6	$1,0015 \pm 0,0006$	$0,9985 \pm 0,0002$	$1,00642 \pm 0,00016$

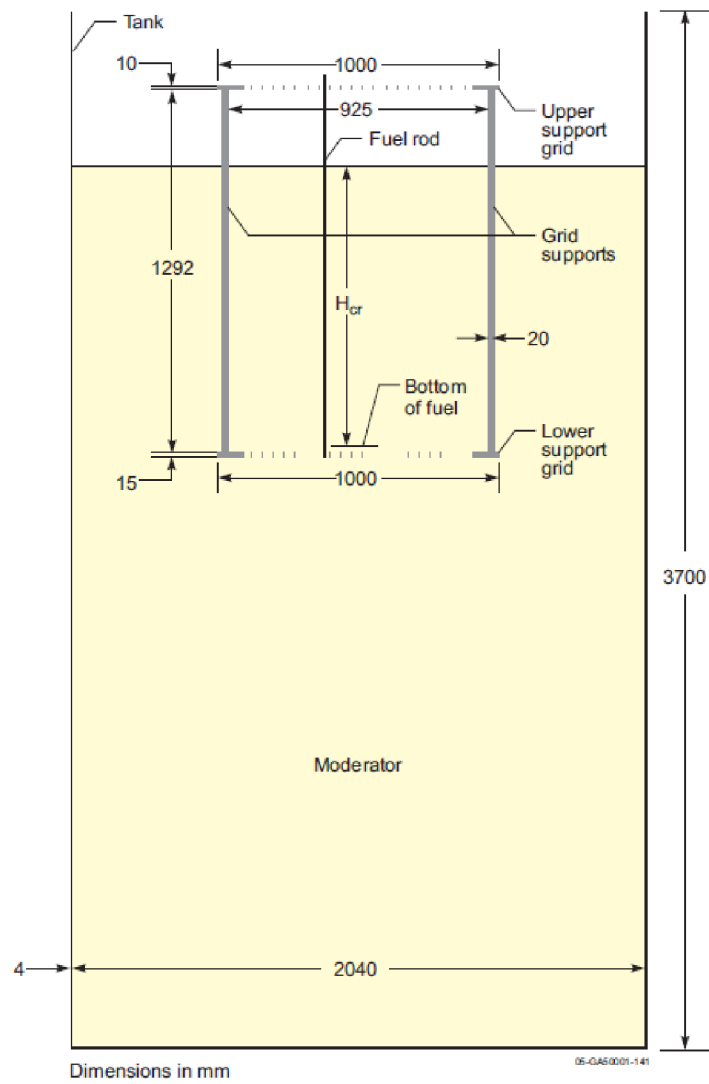
Na (Obr. č. 63) a (Obr. č. 64) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsal do posledního

sloupce označeného světla modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continuous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

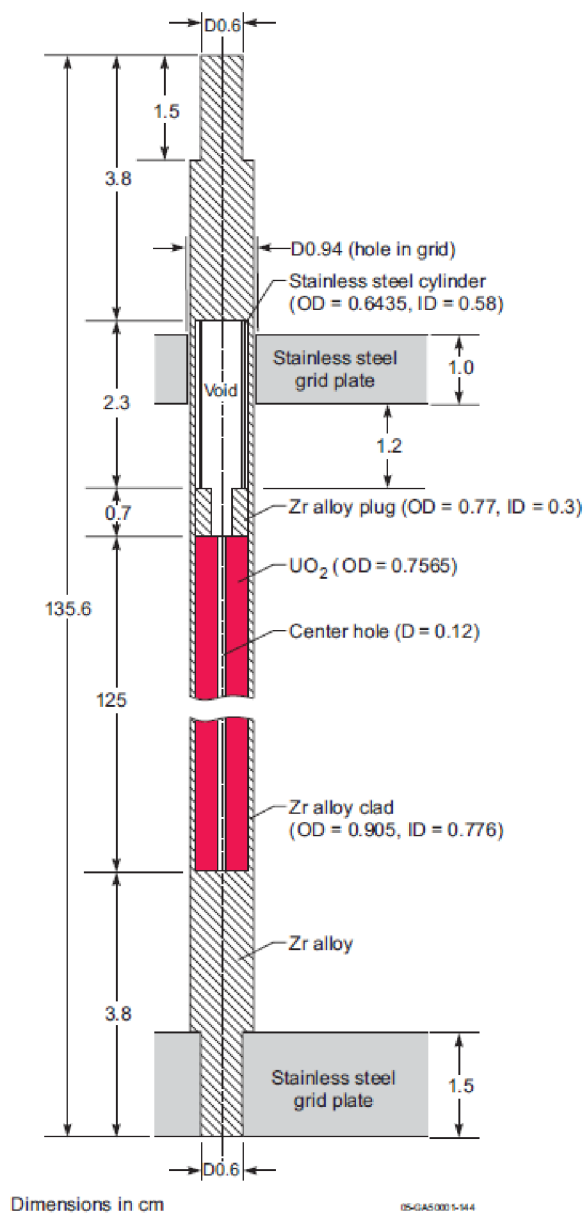
4.2.9 LEU-COMP-THERM-085

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení SF-9 (Obr. č. 65). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 13 konfigurací (Tab. 19). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,27 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Model palivového proutku je na (Obr. č. 66). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Otvory v horních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Obohacení paliva je 6,5 %. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 67).

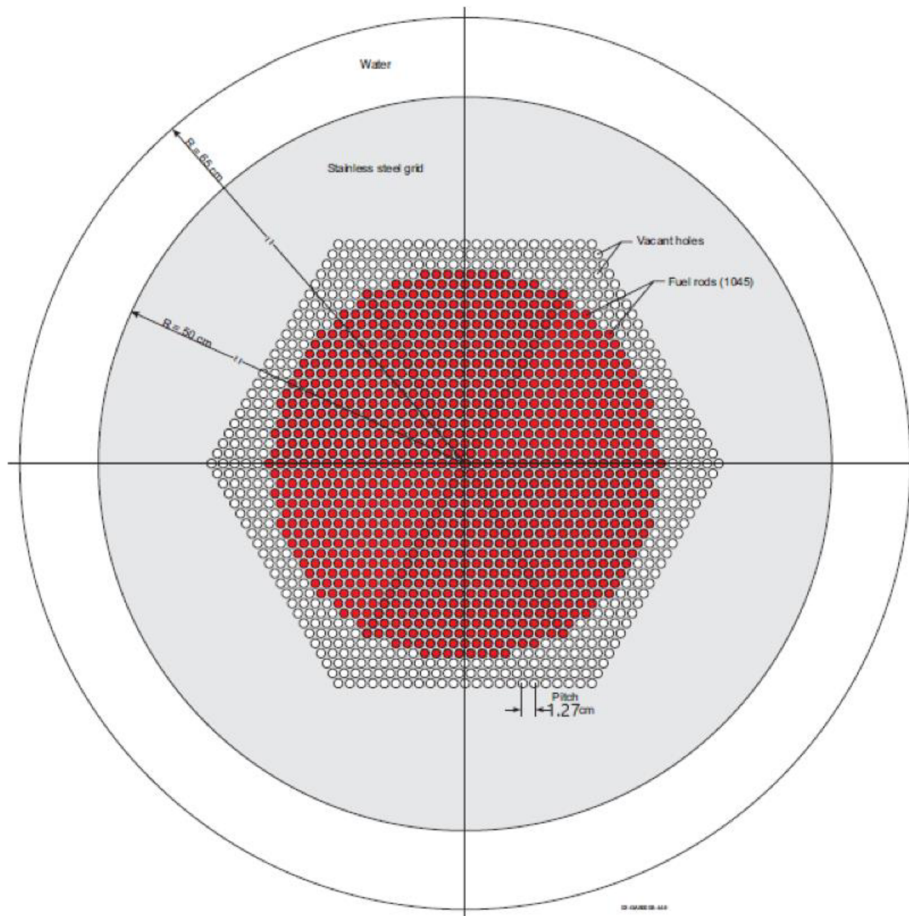
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0004 \pm 0,0014$ pro všech 13 konfigurací. [9]



Obr. č. 65: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT085 [9]



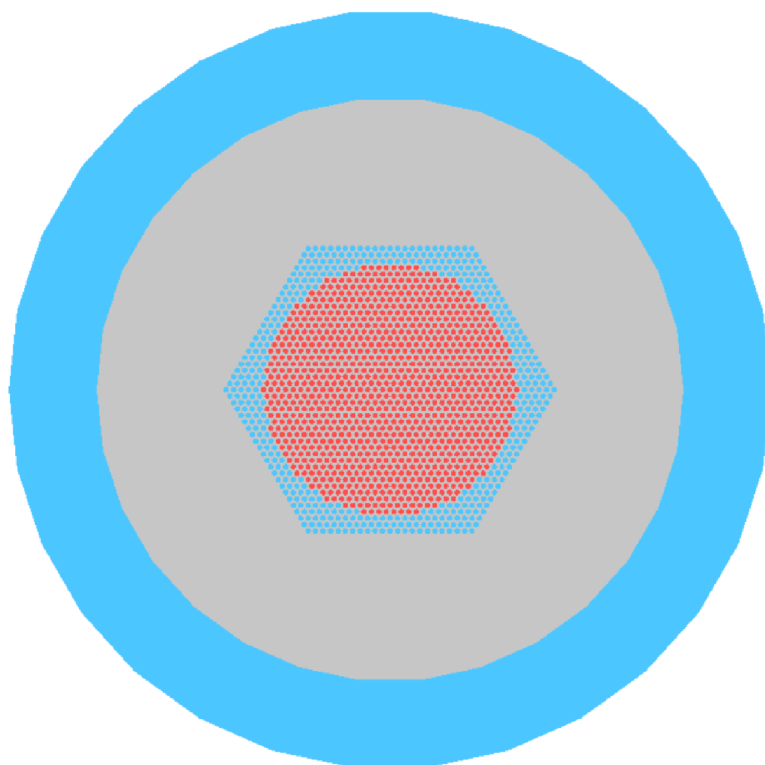
Obr. č. 66: Rozměry palivového proutku LCT085 [9]



