

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

***Numerické modelování rozptylu
znečišťujících látek emitovaných z JE
Dukovany.***



Vedoucí práce: doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.

Autor práce: Bc. Valentina Badashkeeva

Praha 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Valentina Badashkeeva

Environmentální modelování

Název práce

Numerické modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany

Název anglicky

Numerical modeling of dispersion of pollutants emitted from Dukovany NPP

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je numerické modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany.

Popis znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany a analýza jejich vlivů na životní prostředí.

Vytvoření matematického modelu rozptylu znečišťujících látek pomocí zvoleného software (Ansys Fluent).

Simulace transportu znečišťujících příměsí emitovaných z JE Dukovany a analýza vlivu na člověka a životní prostředí.

Metodika

Aplikace software pro numerické modelování v praktické části.

V teoretické části práce využití literární rešerše z doporučené literatury.

Doporučený rozsah práce

45 stran textu

Klíčová slova

znečišťujících látky, numerické modelování, MVA

Doporučené zdroje informací

BUBNÍK, Jiří. Symos '97: systém modelování stacionárních zdrojů : metodická příručka pro výpočet znečištění ovzduší z bodových, plošných a liniových zdrojů [online]. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 1998.

VACH, Marek. Ochrana ovzduší [online]. 2010. Česká zemědělská univerzita v Praze

Vach, M. – Van Minh, D. Numerical Modeling of Flow Fields and Dispersion of Passive Pollutants in the Vicinity of the Temelín Nuclear Power Plant. Environmental Modeling & Assessment, 2011,16 (2), p.135-143.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 27. 11. 2017

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 11. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma: „Numerické modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany" vypracovala samostatně a použila jsem pouze primární a sekundární zdroje informací uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Praze 18.04.2019

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu doc. Mgr. Marku Vachovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování této diplomové práce, vstřícnost, cenné rady a připomínky.

Abstrakt:

Předmětem dané diplomové práce je zjištění výsledků numerického modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných JE Dukovany.

Nejprve práce popisuje základní informace a environmentální dopady jaderné elektrárny Dukovany v mezní vrstvě atmosféry.

Poté následuje krátký popis způsobů modelování proudění znečišťujících látek v mezní vrstvě atmosféry v důsledku teoretické havarijní situace a charakteristika polohy jaderné elektrárny z hlediska legislativních požadavků. Metodika shrnuje popis způsobů numerického modelování v softwaru ANSYS FLUENT, který byl použit při psaní dané diplomové práce. Praktická část popisuje aplikování zvolené metody na teoretickou situaci.

Na závěr daná práce modeluje teoretický výbuch nebo jinou havarijní situaci v jaderné elektrárně Dukovany a simuluje transport znečišťujících látek v okolí jaderné elektrárny.

Klíčová slova: znečišťující látky, numerické modelování, elektrická energie, dopady na životní prostředí, jaderný reaktor.

Abstract :

The object of this thesis is to estimate (evaluate) the results of a numerical modelling of the dispersion of pollutants emitted by Dukovany.

The thesis starts with the description of the basic information and environmental consequences (impacts) of the nuclear power plant Dukovany on (in) the atmospheric boundary layer.

Then follows a brief description of the modelling methods for (of) the pollutants flow in (on) the atmospheric boundary layer due to theoretical accident, characteristic of the position of the nuclear power plant in compliance with the legislative requirements. The methods include the description of the numerical modeling in the software ANSYS FLUENT, which was used in this thesis. The practical part is focused on the application of the chosen methods on the theoretical situation.

In conclusion the thesis models the theoretical explosion or other accident in the Dukovany nuclear power plant and simulates the flow of pollutants in the environs of the nuclear power plant.

Keywords: pollutants, numerical modelling, electrical energy, environmental impacts, nuclear reactor.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	3
3. Literární rešerše.....	4
3.1. Základní informace o Jaderné elektrárně Dukovany.....	8
3.2. Znečišťující látky a jich vliv na okolní prostředí	12
3.3. Mamatatické modely kvality ovzduší.....	17
3.3.1. Gaussovské modely rozptylu kouřové vlečky	18
3.3.2. Lagrangeovy modely	19
3.3.3. Eulerovský modely	19
3.4. Referenční modely	20
3.5. Numerické modelování	20
4. Charakteristika studijního území.....	22
5. Metodika práce.....	24
6. Praktická část	26
6.1. Vytvoření podkladu	26
6.2. Modelování v softwaru.....	26
7. Výsledky a diskuse.....	30
8. Závěr	39
9. Přehled literatury a použitých zdrojů	41
10. Přílohy	44

1. Úvod

V současné době roste poptávka po elektrické energii a bude se zvyšovat se stále rostoucí rychlostí (Kolier D., Chjuitt D., 1989). Významným energetickým zdrojem pro Evropskou unii je jaderná energetika, která zabezpečuje kolem čtvrtiny celkové výroby elektřiny. Ze 132 evropských jaderných reaktorů přibližně 40% budou provozovány až do roku 2025. Provozovatele mají možnost využití dodatečných investic a programu prodloužení životnosti (Comby B., 2007).

Jaderná energie představuje systém schopný uspokojit energetické potřeby po celou dobu využití elektrické energie lidstvem (Margulova T., 1989)..

Krátce můžeme říci, že jaderná elektrárna se podobá tepelně elektrárně. Rozdíl od klasické tepelné elektrárny se v podstatě spočívá jen ve zdroji tepla, který je nutný ke vzniku páry. Teplo v jaderné elektrárně nevzniká spalováním fosilního paliva, které se využívá v tepelných elektrárnách. V jaderném reaktoru probíhá reakce štěpení uranu U^{235} . Pára, která vzniká během procesu, pohání turbínu a elektrická energie se vyrábí generátorem. V roce 1954 byl vytvořen první elektrický proud "z jádra". V dnešní době jaderné elektrárny se vyskytují ve mnoha různých zemích a mají odlišností v typu reaktorů, stavebním a konstrukčním provedení (Bromová E., Vargončík D., Sovadina M., 2013). Daná diplomová práce analyzuje dvouokruhovou jadernou elektrárnu s lehkovodním tlakovým reaktorem.