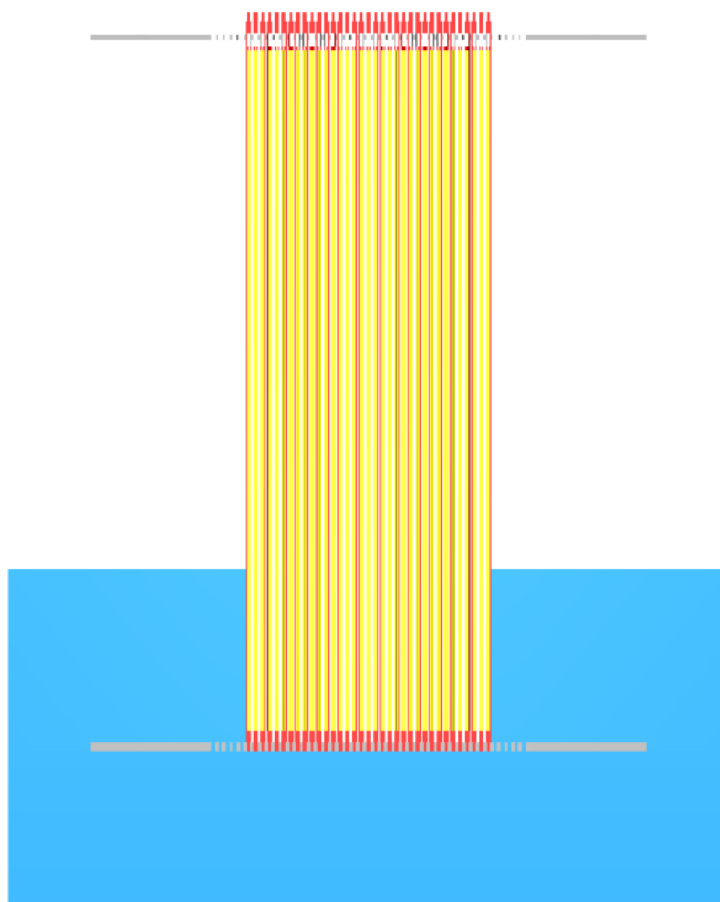
Obr. č. 67: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT085 [9]

Tab. 19: Kritické konfigurace LCT085 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	1189	27,35
2	1165	27,68
3	1093	28,75
4	1045	29,52
5	1003	30,27
6	901	32,60
7	793	35,92
8	691	41,18
9	583	52,38
10	511	68,25
11	475	86,52
12	451	110,35
13	445	121,80



Obr. č. 68: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT085



Obr. č. 69: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT085

Tab. 20: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT085 [9]

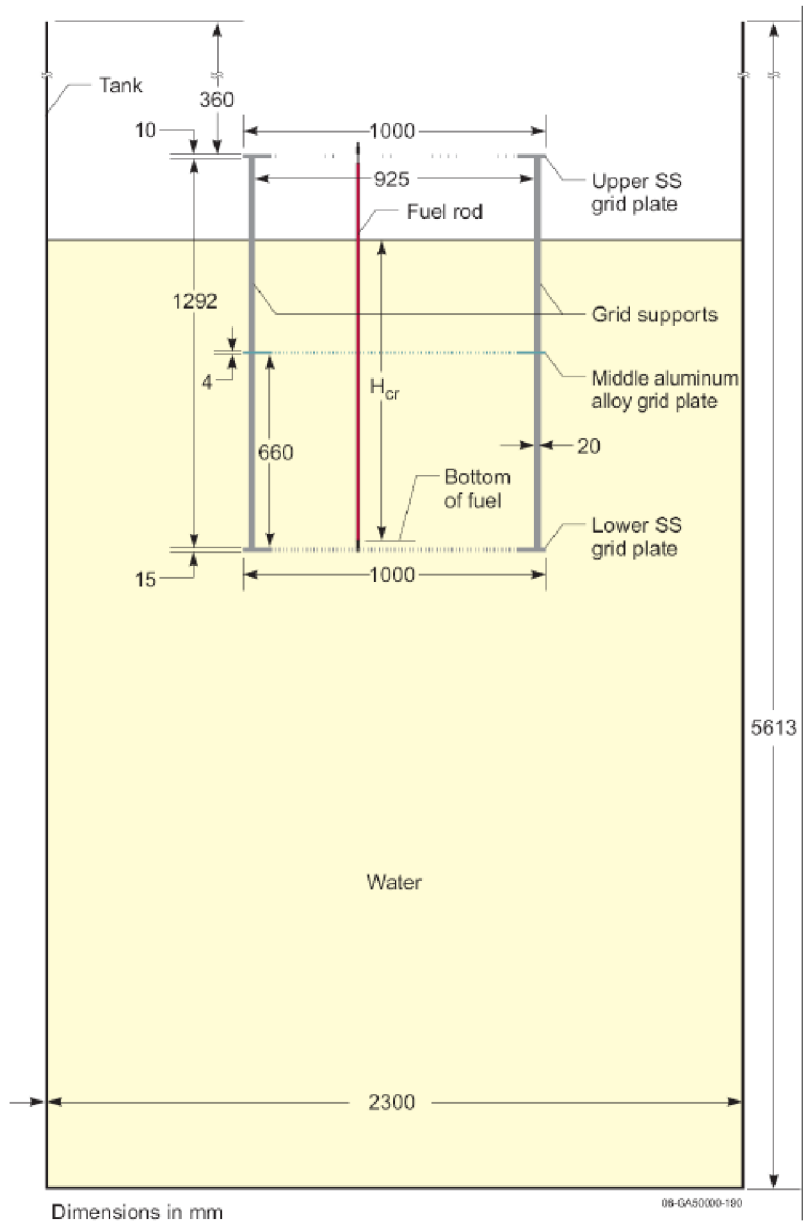
Výpočetní kód →	MCU-REA	KENO	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.2	238-group ENDF/B-V	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0052 ± 0,0006	1,0080 ± 0,0003	1,01400 ± 0,00020
2	1,0051 ± 0,0006	1,0077 ± 0,0003	1,01420 ± 0,00023
3	1,0045 ± 0,0006	1,0069 ± 0,0003	1,01331 ± 0,00021
4	1,0037 ± 0,0006	1,0062 ± 0,0003	1,01282 ± 0,00021
5	1,0047 ± 0,0006	1,0059 ± 0,0003	1,01191 ± 0,00019
6	1,0026 ± 0,0006	1,0048 ± 0,0003	1,01119 ± 0,00020
7	0,9995 ± 0,0006	1,0022 ± 0,0003	1,00849 ± 0,00018
8	0,9991 ± 0,0006	0,9996 ± 0,0003	1,00622 ± 0,00020
9	0,9982 ± 0,0006	0,9996 ± 0,0003	1,00650 ± 0,00021
10	0,9958 ± 0,0006	0,9971 ± 0,0003	1,00359 ± 0,00020
11	0,9950 ± 0,0006	0,9969 ± 0,0003	1,00383 ± 0,00019
12	0,9938 ± 0,0006	0,9951 ± 0,0003	1,00216 ± 0,00018
13	0,9939 ± 0,0006	0,9961 ± 0,0003	1,00301 ± 0,00019

Na (Obr. č. 68) a (Obr. č. 69) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsal do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