Vliv libovolného zdroje energie je rozsáhlý. Zahrnovat může hodně různých složek životního prostředí jak dohromady tak i zvlášť (Margulova T. H., 1989). Výroba a používání (využívání) jakékoli elektrické energie vyvolává vznik velkého množství znečišťujících látek, a to nejenom v půdě a vodě, ale i v ovzduší. Stoupence jaderné energetiky zdůrazňují klády daného způsobu výroby energie, především to, že při daném způsobu nevznikají skleníkové plyny a existuje možnost využití v jiném rozsahu. Kritici jaderné energetiky upozorňují na problémy spojené s odpady z jaderných reakcí, nebezpečí zneužití štěpných materiálů za účelem vytváření jaderných zbraní, a riziko vzniku závažných havárií vyvolávajících významné úniky do prostředí radioaktivních materiálů (Pamela J., 2006).

Tato diplomová práce se zabývá numerickým modelováním proudění znečišťujících částic v mezní vrstvě atmosféry (MVA) v softwaru ANSYS FLUENT. Základem

modelování byla teoretická situace výbuchu z reaktoru nebo jiná havarijní situace vyvolávající únik znečišťujících látek do ovzduší.

Mezní vrstva atmosféry (MVA) je spodní částí troposféry, která má výšku od stovek metrů až do dvou kilometrů. Nerovnost (drsnot) povrchu a jiné meteorologické parametry ovlivňují výšku mezní vrstvy. Procesy v MVA ve značné míře určují rozptyl znečišťujících látek a úroveň znečištění ovzduší (Vach M., 2010).

Rozptyl znečišťujících látek v MVA je těsně spojen s intenzitou turbulentního promíchávání, a nejvíce ovlivňován následujícími vzájemně provázanými základními parametry. Mezi tyto parametry patří: proudění v atmosféře, rozložení tlakových útvarů a vymezené vertikálním teplotním gradientem stabilitní podmínky v atmosféře (Vach M., 2010).

V teoretické části dané práce byla uvedena základní informace o jaderné elektrárně Dukovany, znečišťujících látkách a jejich vlivu na okolní prostředí. Byly popsány matematické a referenční modely, numerické modelování pro simulaci proudění emisí v mezní vrstvě atmosféry (MVA). V metodické části byla probírána metodika, simulace modelu a modelování rozptylu v softwaru ANSYS FLUENT. V praktické části diplomové práce byla aplikována zvolená metoda modelování a provedena analýza výsledků.

Závěrem této diplomové práce je hodnocení radiační situace v České republice a výsledky simulace výbuchu z reaktoru jaderné elektrárny Dukovany nebo jiné havarijní situace.

2. Cíle práce

Hlavním cílem dané diplomové práce je provedení numerického modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany v případě výbuchu nebo jiné havarijní situace.

Pro splnění hlavního cíle je nezbytné splnění dílčích cílů, mezi které patří analýza provozu jaderné elektrárny a její vliv na okolní prostředí, krátký popis a následná volba vhodného matematického modelu a osvojení si metodiky numerického modelování, využití vhodných matematických modelů pro provedení modelování simulace transportu znečišťujících látek v ovzduší v softwaru ANSYS FLUENT. Závěr musí obsahovat výsledky simulace transportu prachových částic ve formě mapových výstupu, které obsahují informaci o transportu a koncentraci znečišťujících látek.

3. Literární řešení

V dnešní době elektřina je nezbytným prvkem pro dosažení kvalitního úrovně života. Elektrická energie je základním druhem energie, který získáváme z nějakého zdroje (vody, uhlí, větru, fosilního a jaderného paliva apod.). Dostává se elektrická energie z tepelné nebo mechanické energie. Využití slunečního záření (fotovoltaický jev v solárních elektrárnách) je jedním z alternativních způsobů výroby energie. Obor zvaný energetikou se věnuje výrobě elektrické energie (Antonov V.F., Chernysh A.M., Pasechnik V.I., Voznesensky S.A., Kozlova E.K., 2000).

Proces výroby energie v jaderné elektrárně je ekologickým způsobem, pomocí kterého se získává velké množství energie, potřebné v současné době a v budoucnu. V jaderné energetice se často využívá štěpná reakce thoria, uranu a plutonia (Vorobiev V. V., 2009).

Významnou roli hraje využití jádra, kolem třetiny vyrobené elektřiny se vyrábí v jaderných elektrárnách. Jaderné elektrárny se staví ve Francii, Finsku, Rusku, Bělorusku, na Slovensku, připravuje se výstavba v Litvě, Finsku, Polsku, České republice, Rumunsku, Bulharsku, Ukrajině, Maďarsku, Rusku, Turecku a Spojeném království. Mezi země s největším počtem jaderných zdrojů patří: Spojené státy – 99, Francie – 58, Japonsko – 42, Čína – 38, Rusko – 37, Jižní Korea – 24, Indie – 22, Kanada – 19, Velká Británie – 15 a Ukrajina – 15. Nejčastěji se v Evropské unii využívá tlakovodní typ reaktorů (PWR) – 65% a varný typ reaktorů (BWR) – 22%. Také se používají reaktory grafitové, rychlé, plynem hlazené, těžkovodní a další (Skupina ČEZ, 2009).

Základní částice hmoty – atom, který je tvořen jádrem obklopeným elektrony. Jádro se skládá z neutronů a protonů. Pomocí neutronů v reaktoru probíhá štěpení jádra, během kterého dochází k uvolnění energie. Jádro uranu ^{235}U zásahem neutronu se rozpadne, a to na jak na dva, tak i na větší počet odštěpků, vzájemně se odpuzujících. Kvůli tomu se odštěpky vzdalují od sebe s velkou rychlostí a pohybová energie při zabrzdění odštěpků v prostředí se mění na tepelnou. Během štěpení se uvolňují další 2 – 3 neutrony, a pro zajištění největší pravděpodobnosti rozštěpení následujícího jádra se musí snížit jejich rychlost. Přispívá tomu moderátor, reaktor VVER za tímto účelem používá chemicky upravenou demineralizovanou vodu (chladiivo). Ionizující

záření, vznikající štěpením jádra, se absorbuje v chladivu, samotném palivu a konstrukčních materiálech (Kluchnikov A.A., Pazychin E.M., Shigera V.U., 1984).