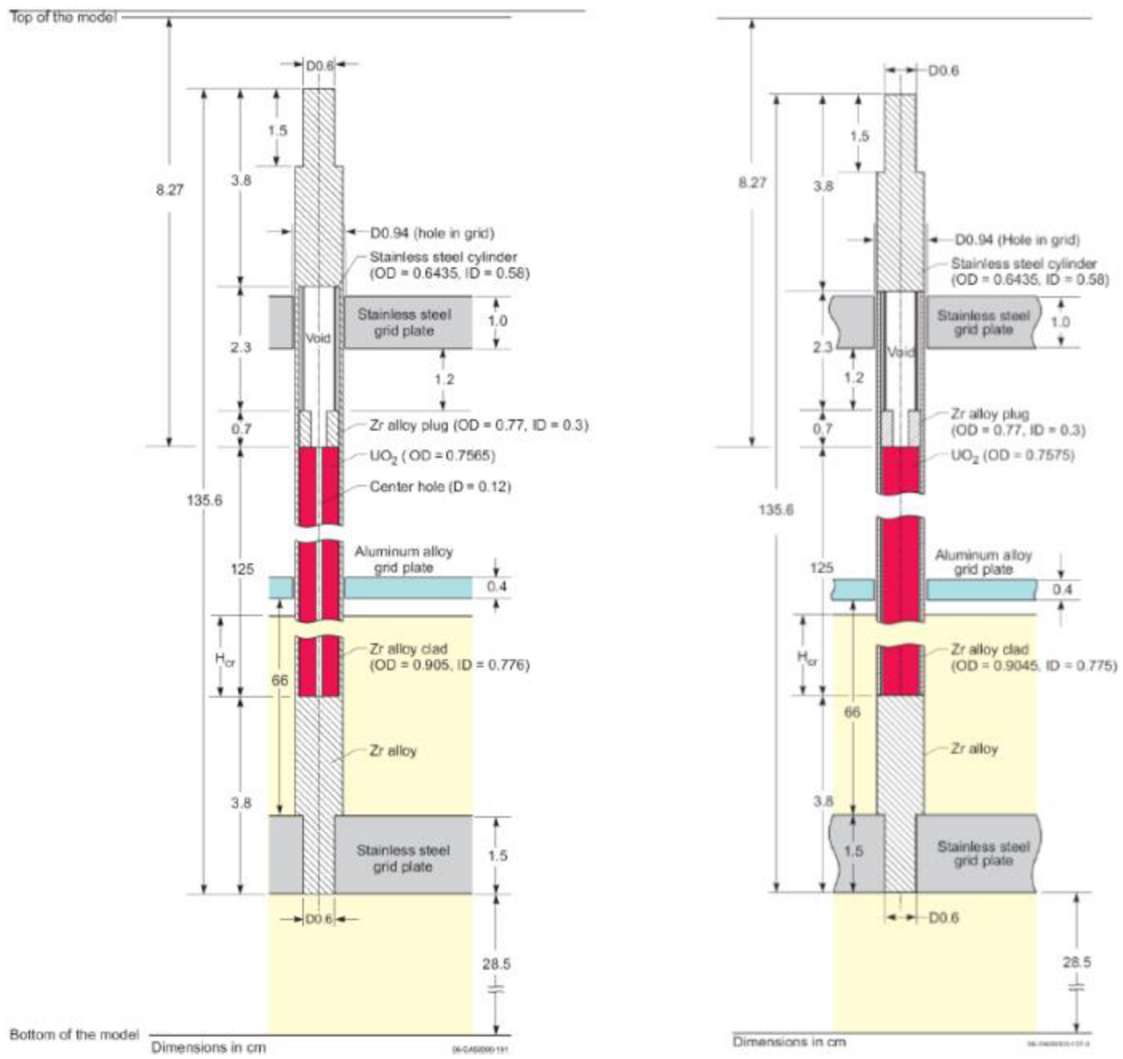
4.2.10 LEU-COMP-THERM-094

Experimenty jsou prováděny na kritickém zařízení P (Obr. č. 70). Pro benchmark bylo provedeno mnoho zjednodušení. Celkem je zde 11 konfigurací (Tab. 21). Palivové proutky mají v šestiúhelníkové mříži rozteč 1,1 cm a průměr modelu je ve všech konfiguracích roven 130 cm. Reflektor (voda) pod spodní mřížovou deskou má tloušťku 28,5 cm. Celková výška modelu je 165,57 cm. Experimenty používají dva různě obohacené palivové proutky. Palivové proutky s obohacením 6,6 % jsou umístěny blíže ke středu. Naopak proutky s obohacením 4,4 % jsou umístěny po stranách. Model palivových proutků je na (Obr. č. 71). Průměr mřížkové desky je 100 cm. Tloušťka horní desky je 1 cm a spodní desky 1,5 cm. Pro zpevnění a udržení tvaru je u experimentů použita střední deska z hliníkové slitiny o tloušťce 0,4 cm. Otvory v horních a středních deskách mají průměr 0,94 cm a ve spodních 0,62 cm. Všechny konfigurace jsou modelovány tak, aby měly tři kompletní vnější sady otvorů a tvořily tvar šestiúhelníku (Obr. č. 72).

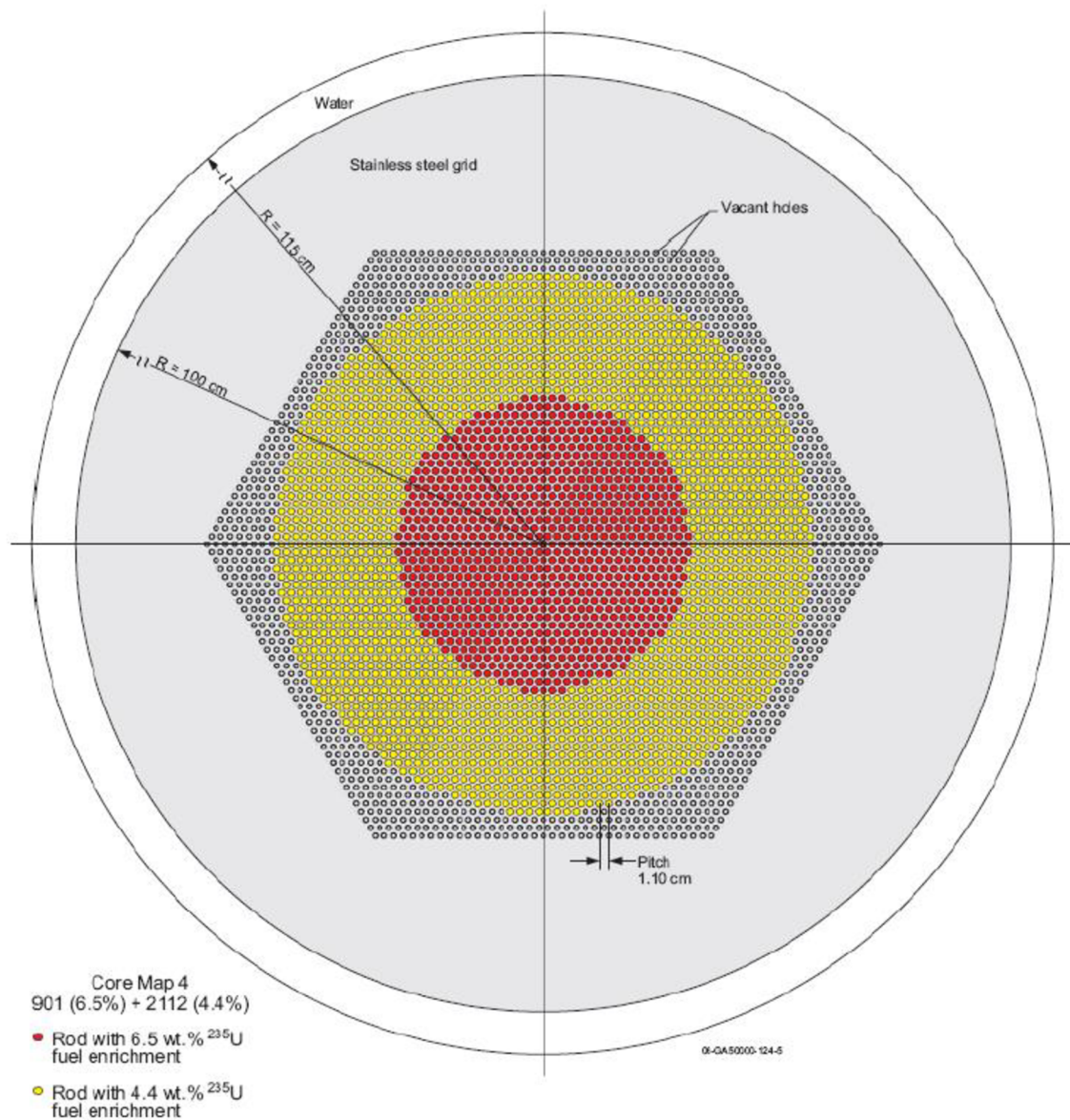
Všechny zkoumané experimenty byly kritické a efektivní koeficient násobení k_{eff} byl roven 1. Benchmarkový efektivní koeficient násobení byl po korekci kvůli nečistotám v palivu stanoven na $1,0004 \pm 0,0013$ pro všechny 11 konfigurací. [9]



Obr. č. 70: Rozměry nádrže a aktivní zóny LCT094 [9]



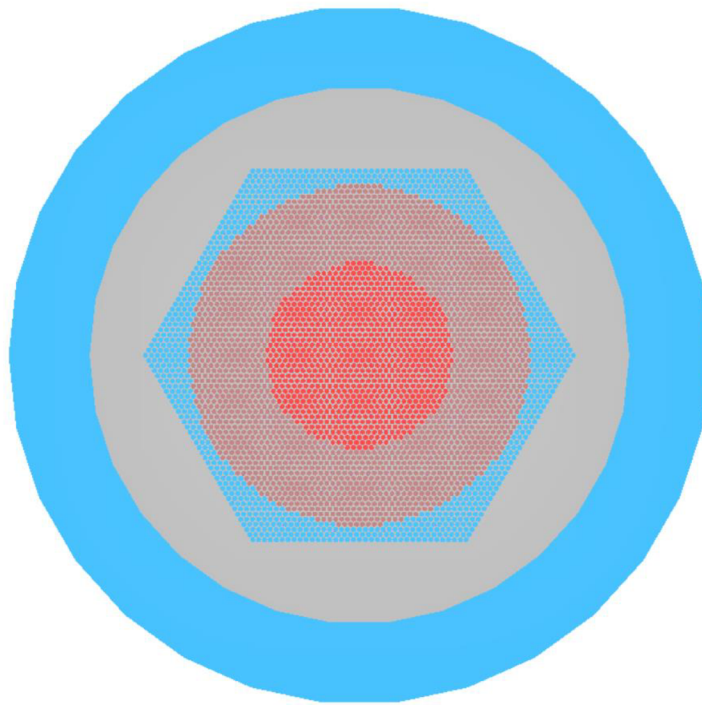
Obr. č. 71: Rozměry palivových proutků (vlevo 6,5 % a vpravo 4,4 %) LCT094 [9]



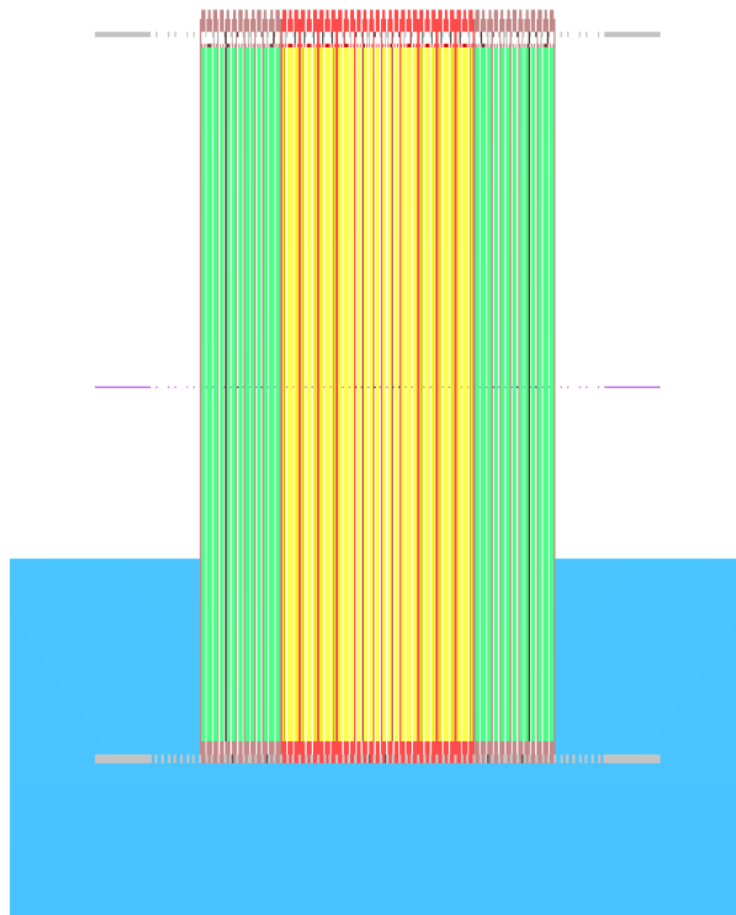
Obr. č. 72: Horizontální řez konfigurace 4 - LCT094 [9]

Tab. 21: Kritické konfigurace LCT094 [9]

Konfigurace	Počet palivových proutků (6,5 %)	Počet palivových proutků (4,4 %)	Výška moderátora H_{cr} (cm)
1	901	2952	29,47
2	901	2868	29,79
3	901	2502	31,09
4	901	2112	32,92
5	901	1722	35,52
6	901	1410	38,36
7	901	1044	43,71
8	901	738	51,16
9	901	630	55,35
10	901	468	64,65
11	901	384	72,54



Obr. č. 73: KENO3D model pohled shora konfigurace 4 - LCT094



Obr. č. 74: KENO3D model pohled ze strany konfigurace 4 - LCT094

Tab. 22: Vypočítané hodnoty k_{eff} LCT094 [9]

Výpočetní kód →	MCU-REA	KENOV.a
Knihovna →	DLC/MCUDAT-2.1	Continous-Energy ENDF/B-VII.1
Konfigurace ↓	k_{eff} (-)	k_{eff} (-)
1	1,0011 ± 0,0006	1,00532 ± 0,00019
2	1,0027 ± 0,0006	1,00561 ± 0,00018
3	1,0029 ± 0,0006	1,00539 ± 0,00019
4	1,0023 ± 0,0006	1,00579 ± 0,00018
5	1,0025 ± 0,0006	1,00593 ± 0,00020
6	1,0023 ± 0,0006	1,00642 ± 0,00019
7	1,0037 ± 0,0006	1,00737 ± 0,00021
8	1,0030 ± 0,0006	1,00706 ± 0,00018
9	1,0018 ± 0,0006	1,00731 ± 0,00021
10	1,0022 ± 0,0006	1,00672 ± 0,00020
11	1,0019 ± 0,0006	1,00671 ± 0,00018

Na (Obr. č. 73) a (Obr. č. 74) je ukázka geometrie shora a ze strany vytvořená pomocí programu KENO3D. Pod ukázkou je tabulka vypočítaných efektivních koeficientů násobení k_{eff} pomocí různých výpočetních kódů a knihoven. Své hodnoty jsem vypsals do posledního sloupce označeného světle modrou barvou. Pro výpočet jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 milionů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Dohromady jsem namodeloval a vypočítal 10 benchmarků, z toho každý obsahoval různé konfigurace. Počet konfigurací na jeden benchmark je v rozmezí od 6 do 14. Celkem bylo vypočteno 98 konfigurací.

Pro výpočet pomocí kódu KENO V.a jsem použil knihovnu *Continous-energy ENDF/B-VII.1*. Výpočet měl 20 miliónů neutronových historií (20 000 neutronů na generaci, 1 000 aktivních generací a 20 neaktivních generací).

V následujících tabulkách se nachází vypočítaný efektivní koeficient násobení, referenční benchmarkový efektivní koeficient násobení a vypočítaná odchylka koeficientů.

Prvním benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-020* (Tab. 23). Benchmark má dohromady 7 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,012 \%$ má konfigurace 2. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,487 \%$ má konfigurace 1. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,289 \%$.

Tab. 23: Porovnání vypočtené hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-020*

Konfigurace↓	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	0,99513 ± 0,00018	1,0000 ± 0,0061	0,487
2	1,00012 ± 0,00020	1,0000 ± 0,0061	0,012
3	1,00262 ± 0,00017	1,0000 ± 0,0061	0,262
4	1,00226 ± 0,00021	1,0000 ± 0,0061	0,226
5	1,00322 ± 0,00019	1,0000 ± 0,0061	0,322
6	1,00349 ± 0,00018	1,0000 ± 0,0061	0,349
7	1,00362 ± 0,00018	1,0000 ± 0,0061	0,362

Druhým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-021* (Tab. 24). Benchmark má dohromady 6 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 1,198 \%$ má konfigurace 6. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 1,246 \%$ má konfigurace 5. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 1,211 \%$.

Tab. 24: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-021*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,01208 ± 0,00020	1,0000 ± 0,0072	1,208
2	1,01206 ± 0,00020	1,0000 ± 0,0072	1,206
3	1,01206 ± 0,00021	1,0000 ± 0,0072	1,206
4	1,01204 ± 0,00019	1,0000 ± 0,0050	1,204
5	1,01246 ± 0,00019	1,0000 ± 0,0050	1,246
6	1,01198 ± 0,00020	1,0000 ± 0,0050	1,198

Třetím benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-030* (Tab. 25). Benchmark má dohromady 12 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,719 \%$ má konfigurace 12. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 1,578 \%$ má konfigurace 1. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 1,087 \%$.

Tab. 25: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-030*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,01639 ± 0,00020	1,0006 ± 0,0018	1,578
2	1,01629 ± 0,00019	1,0006 ± 0,0018	1,568
3	1,01572 ± 0,00018	1,0006 ± 0,0018	1,511
4	1,01490 ± 0,00019	1,0006 ± 0,0018	1,429
5	1,01250 ± 0,00021	1,0006 ± 0,0018	1,189
6	1,01015 ± 0,00020	1,0006 ± 0,0018	0,954
7	1,00948 ± 0,00020	1,0006 ± 0,0018	0,887
8	1,00847 ± 0,00019	1,0006 ± 0,0018	0,787
9	1,00870 ± 0,00019	1,0006 ± 0,0018	0,810
10	1,00846 ± 0,00020	1,0006 ± 0,0018	0,786
11	1,00891 ± 0,00018	1,0006 ± 0,0018	0,831
12	1,00779 ± 0,00018	1,0006 ± 0,0018	0,719

Čtvrtým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-053* (Tab. 26). Benchmark má dohromady 14 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,375 \%$ má konfigurace 2. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,819 \%$ má konfigurace 12. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,587 \%$.

Tab. 26: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-053*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,00707 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0016	0,657
2	1,00425 ± 0,00020	1,0005 ± 0,0016	0,375
3	1,00535 ± 0,00022	1,0005 ± 0,0016	0,485
4	1,00622 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0016	0,572
5	1,00685 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0016	0,635
6	1,00582 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0016	0,532
7	1,00740 ± 0,00025	1,0005 ± 0,0016	0,690
8	1,00511 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0016	0,461
9	1,00783 ± 0,00020	1,0005 ± 0,0016	0,733
10	1,00522 ± 0,00021	1,0005 ± 0,0016	0,472
11	1,00772 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0016	0,722
12	1,00869 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0016	0,819
13	1,00451 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0016	0,401
14	1,00712 ± 0,00017	1,0005 ± 0,0016	0,662

Pátým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-061* (Tab. 27). Benchmark má dohromady 10 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,134 \%$ má konfigurace 10. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,769 \%$ má konfigurace 5. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,454 \%$.

Tab. 27: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-061*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,00403 ± 0,00023	1,0005 ± 0,0023	0,353
2	1,00383 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0023	0,333
3	1,00507 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0023	0,457
4	1,00427 ± 0,00020	1,0005 ± 0,0023	0,377
5	1,00819 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0023	0,769
6	1,00700 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0023	0,650
7	1,00571 ± 0,00019	1,0005 ± 0,0023	0,521
8	1,00520 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0023	0,470
9	1,00529 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0023	0,479
10	1,00184 ± 0,00018	1,0005 ± 0,0023	0,134

Šestým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-064* (Tab. 28). Benchmark má dohromady 7 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,538 \%$ má konfigurace 2. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 1,249 \%$ má konfigurace 1. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,679 \%$.

Tab. 28: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-064*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,01340 ± 0,00020	1,0009 ± 0,0028	1,249
2	1,00628 ± 0,00018	1,0009 ± 0,0028	0,538
3	1,00730 ± 0,00017	1,0009 ± 0,0028	0,639
4	1,00695 ± 0,00017	1,0009 ± 0,0028	0,604
5	1,00684 ± 0,00018	1,0009 ± 0,0028	0,593
6	1,00672 ± 0,00019	1,0009 ± 0,0028	0,581
7	1,00637 ± 0,00020	1,0009 ± 0,0028	0,547

Sedmým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-070* (Tab. 29). Benchmark má dohromady 9 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,383 \%$ má konfigurace 11. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,581 \%$ má konfigurace 2. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,480 \%$.

Tab. 29: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-070*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,00574 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0016	0,534
2	1,00621 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0016	0,581
3	1,00619 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0016	0,579
4	1,00581 ± 0,00022	1,0004 ± 0,0016	0,541
5	1,00548 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0016	0,508
6	1,00490 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0016	0,450
7	1,00535 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0016	0,495
8	1,00489 ± 0,00017	1,0004 ± 0,0016	0,449
9	1,00463 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0016	0,423
10	1,00462 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0016	0,422
11	1,00423 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0016	0,383
12	1,00433 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0016	0,393

Osmým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-075* (Tab. 30). Benchmark má dohromady 6 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,345 \%$ má konfigurace 3. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,640 \%$ má konfigurace 5. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,520 \%$.

Tab. 30: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-075*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,00502 ± 0,00019	1,0003 ± 0,0017	0,472
2	1,00475 ± 0,00020	1,0003 ± 0,0017	0,445
3	1,00154 ± 0,00019	0,9981 ± 0,0017	0,345
4	1,00655 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0017	0,615
5	1,00680 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0017	0,640
6	1,00642 ± 0,00016	1,0004 ± 0,0017	0,602

Devátým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-085* (Tab. 31). Benchmark má dohromady 13 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,176 \%$ má konfigurace 12. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 1,379 \%$ má konfigurace 2. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,815 \%$.