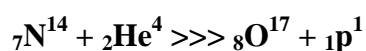
Reakci rozpadu jádra v roce 1938, který stál zlomovým, objevili chemici z Německa. Fritz Strassman a Otto Hahn objevili reakci, během které dochází k uvolnění velkého množství energie. Teď každá jaderná elektrárna pracuje na principu štěpení jádra (Vaněk V., 2008).

Radioaktivita je jevem, při kterém nestabilní jádra nuklidů se samovolně přeměňují (bez zásahu z vnějšku) a současně se vysílá ionizující (radioaktivní) záření. Stabilní nuklidy vyžadují vnější zásah pro přeměnu jader. Přeměna jader, která byla podnícena vzájemným působením s jinými částicemi (příp. i jádry) se nazývá jadernou reakcí, přičemž taková reakce může způsobit vznik jader jiných prvků. Takovým způsobem pomocí vhodných jaderných reakcí se získávají umělé radionuklidy, které se využívají v medicíně nebo průmyslu (Margulova T.H., 1989).

Dostatečné urychlení částic v urychlovačích je jedním ze způsobů dodání energie, potřebné pro vznik jaderných reakcí. Pro jiné reakce je naopak charakteristickým rysem uvolnění energie (nejčastěji kinetická energie se rozlétajících částic) (Skupina ČEZ, 2012).

Využívá se rozdělení jaderných reakcí podle různých kritérií. Jedním z kritérií je vztah mezi původními jádry a vzniklými jádry:

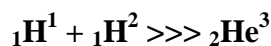
„transmutace - z původního jádra vzniká jádro s málo odlišným protonovým číslem



štěpení jader - z původního jádra vznikají dvě jádra (fragmenty) s přibližně stejnými protonovými čísly



jaderná syntéza - dvě jádra vytvářejí jediné jádro s větším protonovým číslem“

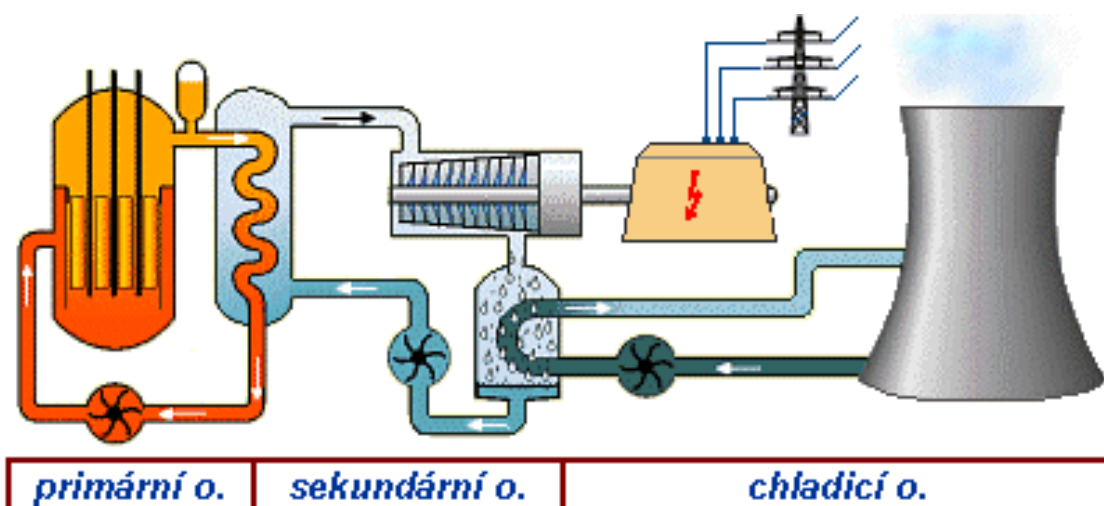


Z hlediska využití jaderné energie mají zásadní význam dva druhy jaderných reakcí - syntéza jader (jaderná fúze) a štěpení jader (štěpná reakce) (Kusala J., 2003).

Sloučení v jedno větší jádro, pomocí reakce dvou atomových jader, u kterých je malé atomové číslo, a současné uvolňování velkého množství energie, a to v podobě světla, se nazývá jadernou fúzí (Combo B., 2007).

Jaderná fúze se charakterizuje čistotou pro okolí a neomezeností zdroje, proto je ideální variantou pro zajištění energií na dlouhé období (Pamela J., 2006).

„Jaderná část elektrárny je primární okruh, který umožňuje získávat tepelnou energii z jaderného paliva prostřednictvím štěpné řetězové reakce, nepřetržitě ji pomocí chladiva odvádět a přeměnit ji na formu tepelné energie využitelné v parní turbíně. Sekundární okruh v jaderné elektrárně je systém zařízení, který umožňuje přeměnit tepelnou energii páry v mechanickou energii rotoru parní turbíny“ (Obr.1).



Obr. 1: Jaderná elektrárna- okruhy , www.cez.cz

„Nejaderná část elektrárny se prakticky neliší od běžné tepelné elektrárny a je tvořena sekundárním a chladicím okruhem (Obr.1). Horká pára z parogenerátorů se přivádí do vícestupňové parní turbíny. Roztočená turbína pohání generátor elektrického proudu, který se po transformaci na velmi vysoké napětí přivádí do rozvodné sítě. Z turbíny přichází pára do kondenzátoru, ve kterém po ochlazení zkapalní a vrací se zpět do parogenerátoru. Chlazení páry zajišťuje voda, cirkulující chladicím okruhem mezi kondenzátorem a chladicími věžemi. Voda ohřátá v kondenzátoru se v chladicí věži ochlazuje proudícím vzduchem“ (Kusala J., 2003).

Velké množství uranu se nachází a používá se na území České republiky jako palivo pro jaderné elektrárny. V dnešní době prvky jsou používány v JE Dukovany a JE Temelín. Po 2. světové válce do SSSR bylo odváženo hodně uranu na zpracování po dohodě o československo - sovětské spolupráci (Kessler G., 1986).