Tab. 31: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-085*

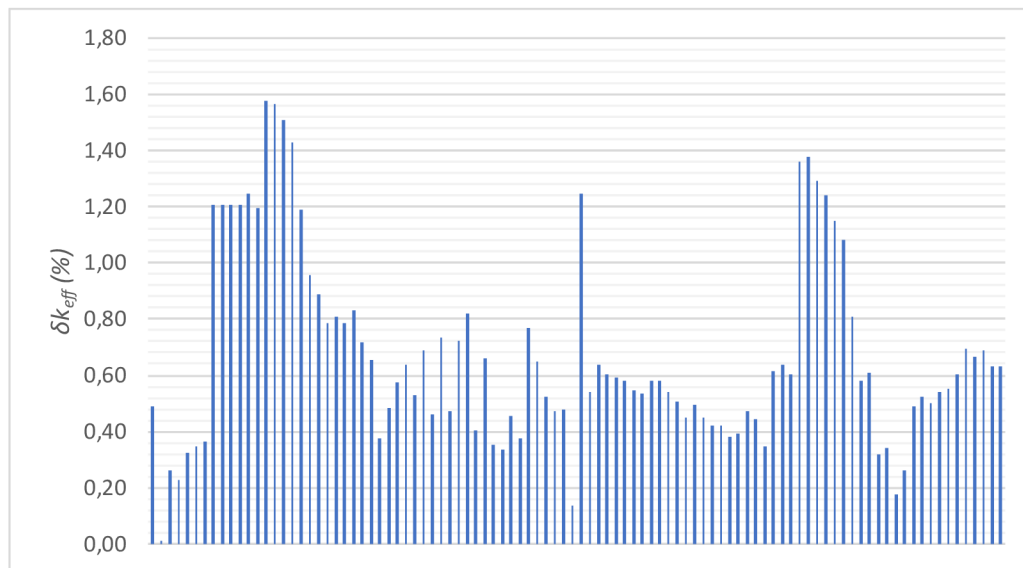
Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,01400 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0014	1,359
2	1,01420 ± 0,00023	1,0004 ± 0,0014	1,379
3	1,01331 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0014	1,290
4	1,01282 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0014	1,242
5	1,01191 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0014	1,151
6	1,01119 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0014	1,079
7	1,00849 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0014	0,809
8	1,00622 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0014	0,582
9	1,00650 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0014	0,610
10	1,00359 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0014	0,319
11	1,00383 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0014	0,343
12	1,00216 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0014	0,176
13	1,00301 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0014	0,261

Desátým benchmarkem je benchmark *LEU-COMP-THERM-094* (Tab. 31). Benchmark má dohromady 11 konfigurací. Nejmenší odchylku $\delta k_{eff} = 0,492 \%$ má konfigurace 1. Naopak největší odchylku $\delta k_{eff} = 0,697 \%$ má konfigurace 7. Průměrně má benchmark hodnotu odchylky $\delta k_{eff} = 0,593 \%$.

Tab. 32: Porovnání vypočítané hodnoty k hodnotě benchmarkové – *LCT-094*

Konfigurace	KENOV.a	Benchmark	$\delta k_{eff} (\%)$
	$k_{eff} (-)$	$k_{eff} (-)$	
1	1,00532 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0013	0,492
2	1,00561 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0013	0,521
3	1,00539 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0013	0,499
4	1,00579 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0013	0,539
5	1,00593 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0013	0,553
6	1,00642 ± 0,00019	1,0004 ± 0,0013	0,602
7	1,00737 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0013	0,697
8	1,00706 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0013	0,666
9	1,00731 ± 0,00021	1,0004 ± 0,0013	0,691
10	1,00672 ± 0,00020	1,0004 ± 0,0013	0,632
11	1,00671 ± 0,00018	1,0004 ± 0,0013	0,631

Celková maximální odchylka se nachází u první konfigurace benchmarku *LEU-COMP-THERM-030* má hodnotu $\delta k_{eff} = 1,578 \%$. Celková minimální odchylka se nachází u druhé konfigurace benchmarku *LEU-COMP-THERM-020* má hodnotu $\delta k_{eff} = 0,012 \%$. Celková průměrná odchylka je rovna $\delta k_{eff} = 0,671 \%$. Z vypočítaných hodnot můžu říct, že koeficient vypočítaný měl vždy kromě jedné konfigurace větší hodnotu než koeficient daný benchmarkem. Na Obr. č. 75 jsou uvedeny všechny vypočítané odchylky v grafickém rozhraní. Odchylky jsou v grafu uspořádané podle benchmarků od *LEU-COMP-THERM-020* po *LEU-COMP-THERM-094*.



Obr. č. 75: Grafické zobrazení odchylek δk_{eff}

6. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výpočty kritických hodnot reaktorové nádoby. Výpočet se provádí pomocí výpočetního nástroje SCALE 6.2.4. Úvodní část je zaměřená na reaktorovou fyziku, která pomáhá pochopit problematiku kritičnosti. Následující kapitola je zaměřená na výpočetní metody Boltzmannovy rovnice. První metodou pro výpočet Boltzmannovy rovnice je metoda deterministická a druhou metodou je metoda statická. Výpočetní nástroj SCALE využívá metodu statickou neboli Monte Carlo metodu.

V další kapitole je popsán výpočetní nástroj SCALE a jeho výpočetní kód KENO V.a. Práce s výpočetním kódem KENO V.a je popsána pomocí vzorového příkladu na jednoduchém modelu nádrže s aktivní zónou. Znalosti a příkazy použité ve vzorovém příkladu byly použity v rozsáhlejší měřítku pro namodelování vybraných benchmarků z ICSBEP.

Projekt *International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project* byl popsán ve čtvrté kapitole a byly z něho vybrány deset benchmarků. ICSBEP zahrnuje velké množství benchmarků. Vybíral jsem z nízko obohacených složených systémů s tepelnými neutrony se zkratkou *LEU-COMP-THERM*. Vybral jsem benchmarky s označením *LEU-COMP-THERM-020, 021, 030, 053, 061, 064, 070, 075, 085 a 094*. Všechny vybrané benchmarky jsou z ruského výzkumného centra Kurchatov Institute. Vybíral jsem na základě toho, že benchmarky obsahují parametry typické VVER mřížky. Téměř u každého benchmarku záleželo hlavně na hladině moderátoru a počtu palivových proutků. Jednotlivé benchmarky se pak od sebe odlišovali v rozměrech proutků, v obohacení paliva nebo použitím absorbérů.

Každý z benchmarků obsahoval řadu konfigurací. Celkem bylo namodelováno a vypočítáno 98 konfigurací. Výslednou hodnotou každé konfigurace byl efektivní koeficient násobení k_{eff} . Experimenty jsou tvořeny tak, že výsledná hodnota k_{eff} je vždy rovna 1. U benchmarků je zde však provedeno mnoho zjednodušení a nejistot, proto každý benchmark má takzvaný benchmarkový efektivní koeficient násobení, který se nerovná experimentálnímu.

Poslední kapitola je zaměřená na porovnání benchmarkových hodnot s hodnotami, které jsem vypočítal pomocí výpočetního kódu KENO V.a. Při porovnání všech 98 konfigurací byla zjištěna výsledná průměrná odchylka vypočtených hodnot oproti benchmarkovým hodnotám, která má hodnotu 0,671 %.

Na základě vypracovaných benchmarků, jsem schopný vypracovat a vypočítat podobné kritické zařízení s přesností okolo 0,671 %. Pro vypracování složitějších kritických zařízení, bych musel doplnit své znalosti a schopnosti o další nezbytné prvky jako jsou složitější geometrické prvky, nebo funkce, které výpočetní kód obsahuje. Diplomová práce může dále posloužit jako manuál k práci s výpočetním nástrojem SCALE.

LITERATURA

- [1] EUGENE LEWIS, Elmer. Fundamentals of Nuclear Reactor Physics. Elsevier Science Publishing Co, 2008. ISBN 0123706319.
- [2] R. LAMARSH, John a Anthony J. BARATTA. Introduction to Nuclear Engineering. Third Edition. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Prentice Hall, 2001. ISBN 0-201-82498-1.
- [3] Prof. Weston M. Stacey. Nuclear Reactor Physics. Second edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2007. ISBN 978-3-527-40679-1.
- [4] Topic 2 Transport Methods Overview [online]. In: Oak Ridge National Laboratory, 2018. Dostupné z:
https://www.nrc.gov/docs/ML1815/ML18159A007.pdf?fbclid=IwAR2yTAB9pJA-DVISE41UsqEbcPNhJGCEIPiud1s8ldfUCkwxgXi4PK-A_bDQ
- [5] Lewis, E.E., Miller, W.F. (1977). Monte Carlo Methods in Neutron Transport. Delft University Press.
- [6] Duderstadt, J.J., Hamilton, L.J. (1976). Nuclear Reactor Analysis. John Wiley and Sons, Inc.
- [7] B. T. Rearden and M.A. Jessee, Eds., SCALE Code System, version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, TN, 2020
- [8] KENO V.A PRIMER: Calculations using SCALE's Criticality Safety Analysis Sequence (CSAS5) with Fulcrum [online]. In: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Oak Ridge, TN 37831-6283: UT-BATTELLE, 2020. Dostupné z:
<https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub145485.pdf>
- [9] International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. OECD Nuclear Energy Agency, c2020

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

DORT/TORT	(Discrete Ordinates Radiative Transfer/ Transport of Radiation in Tissue) výpočetní kódy pro řešení radiativního přenosu
DOORS	(Dynamic Object-Oriented Requirements System) dynamický systém požadavků s objektově orientovaným přístupem
ORNL	(Oak Ridge National Laboratory) národní laboratoř v Oak Ridge
PARTISN	(Parallel, Time-Dependent, SN Transport) deterministický výpočetní kód
LANL	(Los Alamos National Laboratory) národní laboratoř Los Alamos
RAPTOR-M3G	(RAPid Parallel Transport Of Radiation - Multiple 3D Geometries) radiační transportní kód
PENTRAN	(Penetrating Radiation) výpočetní kód pro transport ionizujícího záření
MCNP6	(Monte Carlo N-Particle) softwarový balík pro simulaci transportu částic
SCALE	(Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation) softwarový systém pro analýzu a simulaci jaderných systémů
TART	(Transport and Radiation Tracking) výpočetní kód
LLNL	(Lawrence Livermore National Laboratory) národní laboratoř Livermore
MCBEND	(Monte Carlo Boundary and ENergy Discretization) Monte Carlo výpočetní kód
TRIPOLI	(TRAjectoires IoniZantes de Particules Lourdes) Monte Carlo výpočetní kód
CEA	(Alternative Energies and Atomic Energy Commission) Francouzská výzkumná organizace
KENO	Výpočetní modul kódu SCALE
MAVRIC	(Monte Carlo Analysis for the Validation of Radiation Inactivation Calculations) výpočetní modul kódu SCALE
TRITON	výpočetní modul kódu SCALE
ORIGEN	(Oak Ridge Isotope GENeration) výpočetní modul kódu SCALE
NEWT	(Nuclear Elastic-Wave Transmission) výpočetní modul kódu SCALE
TSUNAMI	Výpočetní modul kódu SCALE
RELAP5	(Reactor Excursion and Leak Analysis Program) výpočetní modul pro kód SCALE
MONTEBURNS	výpočetní kód založen na metodě Monte Carlo
CSAS	(Criticality Safety Analysis Sequence) sekvence výpočetních kódů