Celková produkce uranu za období 1946 – 2004 v České republice dosáhla přibližně 109 tisíc tun. Tého čísla řadí ČR na 7. místo za jíní země jako Kanada, USA, Německo, JAR, Ruská federace a Austrálie. Kvůli snížení cen uranu na světovém trhu a zájmu ruského odběratele měl další vliv i tlak ze strany ochránců životního prostředí, takže v devadesátých letech začal pokles těžby uranu, až nakonec byla uzavřena většina dolů v ČR (Comby B., 2007).

Těžba v poslední době probíhá jen v Dolní Rožínce u Žďáru nad Sázavou, ale její využívání by mělo trvat ještě několik let. V celé Evropě tento zdroj uranu je jediné místo a dobývání je podle těžařů pořád rentabilní (Petr I., 1979).

Energetici očekávají, že výroba jaderné elektrárny v Dukovanech v období od letošního února do dubna bude nejvyšší za deset let. Důvodem je ideální teplota vody v chladících věžích a plný výkon všech čtyř bloků. Elektrárna nyní vyrábí asi 2000 MWh elektřiny za hodinu, což odpovídá celoroční spotřebě 600 českých domácností. Pokud výkon vydrží do konce dubna, mohla by elektrárna vyrobit přes čtyři terrawathodiny (TWh), což by byl rekord za deset let (Singer J., 1997).

3.1. Základní informace o Jaderné elektrárně Dukovany



Obr. 2: JE Dukovany, www.google.cz

V České republice jaderná elektrárna Dukovany patří mezi největší, vysoce spolehlivé a ekonomicky výhodné energetické zdroje ČEZ, a. s. Roční výroba elektrické energie přesahuje 15 TWh (asi 20% z celkové spotřeby elektřiny v České republice) (Obr.2). Elektrárna Dukovany dokáže vyrobit elektřinu s nejnižšími měrnými náklady.

Jaderná elektrárna z energie od jaderného štěpení vyrábí elektřinu. Nejčastěji jako palivo používá uran, získávaný extrahováním přírodního uranu z rudy. Potom uran je převeden na oxid uraničitý, zpracován do tablet a smontován do podoby palivových tyčí (Comby Bruno, 2007).

Jaderná elektrárna Dukovany je první jadernou elektrárnou postavenou na českém území. V elektrárně jsou 4 výrobní bloky s tlakovodními rektory typu VVER 440. První reaktorový blok byl uveden do provozu v květnu 1985 a od července 1987 jsou v provozu všechny čtyři výrobní bloky. V rámci zvyšování účinnosti a využití výkonových rezerv došlo ke zvýšení instalovaného výkonu z původních 4 x 440 MW na současných 4 x 510 MW (Atomic- energy.ru, 2019).



Výrobní zařízení elektrárny, technologie i bezpečnostní systémy jsou kontinuálně modernizovány a elektrárna splňuje všechny současné požadavky na provoz jaderných elektráren. Na bezpečnost a spolehlivost provozu dohlíží několik domácích i mezinárodních úřadů (SÚJB, MAAE, WANO a další). V roce 2016-2017 elektrárna obdržela nové provozní licence pro všechny čtyři bloky na dobu neurčitou doplněné o několik provozních podmínek. Předpokládaný provoz elektrárny je do roku 2037 s možností prodloužení až do roku 2047.

Elektrárna Dukovany je v provozu od roku 1985, loni dodala 14,25 TWh elektřiny. *„ČEZ teď prověřuje možnosti provozu nynějších bloků přibližně do roku 2045, zatímco dosavadní strategie počítá s jejich odstavováním okolo roku 2035. Prodloužení energetická firma zvažuje kvůli zajištění kontinuity výroby elektřiny v této lokalitě. ČEZ sice připravuje v Dukovanech stavbu jednoho až dvou nových jaderných bloků, konečné rozhodnutí o termínech výstavby ale zatím nepadlo“* (Singer J., 1997).

Elektrárna je základním zdrojem naší energetické soustavy, která svoji výrobou dlouhodobě pokrývá přes 20% celkové spotřeby České republiky a výrazně tak přispívá naší energetické bezpečnosti a soběstačnosti. Za celou dobu provozu vyrobila přes 433 miliard kWh elektrické energie, což by stačilo na víc jak 28 let současné spotřeby všech domácností (Janouch F., 2011).

Jaderná elektrárna Dukovany je největším zaměstnavatelem v regionu. Přímou v elektrárně pracují tři tisíce zaměstnanců Skupiny ČEZ a dodavatelů. Dále provedená studie Karlovy univerzity prokázala, že s provozem elektrárny souvisí až třicet tisíc pracovních míst.

„V jaderné elektrárně Dukovany jsou instalovány čtyři tlakovodní reaktory (PWR). Projektové označení těchto reaktorů je VVER 440/213 (VVER- znamená Vodou chlazený, Vodou moderovaný Energetický Reaktor). Každý ze čtyř reaktorů má tepelný výkon 1375 MW a disponuje elektrickým výkonem 510 MW (Obr.3). Elektrárna je uspořádána do dvou hlavních výrobních bloků. V každém z nich jsou dva reaktory se všemi přímo souvisejícími zařízeními včetně strojovny s turbínami a generátory.“ (Skupina ČEZ, 2009).

Parametry jaderných reaktorů našich elektráren		
	JE Dukovany	JE Temelín
typ reaktoru	VVER 440	VVER 1000
tepelný výkon	1375 MW	3000 MW
průměr tlak. nádoby	3,56 m	4,5 m
výška tlak. nádoby	11,8 m	10,9 m
palivové kazety	312 ks	163 ks
hmotnost paliva	42 t	92 t
moderátor a chladivo	obyčejná (lehká) voda	obyčejná (lehká) voda
tlak v reaktoru	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva	267 °C - 297 °C	290 °C - 320 °C
		

Obr. 3 : Parametry jaderných reaktorů, www.cez.cz

Aktivní zóna je část reaktoru, ve které je uloženo palivo a také ve kterém probíhá štěpná reakce (Skupina ČEZ, 2004).