CSBEP	(The Criticality Safety Benchmark Evaluation Project) projekt vyhodnocení benchmarků kritické bezpečnosti
DOE	(Department of Energy) ministerstvo energetiky Spojených států amerických
INEEL	(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory) výzkumný a vývojový ústav nacházející se v Idaho Falls
ICSBEP	(International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project) mezinárodní projekt vyhodnocení benchmarků kritické bezpečnosti
OECD-NEA	(Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency) Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj – Agentura pro jadernou energii
RRC KI	(Russian Research Center Kurchatov Institute) Ruské výzkumné centrum Kurchatovova institutu
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
KENO3D	software pro zobrazení 3D geometrie výpočetního modulu KENO

Symbols:

n	počet neutronů	-
γ	záření gama	-
α	rozpad alfa	-
σ	mikroskopický účinný průřez	barn
σ_t	totální mikroskopický účinný průřez	barn
σ_s	mikroskopický účinný průřez pro rozptyl	barn
σ_a	mikroskopický účinný průřez pro absorpci	barn
σ_e	mikroskopický účinný průřez pružného rozptylu	barn
σ_i	mikroskopický účinný průřez nepružného rozptylu	barn
σ_γ	mikroskopický účinný průřez pro radiační záchyt	barn
σ_f	mikroskopický účinný průřez pro štěpení	barn
σ_p	mikroskopický účinný průřez pro reakci (n, p)	barn
σ_α	mikroskopický účinný průřez pro reakci (n, α)	barn
Σ	makroskopický účinný průřez	m^{-1}
N	atomová hustota	$1/\text{m}^3$
k_{eff}	efektivní koeficient násobení	-
k_∞	koeficient násobení v nekonečné soustavě	-
η	regenerační faktor paliva	-
f	koeficient využití tepelných neutronů	-
ε	koeficient násobení rychlými neutrony	-
p	pravděpodobnost úniku rezonančního zániku	-

P_1	pravděpodobnost, že neutron unikne během zpomalování	-
P_2	pravděpodobnost, že neutron unikne během difúze	-
v	rychlost neutronů	m/s
Φ	tok neutronů	-
r	pozice	cm ²
E	energie	eV
Ω	směr pohybu	sr
Σ_S	makroskopický účinný průřez pro rozptyl	1/cm·sr
Q	zdroj neutronů	-
N_i	atomová hustota prvku i	atom/barn·cm
ρ_i	hustota materiálu obsahující prvek i	g/cm ³
$W_{f,i}$	hmotnostní zlomek prvku i v materiálu	-
N_A	Avogadrova konstanta	1/mol
$A_{W,i}$	atomová hmotnost prvku i	g/mol

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VSTUPNÍ SOUBOR LCT-085 (KONFIGURACE 4)	99
PŘÍLOHA B - ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY.....	104

Příloha A - Vstupní soubor LCT-085 (konfigurace 4)

```
=CSAS25
LEU-COMP-THERM-85 Case 04
ce_v7.1_endf
read composition
' Palivo
U-234 1 0 1.2292E-05 291.15 END
U-235 1 0 1.5912E-03 291.15 END
U-238 1 0 2.2588E-02 291.15 END
O 1 0 4.8382E-02 291.15 END
' Zr/Nb/Hf slitina Zr (pokrytí/výplň)
Zr 2 0 4.2794E-02 291.15 END
Nb 2 0 4.2456E-04 291.15 END
Hf 2 0 6.6297E-06 291.15 END
' Voda
H 3 0 6.6762E-02 291.15 END
O 3 0 3.3381E-02 291.15 END
' 12X18H10T Stainless Steel
Fe 4 0 5.8447E-02 291.15 END
Cr 4 0 1.6469E-02 291.15 END
Ni 4 0 8.1061E-03 291.15 END
Si 4 0 1.3546E-03 291.15 END
Mn 4 0 9.5257E-04 291.15 END
Ti 4 0 6.9554E-04 291.15 END
P 4 0 5.3759E-04 291.15 END
C 4 0 4.7531E-04 291.15 END
Cu 4 0 2.2460E-04 291.15 END
S 4 0 2.9669E-05 291.15 END
' Voda v reflektoru
H 5 0 6.6762E-02 291.15 END
O 5 0 3.3381E-02 291.15 END
end composition
read parameter
GEN=1020
NPG=20000
NSK=20
end parameter
read geometry
unit 4
' palivová tyč nad vodní hladinou pod homím GP
array 4 -0.635 -0.55 29.52
unit 8
' palivová tyč nad homím GP
array 8 -0.635 -0.55 127.90
' palivová tyč
unit 12
' konec palivové tyče v GP
cylinder 2 1 0.300 -2.30 -3.80
'cylinder 3 1 0.310 -2.30 -3.80
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 -2.30 -3.80
unit 13
' palivová tyč nad spodním GP ve vodě
cylinder 0 1 0.06 29.52 -0.00
cylinder 1 1 0.37825 29.52 -0.00
cylinder 0 1 0.3875 29.52 -0.00
cylinder 2 1 0.4525 29.52 -2.30
cuboid 3 1 2p0.635 2p0.55 29.52 -2.30
unit 14
' palivo nad vodou
cylinder 0 1 0.06 125.00 29.52
cylinder 1 1 0.37825 125.00 29.52
cylinder 0 1 0.3875 125.00 29.52
cylinder 2 1 0.4525 125.00 29.52
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 125.00 29.52
unit 15
' zástrčka ze slitiny Zr
cylinder 0 1 0.15 125.70 125.00
cylinder 2 1 0.385 125.70 125.00
cylinder 0 1 0.3875 125.70 125.00
cylinder 2 1 0.4525 125.70 125.00
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 125.70 125.00
unit 16
' část pod homím GP
cylinder 0 1 0.29 126.90 125.70
cylinder 4 1 0.32175 126.90 125.70
cylinder 0 1 0.3875 126.90 125.70
cylinder 2 1 0.4525 126.90 125.70
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 126.90 125.70
unit 17
' část v homím GP
cylinder 0 1 0.29 127.90 126.90
cylinder 4 1 0.32175 127.90 126.90
cylinder 0 1 0.3875 127.90 126.90
cylinder 2 1 0.4525 127.90 126.90
cylinder 0 1 0.47 127.90 126.90
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 127.90 126.90
unit 18
' část nad homím GP
cylinder 0 1 0.29 128.00 127.90
cylinder 4 1 0.32175 128.00 127.90
cylinder 0 1 0.3875 128.00 127.90
cylinder 2 1 0.4525 128.00 127.90
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 128.00 127.90
unit 19
' homí konec paliva
cylinder 2 1 0.300 131.80 130.30
cylinder 0 1 0.4525 131.80 130.30
cylinder 2 1 0.4525 131.80 128.00
```

```
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 131.80 128.00
' prázdné místo v mřížce s dírou
unit 22
' spodní GP
cylinder 5 1 0.310 -2.30 -3.80
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 -2.30 -3.80
unit 23
' moderátor
cuboid 5 1 2p0.635 2p0.55 29.52 -2.30
unit 24
' místo nad moderátorem
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 126.90 29.52
unit 27
' horní GP
cylinder 0 1 0.47 127.90 126.90
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 127.90 126.90
unit 28
' místo nad horním GP
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 131.80 127.90
' místo v mřížce bez díry
unit 32
' spodní GP
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 -2.30 -3.80
unit 33
' moderátor
cuboid 5 1 2p0.635 2p0.55 29.52 -2.30
unit 34
' místo nad moderátorem
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 126.90 29.52
unit 37
' horní GP
cuboid 4 1 2p0.635 2p0.55 127.90 126.90
unit 38
' místo nad horním GP
cuboid 0 1 2p0.635 2p0.55 131.80 127.90
' poloviční místo v mřížce bez díry
unit 42
cuboid 4 1 0.635 0 2p0.55 -2.30 -3.80
unit 43
cuboid 5 1 0.635 0 2p0.55 29.52 -2.30
unit 44
cuboid 0 1 0.635 0 2p0.55 126.90 29.52
unit 47
cuboid 4 1 0.635 0 2p0.55 127.90 126.90
unit 48
cuboid 0 1 0.635 0 2p0.55 131.80 127.90

unit 201
array 201 -28.575 -0.55 -1.1
unit 202
array 202 -28.575 -0.55 -1.1
unit 203
array 203 -28.575 -0.55 -1.1
unit 204
array 204 -28.575 -0.55 -1.1
unit 205
array 205 -28.575 -0.55 -1.1
unit 206
array 206 -28.575 -0.55 -1.1
unit 207
array 207 -28.575 -0.55 -1.1
unit 208
array 208 -28.575 -0.55 -1.1
unit 209
array 209 -28.575 -0.55 -1.1
unit 210
array 210 -28.575 -0.55 -1.1
unit 211
array 211 -28.575 -0.55 -1.1
unit 212
array 212 -28.575 -0.55 -1.1
unit 213
array 213 -28.575 -0.55 -1.1
unit 214
array 214 -28.575 -0.55 -1.1
unit 215
array 215 -28.575 -0.55 -1.1
unit 216
array 216 -28.575 -0.55 -1.1
unit 217
array 217 -28.575 -0.55 -1.1
unit 218
array 218 -28.575 -0.55 -1.1
unit 219
array 219 -28.575 -0.55 -1.1
unit 220
array 220 -28.575 -0.55 -1.1
unit 221
array 221 -28.575 -0.55 -1.1
unit 222
array 222 -28.575 -0.55 -1.1
unit 223
array 223 -28.575 -0.55 -1.1
unit 224
array 224 -28.575 -0.55 -1.1
unit 225
array 225 -28.575 -0.55 -1.1
```



```

'spodni GP pod palivovym polem
unit 899
cylinder 5 1 65.0 -3.80 -32.3
cuboid 0 1 4p65.0 -3.80 -32.3
* palivove pole ve spodnim GP
unit 902
array 902 -28.575 -24.75 -3.80
cylinder 4 1 50.0 -2.30 -3.80
cylinder 5 1 65.0 -2.30 -3.80
cuboid 0 1 4p65.0 -2.30 -3.80
* palivove pole nad spodnim GP v moderatoru
unit 903
array 903 -28.575 -24.75 -2.30
cylinder 5 1 65.0 29.52 -2.30
cuboid 0 1 4p65.0 29.52 -2.30
* palivove pole nad moderatorem
unit 904
array 904 -28.575 -24.75 29.52
cylinder 0 1 65.0 126.90 29.52
cuboid 0 1 4p65.0 126.90 29.52
* palivove pole v homim GP
unit 905
array 905 -28.575 -24.75 126.90
cylinder 4 1 50.0 127.90 126.90
cylinder 0 1 65.0 127.90 126.90
cuboid 0 1 4p65.0 127.90 126.90
* palivove pole nad homim GP
unit 906
array 906 -28.575 -24.75 127.90
cylinder 0 1 65.0 131.80 127.90
cuboid 0 1 4p65.0 131.80 127.90
'horni cast modelu
unit 911
cylinder 0 1 65.0 133.27 131.80
cuboid 0 1 4p65.0 133.27 131.80
'global unit
global unit 900
array 900 -65.0 -65.0 -32.3
cuboid 0 1 4p65.0 133.27 -32.3
end geometry
read array
ara=4
* palivova tyč nad vodou pod GP
nux=1 nuy=1 nuz=3
fill 14 15 16 end fill
ara=8
* palivova tyč nad vodou pod GP'
nux=1 nuy=1 nuz=2
fill 18 19 end fill

ara=201 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r32 10r22 3r22 10r22 11r32 end fill
ara=202 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 10r32 12r22 12r22 10r32 42 end fill
ara=203 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r32 11r22 3r22 11r22 10r32 end fill
ara=204 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 9r32 9r22 8r12 9r22 9r32 42 end fill
ara=205 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r32 7r22 13r12 7r22 9r32 end fill
ara=206 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 8r32 5r22 18r12 5r22 8r32 42 end fill
ara=207 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r32 5r22 19r12 5r22 8r32 end fill
ara=208 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 7r32 4r22 22r12 4r22 7r32 42 end fill
ara=209 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r32 4r22 23r12 4r22 7r32 end fill
ara=210 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 6r32 3r22 26r12 3r22 6r32 42 end fill
ara=211 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r32 3r22 27r12 3r22 6r32 end fill
ara=212 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 5r32 3r22 28r12 3r22 5r32 42 end fill
ara=213 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r32 3r22 29r12 3r22 5r32 end fill
ara=214 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 4r32 3r22 30r12 3r22 4r32 42 end fill
ara=215 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r32 3r22 31r12 3r22 4r32 end fill
ara=216 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 3r32 3r22 32r12 3r22 3r32 42 end fill
ara=217 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r32 3r22 33r12 3r22 3r32 end fill
ara=218 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 2r32 4r22 32r12 4r22 2r32 42 end fill
ara=219 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r32 4r22 33r12 4r22 2r32 end fill
ara=220 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 32 4r22 34r12 4r22 32 42 end fill
ara=221 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 32 5r22 33r12 5r22 32 end fill
ara=222 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 5r22 34r12 5r22 42 end fill
ara=223 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r22 35r12 5r22 end fill
ara=224 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 5r22 34r12 5r22 42 end fill
ara=225 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 32 5r22 33r12 5r22 32 end fill
ara=226 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 32 4r22 34r12 4r22 32 42 end fill
ara=227 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r32 4r22 33r12 4r22 2r32 end fill
ara=228 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 2r32 4r22 32r12 4r22 2r32 42 end fill
ara=229 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r32 3r22 33r12 3r22 3r32 end fill
ara=230 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 3r32 3r22 32r12 3r22 3r32 42 end fill
ara=231 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r32 3r22 31r12 3r22 4r32 end fill
ara=232 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 4r32 3r22 30r12 3r22 4r32 42 end fill
ara=233 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r32 3r22 29r12 3r22 5r32 end fill
ara=234 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 5r32 3r22 28r12 3r22 5r32 42 end fill
ara=235 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r32 3r22 27r12 3r22 6r32 end fill
ara=236 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 6r32 3r22 26r12 3r22 6r32 42 end fill
ara=237 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r32 4r22 23r12 4r22 7r32 end fill
ara=238 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 7r32 4r22 22r12 4r22 7r32 42 end fill
ara=239 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r32 5r22 19r12 5r22 8r32 end fill
ara=240 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 8r32 5r22 18r12 5r22 8r32 42 end fill
ara=241 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r32 7r22 13r12 7r22 9r32 end fill
ara=242 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 9r32 7r22 8r12 7r22 9r32 42 end fill
ara=243 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r32 11r22 3r22 11r22 10r32 end fill
ara=244 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 42 10r32 12r22 12r22 10r32 42 end fill
ara=245 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r32 10r22 3r22 10r22 11r32 end fill

ara=301 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r33 10r23 3r23 10r23 11r33 end fill
ara=302 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 10r33 12r23 12r23 10r33 43 end fill
ara=303 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r33 11r23 3r23 11r23 10r33 end fill
ara=304 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 9r33 9r23 8r13 9r23 9r33 43 end fill