Štěpný materiál – uran musí být zpracován technologickým postupem velmi náročným na vysokou kvalitu a čistotu materiálu i jeho velmi přesné opracování do formy jaderného paliva. Protože požadovanou řetězovou reakci mohou způsobit jen neutrony o určité energii, tzv. pomalé neutrony, musí být jaderné palivo uskupeno ve velmi přesné geometrické formaci spolu s moderátorem, tj. materiálem zpomalujícím neutrony uvolňované při štěpení na energii potřebnou pro dosažení srážek s dalšími atomy paliva a jejich rozštěpení. Je-li jako moderátor používána voda s pouze přirozenou, tj. velmi malou koncentrací deuteria, musí být k dosažení řetězové reakce používáno palivo obohacené o izotop U-235 (Hill J., 1978).

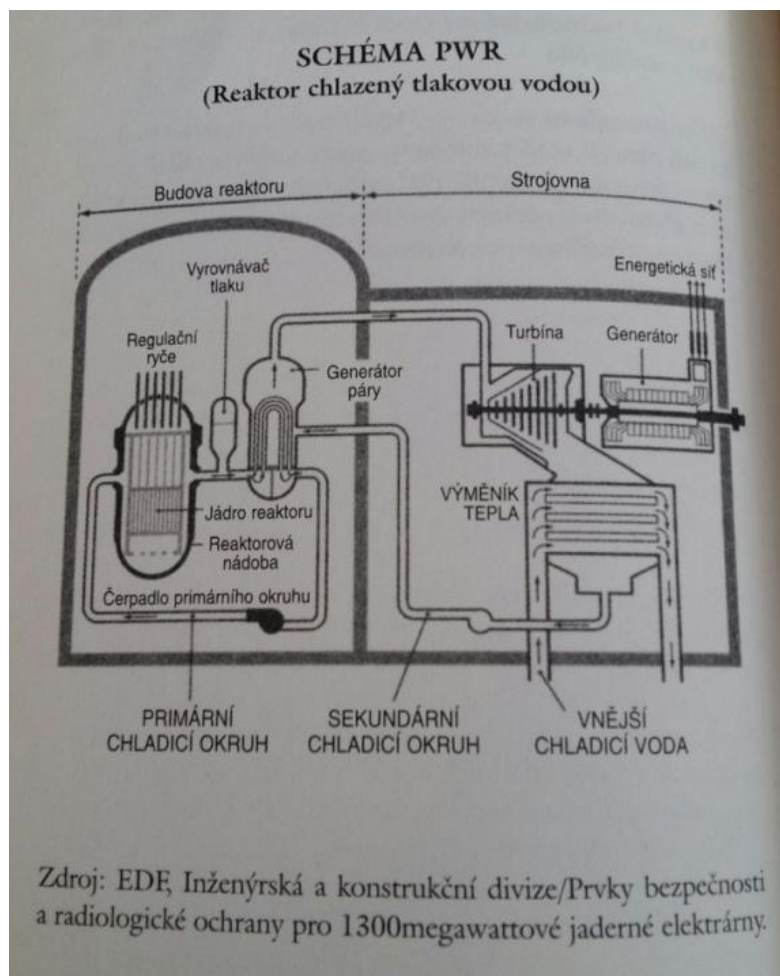
Přeměnou na oxid uraničitý UO_2 začíná výroba paliva. Oxid uraničitý se lisuje do malých pelet (o hmotnosti asi 5 g), které se vkládají do hermeticky uzavřených

trubek ze zirkonové slitiny a vytvářejí palivové proutky. Svazek palivových proutků tvoří palivovou kazetu (Evropská komise, 2006).

Uranové tyče se nachází v aktivní zóně jaderného reaktoru v ocelové nádobě, která je ponořena do vody primárního chladicího systému. Ocelová nádoba je o průměru 5 metrů a výšce 10 metrů. Uvnitř reaktorové nádoby jaderným štěpením v primárním chladicím systému produkuje v palivu teplo, které se ohřívá vodu proudící kolem palivových tyčí (Comby Bruno, 2007).

Při zastaveném reaktoru probíhá výměna paliva zpravidla jednou za 1 až 1,5 roku. Kazetami s čerstvým palivem se nahradí 1/4 až 1/3 starých palivových kazet. *„Použité palivo se moc neliší od paliva čerstvého, změnila se jeho vnitřní struktura. Místo části jader uranu 235 se v něm vyskytují jádra fragmentů a palivo se stalo radioaktivním. Výměna probíhá pod vodou v bazénu vedle reaktoru, kazety s použitým palivem se několik let ochlazují a teprve pak se přemístí do meziskladu použitého paliva. Při svém rozpadu radioaktivní štěpné produkty produkují stále teplo, proto je potřeba použité palivové soubory chladit, než se nejaktivnější radionuklidy rozpadnou a teplota i radioaktivita klesne na úroveň, kdy je s nimi možno dále manipulovat“* (Skupina ČEZ, 2004).

V tlakovodním reaktoru (PWR) z nádoby se zahřátou vodou z horkého paliva se odvádí potrubím tato voda pod tlakem do výměníku tepla, kde zahřívá sekundární okruh (Obr.4). V sekundárním okruhu se vytváří pára pohánějící turbínu. Ve varném reaktoru BWR pohání turbínu pára, která vzniklá v primárním okruhu v jaderném reaktoru na elektrárně. Generátor převádí mechanickou energii při spojení s turbínou na elektrickou. (Kessler G., 1986).



Obr. 4 : Schéma PWR, Comby B.

3.2. Znečišťující látky a jich vliv na okolní prostředí

Bez produkce odpadů se neobejde jakákoliv lidská činnost, není výjimkou i jaderná energetika. Každoročně země Evropské unie produkuje 2 miliardy tun libovolného odpadu druhu. Z toho je 35 milionů klasifikováno jako „nebezpečný odpad“ (pesticidy, asbest, těžké kovy atd.). Přibližně na člověka jsou 80 kg nebezpečného a 0,00013 m³ radioaktivního odpady (Skupina ČEZ, 2009).