```

```

ara=305 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r33 7r23 13r13 7r23 9r33 end fill
ara=306 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 8r33 5r23 18r13 5r23 8r33 43 end fill
ara=307 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r33 5r23 19r13 5r23 8r33 end fill
ara=308 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 7r33 4r23 22r13 4r23 7r33 43 end fill
ara=309 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r33 4r23 23r13 4r23 7r33 end fill
ara=310 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 6r33 3r23 26r13 3r23 6r33 43 end fill
ara=311 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r33 3r23 27r13 3r23 6r33 end fill
ara=312 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 5r33 3r23 28r13 3r23 5r33 43 end fill
ara=313 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r33 3r23 29r13 3r23 5r33 end fill
ara=314 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 4r33 3r23 30r13 3r23 4r33 43 end fill
ara=315 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r33 3r23 31r13 3r23 4r33 end fill
ara=316 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 3r33 3r23 32r13 3r23 3r33 43 end fill
ara=317 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r33 3r23 33r13 3r23 3r33 end fill
ara=318 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 2r33 4r23 32r13 4r23 2r33 43 end fill
ara=319 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r33 4r23 33r13 4r23 2r33 end fill
ara=320 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 33 4r23 34r13 4r23 33 43 end fill
ara=321 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 33 5r23 33r13 5r23 33 end fill
ara=322 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 5r23 34r13 5r23 43 end fill
ara=323 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r23 35r13 5r23 end fill
ara=324 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 5r23 34r13 5r23 43 end fill
ara=325 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 33 5r23 33r13 5r23 33 end fill
ara=326 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 33 4r23 34r13 4r23 33 43 end fill
ara=327 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r33 4r23 33r13 4r23 2r33 end fill
ara=328 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 2r33 4r23 32r13 4r23 2r33 43 end fill
ara=329 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r33 3r23 33r13 3r23 3r33 end fill
ara=330 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 3r33 3r23 32r13 3r23 3r33 43 end fill
ara=331 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r33 3r23 31r13 3r23 4r33 end fill
ara=332 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 4r33 3r23 30r13 3r23 4r33 43 end fill
ara=333 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r33 3r23 29r13 3r23 5r33 end fill
ara=334 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 5r33 3r23 28r13 3r23 5r33 43 end fill
ara=335 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r33 3r23 27r13 3r23 6r33 end fill
ara=336 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 6r33 3r23 26r13 3r23 6r33 43 end fill
ara=337 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r33 4r23 23r13 4r23 7r33 end fill
ara=338 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 7r33 4r23 22r13 4r23 7r33 43 end fill
ara=339 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r33 5r23 19r13 5r23 8r33 end fill
ara=340 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 8r33 5r23 18r13 5r23 8r33 43 end fill
ara=341 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r33 7r23 13r13 7r23 9r33 end fill
ara=342 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 9r33 9r23 8r13 9r23 9r33 43 end fill
ara=343 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r33 11r23 3r23 11r23 10r33 end fill
ara=344 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 43 10r33 12r23 12r23 10r33 43 end fill
ara=345 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r33 10r23 3r23 10r23 11r33 end fill

ara=401 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r34 10r24 3r24 10r24 11r34 end fill
ara=402 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 10r34 12r24 12r24 10r34 44 end fill
ara=403 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r34 11r24 3r24 11r24 10r34 end fill
ara=404 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 9r34 9r24 8r14 9r24 9r34 44 end fill
ara=405 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r34 7r24 13r14 7r24 9r34 end fill
ara=406 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 8r34 5r24 18r14 5r24 8r34 44 end fill
ara=407 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r34 5r24 19r14 5r24 8r34 end fill
ara=408 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 7r34 4r24 22r14 4r24 7r34 44 end fill
ara=409 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r34 4r24 23r14 4r24 7r34 end fill
ara=410 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 6r34 3r24 26r14 3r24 6r34 44 end fill
ara=411 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r34 3r24 27r14 3r24 6r34 end fill
ara=412 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 5r34 3r24 28r14 3r24 5r34 44 end fill
ara=413 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r34 3r24 29r14 3r24 5r34 end fill
ara=414 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 4r34 3r24 30r14 3r24 4r34 44 end fill
ara=415 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r34 3r24 31r14 3r24 4r34 end fill
ara=416 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 3r34 3r24 32r14 3r24 3r34 44 end fill
ara=417 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r34 3r24 33r14 3r24 3r34 end fill
ara=418 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 2r34 4r24 32r14 4r24 2r34 44 end fill
ara=419 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r34 4r24 33r14 4r24 2r34 end fill
ara=420 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 34 4r24 34r14 4r24 34 44 end fill
ara=421 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 34 5r24 33r14 5r24 34 end fill
ara=422 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 5r24 34r14 5r24 44 end fill
ara=423 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r24 35r14 5r24 end fill
ara=424 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 5r24 34r14 5r24 44 end fill
ara=425 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 34 5r24 33r14 5r24 34 end fill
ara=426 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 34 4r24 34r14 4r24 34 44 end fill
ara=427 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r34 4r24 33r14 4r24 2r34 end fill
ara=428 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 2r34 4r24 32r14 4r24 2r34 44 end fill
ara=429 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r34 3r24 33r14 3r24 3r34 end fill
ara=430 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 3r34 3r24 32r14 3r24 3r34 44 end fill
ara=431 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r34 3r24 31r14 3r24 4r34 end fill
ara=432 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 4r34 3r24 30r14 3r24 4r34 44 end fill
ara=433 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r34 3r24 29r14 3r24 5r34 end fill
ara=434 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 5r34 3r24 28r14 3r24 5r34 44 end fill
ara=435 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r34 3r24 27r14 3r24 6r34 end fill
ara=436 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 6r34 3r24 26r14 3r24 6r34 44 end fill
ara=437 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r34 4r24 23r14 4r24 7r34 end fill
ara=438 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 7r34 4r24 22r14 4r24 7r34 44 end fill
ara=439 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r34 5r24 19r14 5r24 8r34 end fill
ara=440 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 8r34 5r24 18r14 5r24 8r34 44 end fill
ara=441 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r34 7r24 13r14 7r24 9r34 end fill
ara=442 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 9r34 9r24 8r14 9r24 9r34 44 end fill
ara=443 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r34 11r24 3r24 11r24 10r34 end fill
ara=444 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 44 10r34 12r24 12r24 10r34 44 end fill
ara=445 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r34 10r24 3r24 10r24 11r34 end fill

ara=501 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r37 10r27 3r27 10r27 11r37 end fill
ara=502 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 10r37 12r27 12r27 10r37 47 end fill
ara=503 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r37 11r27 3r27 11r27 10r37 end fill
ara=504 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 9r37 9r27 8r17 9r27 9r37 47 end fill
ara=505 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r37 7r27 13r17 7r27 9r37 end fill
ara=506 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 8r37 5r27 18r17 5r27 8r37 47 end fill
ara=507 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r37 5r27 19r17 5r27 8r37 end fill
ara=508 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 7r37 4r27 22r17 4r27 7r37 47 end fill
ara=509 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r37 4r27 23r17 4r27 7r37 end fill
ara=510 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 6r37 3r27 26r17 3r27 6r37 47 end fill
ara=511 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r37 3r27 27r17 3r27 6r37 end fill
ara=512 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 5r37 3r27 28r17 3r27 5r37 47 end fill
ara=513 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r37 3r27 29r17 3r27 5r37 end fill

```

ara=514 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 4r37 3r27 30r17 3r27 4r37 47 end fill
ara=515 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r37 3r27 31r17 3r27 4r37 end fill
ara=516 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 3r37 3r27 32r17 3r27 3r37 47 end fill
ara=517 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r37 3r27 33r17 3r27 3r37 end fill
ara=518 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 2r37 4r27 32r17 4r27 2r37 47 end fill
ara=519 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r37 4r27 33r17 4r27 2r37 end fill
ara=520 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 37 4r27 34r17 4r27 37 47 end fill
ara=521 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 37 5r27 33r17 5r27 37 end fill
ara=522 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 5r27 34r17 5r27 47 end fill
ara=523 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r27 35r17 5r27 end fill
ara=524 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 5r27 34r17 5r27 47 end fill
ara=525 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 37 5r27 33r17 5r27 37 end fill
ara=526 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 37 4r27 34r17 4r27 37 47 end fill
ara=527 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r37 4r27 33r17 4r27 2r37 end fill
ara=528 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 2r37 4r27 32r17 4r27 2r37 47 end fill
ara=529 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r37 3r27 33r17 3r27 3r37 end fill
ara=530 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 3r37 3r27 32r17 3r27 3r37 47 end fill
ara=531 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r37 3r27 31r17 3r27 4r37 end fill
ara=532 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 4r37 3r27 30r17 3r27 4r37 47 end fill
ara=533 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r37 3r27 29r17 3r27 5r37 end fill
ara=534 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 5r37 3r27 28r17 3r27 5r37 47 end fill
ara=535 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r37 3r27 27r17 3r27 6r37 end fill
ara=536 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 6r37 3r27 26r17 3r27 6r37 47 end fill
ara=537 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r37 4r27 23r17 4r27 7r37 end fill
ara=538 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 7r37 4r27 22r17 4r27 7r37 47 end fill
ara=539 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r37 5r27 19r17 5r27 8r37 end fill
ara=540 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 8r37 5r27 18r17 5r27 8r37 47 end fill
ara=541 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r37 7r27 13r17 7r27 9r37 end fill
ara=542 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 9r37 9r27 8r17 9r27 9r37 47 end fill
ara=543 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r37 11r27 3r27 11r27 10r37 end fill
ara=544 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 47 10r37 12r27 12r27 10r37 47 end fill
ara=545 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r37 10r27 3r27 10r27 11r37 end fill

ara=601 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r38 10r28 3r28 10r28 11r38 end fill
ara=602 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 10r38 12r28 12r28 10r38 48 end fill
ara=603 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r38 11r28 3r28 11r28 10r38 end fill
ara=604 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 9r38 9r28 8r8 9r28 9r38 48 end fill
ara=605 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r38 7r28 13r8 7r28 9r38 end fill
ara=606 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 8r38 5r28 18r8 5r28 8r38 48 end fill
ara=607 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r38 5r28 19r8 5r28 8r38 end fill
ara=608 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 7r38 4r28 22r8 4r28 7r38 48 end fill
ara=609 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r38 4r28 23r8 4r28 7r38 end fill
ara=610 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 6r38 3r28 26r8 3r28 6r38 48 end fill
ara=611 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r38 3r28 27r8 3r28 6r38 end fill
ara=612 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 5r38 3r28 28r8 3r28 5r38 48 end fill
ara=613 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r38 3r28 29r8 3r28 5r38 end fill
ara=614 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 4r38 3r28 30r8 3r28 4r38 48 end fill
ara=615 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r38 3r28 31r8 3r28 4r38 end fill
ara=616 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 3r38 3r28 32r8 3r28 3r38 48 end fill
ara=617 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r38 3r28 33r8 3r28 3r38 end fill
ara=618 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 2r38 4r28 32r8 4r28 2r38 48 end fill
ara=619 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r38 4r28 33r8 4r28 2r38 end fill
ara=620 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 38 4r28 34r8 4r28 38 48 end fill
ara=621 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 38 5r28 33r8 5r28 38 end fill
ara=622 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 5r28 34r8 5r28 48 end fill
ara=623 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r28 35r8 5r28 end fill
ara=624 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 5r28 34r8 5r28 48 end fill
ara=625 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 38 5r28 33r8 5r28 38 end fill
ara=626 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 38 4r28 34r8 4r28 38 48 end fill
ara=627 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 2r38 4r28 33r8 4r28 2r38 end fill
ara=628 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 2r38 4r28 32r8 4r28 2r38 48 end fill
ara=629 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 3r38 3r28 33r8 3r28 3r38 end fill
ara=630 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 4r38 3r28 32r8 3r28 3r38 48 end fill

ara=631 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 4r38 3r28 31r8 3r28 4r38 end fill
ara=632 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 4r38 3r28 30r8 3r28 4r38 48 end fill
ara=633 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 5r38 3r28 29r8 3r28 5r38 end fill
ara=634 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 5r38 3r28 28r8 3r28 5r38 48 end fill
ara=635 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 6r38 3r28 27r8 3r28 6r38 end fill
ara=636 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 6r38 3r28 26r8 3r28 6r38 48 end fill
ara=637 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 7r38 4r28 23r8 4r28 7r38 end fill
ara=638 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 7r38 4r28 22r8 4r28 7r38 48 end fill
ara=639 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 8r38 5r28 19r8 5r28 8r38 end fill
ara=640 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 8r38 5r28 18r8 5r28 8r38 48 end fill
ara=641 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 9r38 7r28 13r8 7r28 9r38 end fill
ara=642 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 9r38 9r28 8r8 9r28 9r38 48 end fill
ara=643 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 10r38 11r28 3r28 11r28 10r38 end fill
ara=644 nux=46 nuy=1 nuz=1 fill 48 10r38 12r28 12r28 10r38 48 end fill
ara=645 nux=45 nuy=1 nuz=1 fill 11r38 10r28 3r28 10r28 11r38 end fill

ara=902
nux=1 nuy=45 nuz=1
fill 201 202 203 204 205 206 207 208
209 210 211 212 213 214 215 216 217 218
219 220 221 222 223 224 225 226 227 228
229 230 231 232 233 234 235 236 237 238
239 240 241 242 243 244 245 end fill

ara=903
nux=1 nuy=45 nuz=1
fill 301 302 303 304 305 306 307 308
309 310 311 312 313 314 315 316 317 318
319 320 321 322 323 324 325 326 327 328
329 330 331 332 333 334 335 336 337 338
339 340 341 342 343 344 345 end fill

ara=904
nux=1 nuy=45 nuz=1
fill 401 402 403 404 405 406 407 408
409 410 411 412 413 414 415 416 417 418
419 420 421 422 423 424 425 426 427 428
429 430 431 432 433 434 435 436 437 438
439 440 441 442 443 444 445 end fill

ara=905
nux=1 nuy=45 nuz=1
fill 501 502 503 504 505 506 507 508
509 510 511 512 513 514 515 516 517 518
519 520 521 522 523 524 525 526 527 528
529 530 531 532 533 534 535 536 537 538
539 540 541 542 543 544 545 end fill

ara=906
nux=1 nuy=45 nuz=1
fill 601 602 603 604 605 606 607 608
609 610 611 612 613 614 615 616 617 618
619 620 621 622 623 624 625 626 627 628
629 630 631 632 633 634 635 636 637 638
639 640 641 642 643 644 645 end fill

ara=900
nux=1 nuy=1 nuz=7
fill 899 902 903 904 905 906 911 end fill
end array
END DATA
END

Příloha B - Elektronické přílohy

Seznam elektronických příloh v souboru *Vstupní soubory.zip*

- LCT020
 - *LEU-COMP-THERM-020 case1-7.inp*
- LCT021
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-6.inp*
- LCT030
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-12.inp*
- LCT053
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-14.inp*
- LCT061
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-10.inp*
- LCT064
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-7.inp*
- LCT070
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-12.inp*
- LCT075
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-6.inp*
- LCT085
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-13.inp*
- LCT094
 - *LEU-COMP-THERM-021 case1-11.inp*