„Znečišťující látka - látka, která má přímo nebo může mít po fyzikální nebo chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou škodlivý vliv, vnesená do vnějšího ovzduší nebo v něm druhotně vznikající, má přímo nebo může mít po fyzikální nebo chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou škodlivý vliv na život a zdraví lidí a zvířat, na životní prostředí, na klimatický systém Země nebo na hmotný majetek nebo obtěžuje zápachem“ (Vach M.,2010).

Hlavní v zásadě je, že před zahájením výstavby jaderné elektrárny, by mělo být na ploše pro výstavbu jaderné elektrárny provedeno biologické hodnocení a podle kterého by mělo být rozhodnuto o přesunu chráněných druhů fauny a flóry na předem vytipovaná vhodná stanoviště. Plochy stanoviště je nutno po výstavbě zrekultivovat do původního stavu a na nezastavěných plochách provést zatravnění a výsadbu druhově vhodných dřevin (Singer J., 1997).

Jak již bylo zmíněno v předcházejících kapitolách, jsou radiační vlivy provozu dány uváděním radionuklidů do životního prostředí formou výpustí. Snížení těchto vlivů spočívá v technologické kázni a udržování zařízení majících vliv na objem a kvalitu výpustí na provozních parametrech odpovídajících optimálnímu provoznímu režimu. emisí zdrojů znečišťování (továrny, spalovny, atd...). Modelování obecně probíhá na základě různých modelů, statistických nebo dynamických (DeSantis F., Allegrini I., 1996).

Jedním ze hlavních požadavků na radiační bezpečnost při provozu jaderných elektráren je nedovolit neřízené uniky, aby do životního prostředí ve velkém množství nedostali radioaktivní látky. Z tohoto důvodu od životního prostředí odděleny několika bariérami. První bariérou je vlastní fixace radioaktivních látek v palivových tabletách. Druhou bariérou jsou hermeticky těsné palivové proutky, ve kterých jsou tablety zataveny. Třetí bariérou je těsný primární okruh. Čtvrtá bariéra je tvořena hermetickým boxem (Kusala J., 2004).

Antoni Henry Becquerel objevil roku 1896 nový druh záření při studiu luminiscence minerálů. Nové záření, které proniká pevnými látkami, má ionizační účinky a jeho průběh se nedá nijak ovlivnit, bylo od přírodního uranu. Za objev radioaktivity v 1903 roce dostali Becquerel spolu s P. a M. Curieovými Nobelovu cenu. Jednotka aktivity byla nazvána jeho jménem 1 Bq (becquerel)(Skupina ČEZ, 2010).

Maximální efektivní dávka z výpustí do ovzduší z JE Dukovany vypočtená programem RDEDU činila 0,0262 μSv , což představuje 0,066 % čerpání z ročního autorizovaného limitu 40 μSv . Největší podíl na celkové výpusti do ovzduší představují výpusti 14C, více než 95 % pro JE Dukovany. Více informací je v příloze.

Maximální efektivní dávka z výpustí do vodotečí z JE Dukovany vypočtená programem RDEDU činila 2,446 μSv , což představuje 40,8 % čerpání z ročního

autorizovaného limitu 6 μSv . Dominantním radionuklidem ve výpustech do vodotečí z jaderných elektráren je radionuklid ^3H , jehož obsah ve výpustech je dán technologií jaderné elektrárny a během let se při normálním provozu (mimo odstávky) výrazně nemění. Na celkové hodnotě kapalných výpustí se v roce 2017 tento radionuklidů podílel více než 99 % pro JE Temelín a téměř 97 % pro JE Dukovany (Zpráva výslední činnosti SUJB, 2017).

Na žádném z měřicích míst, které byly pozorovány, nebylo zaznamenáno překročení stanovených zásahových úrovní, které by vyžadovalo opatření na ochranu obyvatel či životního prostředí. Různé variace v hodnotách dávkového příkonu jsou způsobovány fluktuacemi přírodního pozadí.

K zamezení nežádoucích úniků radioaktivních látek ze systémů bude sloužit systém technických a organizačních opatření vytvářejících několikanásobné bariéry. Tato opatření budou zaměřena k prevenci o omezení následků událostí s radiačními důsledky, které by mohly být způsobeny jak chybou obsluhy, tak technickou závadou (Mezinárodní agentura pro atomovou energii, 1997).

Stacionární zdroj znečišťování - ucelená technicky dále nedělitelná stacionární technická jednotka nebo činnost, která znečišťuje nebo by mohla znečišťovat ovzduší.

Plyn radon je produkt alfa rozpadu uranu. Dnes je to hlavní zdroj přírodní radioaktivity. Radon je přítomen v atmosféře od zrození planety před více než 4 miliardami let. Přirozená dávka radonu není nebezpečná. V atmosféře rozpadá a dostáváme polonium, poslední radioaktivní prvek rozpadové řady. Polonium je pevná látka a její částice proto pomalu dopadají na zem a tvoří tak neviditelný radioaktivní déšť. Polonium je několikrát toxičtější než plutonium. (Comby Bruno, 2007).

Mezní vrstva atmosféry (MVA) - spodní část troposféry, v níž se bezprostředně projevuje vliv zemského povrchu na pole meteorologických prvků. Výška mezní vrstvy narůstá od stovek metrů až přibližně do 2 km v závislosti na míře nerovnosti (drsnosti) povrchu a dalších meteorologických parametrech. Rozptyl znečišťujících látek (a tím i úroveň znečištění ovzduší) je převážně určován procesy v MVA. Spodní část MVA - do několika desítek metrů je tvořena přízemní vrstvou atmosféry, v níž se vlivy povrchu projevují zvláště výrazně. V rámci posuzování kvality

ovzduší z hlediska imisních limitů stanovených za účelem ochrany zdraví lidí bývá zpravidla vyhodnocována úroveň znečištění v této vrstvě, resp. v úrovni do 2 m nad povrchem (tzv. "dýchací vrstva") (Bubník J., 1998).

Modelování znečištění ovzduší si lze jednoduše představit jako výpočet hodnot koncentrací znečišťujících látek v zájmových bodech prostoru (v tomto kontextu referenčních bodech).

Na základě výsledků, za normálních podmínek provozu, situace v rámci monitorování radiační situace na celém území ČR a monitorování jaderných zařízení včetně jejich okolí lze tvrdit, že v roce 2017 na území České republiky nedošlo k významnému úniku do prostředí radionuklidů. Výpusti do ovzduší ani do vodotečí z JE Dukovany v roce 2017 nepřekročily stanovené autorizované limity (Zpráva výslední činnosti SUJB, 2017).

V monitorovaných položkách životního prostředí a potravních řetězců i v lidském těle je stále ještě aktivita ^{137}Cs měřitelná nízká. Do prostředí ^{137}Cs v atmosféře se dostalo po černobylské havárii a zkouškách jaderných zbraní, naměřené hodnoty aktivity ^{137}Cs se již téměř nemění. Rovněž jsou v některých obdobích měřitelné velmi nízké aktivity ^{90}Sr a $^{239,240}\text{Pu}$ v ovzduší a ^{90}Sr v mléku a ve smíšené stravě, které pocházejí hlavně ze zkoušek jaderných zbraní (Státní úřad, 2002).

Jaderné elektrárny v porovnání s tepelnou elektrárnou vůbec neuvolňují žádný SO_2 . Sirných nečistot jsou velké množství v uhlí a topném oleji, které se produkují při provozu tepelné elektrárny. Oxid siřičitý SO_2 se vypouští průmyslově při spalování síry ($\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$), pak se směšuje v atmosféře s vodní párou a přemění se na H_2SO_4 (kyselinu sírovou). Kyselina sírová dále může ze vzduchu padat jako kyselé deště, oslabující rostliny a stromy (Tab.1).

V přírodě v malém množství existují oxidy dusíku (NO_x), které jsou toxické plyny. Zařízení, které spalují fosilní paliva, vylučují oxidy dusíku do atmosféry (Tab. 1). Součástí smogu je oxid dusíku, který taky hlavní příčinou znečištění ovzduší měst, a takže poškození životního prostředí i také zdraví živých organismů, například u člověka obvykle vyvolají dýchací potíže (Jenkins T., 2001).

Tab. 1: Jednoroční provoz 1000 megawattové elektrárny s výrobou 6,6 miliard kWh lze ukázat těmito způsoby, Comby B.

	Tepelná elektrárna na uhlí	Tepelná elektrárna na naftu	Jaderná elektrárna
	spálí 2,3 miliony tun uhlí a vypustí do atmosféry	spálí 1,52 milionů tun nafty a vypustí do ovzduší	spotřebuje 27 tun tříprocentního obochaceného uránu
CO2	3 miliardy kubických metrů	2,4 miliardy kubických metrů	Žadný
SO2	3 miliardy tun	91 000 tun	Žadný
NOx	cca 12214 tun NO, 986 tun NO2	6400 tun	Žadný
Prach	1200 tun prachu	1650 tun	Žadný
Popel	377 000 tun poletavého popílku 250 000 tun pevného popela	Prakticky žádný popel	Žadný
vysoce radioaktivního použitého paliva	Žadný	Žadný	vyprodukuje jen 14 kubických metrů, z něhož 97 procent
středně a nízko-radioaktivních odpadů	Žadný	Žadný	Vyprodukuje asi 500 kubických metrů
Radioaktivita	Žadný	Žadný	emituje do ovzduší asi 300 curie ročně

V průběhu celého palivového cyklu obě jaderné elektrárny, během provozu za normálních podmínek, v České republice vyprodukují přibližně 3000 tun odpadu. Výpusti z elektráren představují během provozu pouhých 0,001 mSv a ozáření z přírodních zdrojů může být 3 – 3,5 mSv (Janouch F., 2011).

Na rozdíl od průmyslových odpadů z jiných elektráren jaderný odpad postupně během času ztrácí nebezpečnost. Z použitého jaderného paliva radioaktivní látky se přeměňují na neaktivní prvky (Skupina ČEZ, 2009).

Pro dlouhodobou izolaci radiačních odpadů není všechny zemi mají vhodné geologické podloží. Vzhledem k tomu pro garantovanou dlouhodobou nízkou propustnost, nejlepší iontoměniče, redoxní systémy pro snímání, uchovávání nejnebezpečnějších nuklidů je důležité vědět jaké horniny jsou nejlepší (McCracken G., 2006).

Podle informace a údajů z uvedených čísel lze tvrdit, že jaderná energetika nepředstavuje významné nebezpečí pro obyvatelstvo a území, kontaminované radioaktivním materiálem. Jaderná energetika při výrobě obrovského množství energie neprodukuje hodně odpadu. Vždycky se musí dodržovat podle legislativy přísná opatření a bezpečnostní pravidla při nakládání s radioaktivními odpady. Z vyprodukovaného jadernou elektrárnou odpadu byla část přepracována a ostatní malé množství bylo izolováno od okolního prostředí (Skupina ČEZ, 2002).

Pro budoucnost lidstva je důležitá ekologická prevence tj. odpovědnost za výsledek, proto je podstatná možnost simulace teoretických situací lidských činností. V dalších kapitolách budeme probírat matematické modely a modelovat simulace teoretického transportu znečišťujících látek z jednoho reaktoru JE Dukovany pro čtyř světové strany.

3.3. Matematické modely kvality ovzduší

Matematická simulace šíření znečišťujících látek v ovzduší - modelování znečištění ovzduší. Matematické modely, které se používají, řeší v závislosti na typu modelu, fyzikální rovnice šíření znečišťujících látek v atmosféře (Laudner, B. E., Spalding, D. B., 1974).

Šíření znečištění v atmosféře je popsáno evoluční rovnicí difuze nebo transportní rovnicí (1).

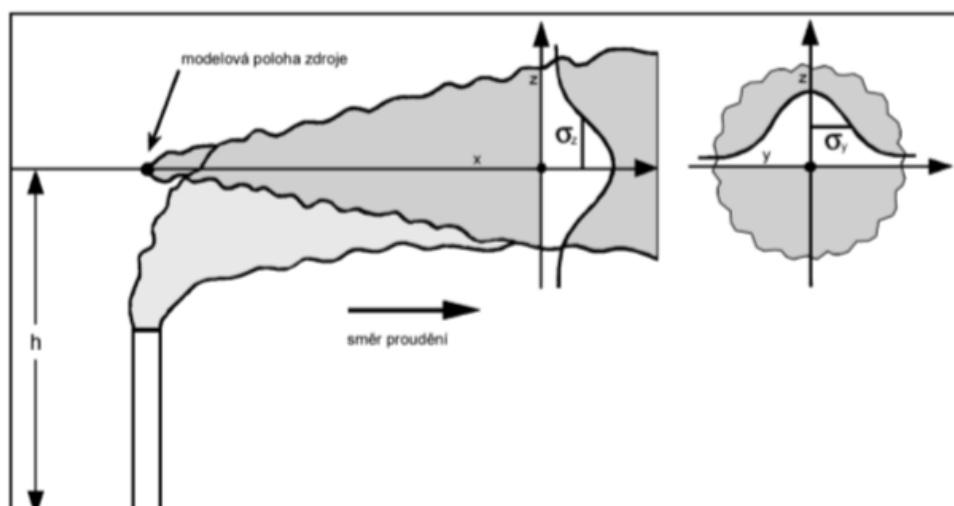
$$\frac{\partial c(t, x_i)}{\partial t} + u_i(t, x_i) \frac{\partial c(t, x_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial c(t, x_i)}{\partial x_i} + \alpha c(t, x_i) + S, \quad (1)$$

3.3.1. Gaussovské modely rozptylu kouřové vlečky

Gaussovské modely jsou stacionárním řešením rovnice turbulentní difuze. Počítají rozptyl znečištění pro každý zdroj a příspěvky sčítají. Rozptylové parametry jsou funkcí vzdálenosti a stability.

Modelovému řešení difúzní rovnice (2) obdrženému v předchozí kapitole odpovídá Suttonův, resp. gaussovský model, který je pro výpočet rozptylu znečišťujících příměsí prakticky hojně využíván (Bubník, J., 1998).

$$\bar{c}^*(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2)$$



Obr. 5: Gaussovské modely, Rejchl J., Všetička M.

3.3.2 Lagrangeovy modely

Popisují šíření polutantů v MVA tak, že sledují individuální vzduchové částice nebo oblaky, které jsou transportovány v poli proudění s přenosem dochází k rozptylu. Lagrangeový přístup (3) je v sledování trajektorií a velkého počtu částic znečištění v poli proudění (Reichl J., Všeticka M., 2006).

$$v_i = \frac{dx_i}{dt} = \frac{df_i(x_k^0, t)}{dt} = v_i(x_k^0, t). \quad (3)$$

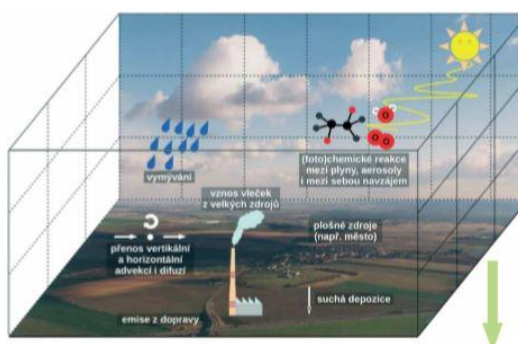
3.3.3 Eulerovský modely

Eulerovské modely jsou založené na numerickém řešení soustav diferenciálních rovnic. Nesledují individuální vzduchové částice při transportu, ale vyšetřují změny koncentrace v uzlových bodech souřadnicové sítě (Obr.6).

Při popisu Eulerovského modelu rychlost není spjatá s určitou částicí, ale je dána jako vektorové pole(4,5) v prostoru (Panofsky, P. A., Tennekes, H., Lenschow, D. H., Wyngaard, J. C.,1977).

$$v_i = v_i(x_k^0(x_j, t), t) = v_i(x_j, t). \quad (4)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \frac{d\mathbf{r}}{d\lambda}. \quad (5)$$



Obr. 6: Eulerovský model, www.chmi.cz.

3.4. Referenční modely

V České republice se pro výpočet znečištění používají referenční modely. Zde budou popsány tři modelové systémy : SYMOS'97, ATEM a AEOLIUS (Obr.7). Do skupiny Gaussovských disperzních modelů patří SYMOS'97, ATEM, které používané pro rozptylové studie v lokálním až regionálním měřítku při stanovení dlouhodobých charakteristik stavu znečištění. Bohužel se nepoužívá pro stanovení hodnoty přízemních koncentrací uvnitř městské zástavby nebo při složitých terénních podmínkách. AEOLIUS naopak vhodný pro určování stavu znečištění v uličních podmínkách (kaňon). Metodiky dánského modelu OSPM vychází z box model o kterém se jedná. Komplexnější modely na bázi CFD v České republice používají jak výše zmíněné typy, tak STAR CD, FLUENT apod., (Braníš M., Hůnova I., 2009).

Oblast využití	Znečišťující látky	Model dostupný v ČR
městské území (regionální měřítko)	málo reaktivní– reaktivnější látky, prašný aerosol	ATEM
venkovská území	málo reaktivní – reaktivnější látky, prašný aerosol	SYMOS'97
uliční kaňony	málo reaktivní – reaktivnější látky	AEOLIUS

Obr.7: Referenční modely, používané v České republice, 2009

3.5. Numerické modelování

Numerické modelování zažívá v současné době veliký rozmach, jelikož výpočetní hardware se každým rokem stává výkonnějším. Dá se předpokládat, že tento vývoj bude pokračovat i do budoucna. Po celém světě rostou nová superpočítačová centra umožňující mj. velice složité numerické simulace, které nebyly dříve uskutečnitelné (pro mnohé pravděpodobně ani představitelné). Jednodušší numerické výpočty lze provádět i na běžných stolních PC případně na laptotech. Můžeme zkonstruovat vícerozměrné transportní modely proudění při rozlišení a takové úrovni detailu, které se např. před 10 lety zdály nedosažitelné.

Existuje také řada vědeckých problémů, jejichž přesná analytická řešení neumíme zatím získat. Numerické modelování nabízí mnohdy dostatečně uspokojivé numerické řešení, díky kterému si lze o daném problému udělat poměrně přesný obrázek.

Tato kapitola se blíže zaměřena výpočetní dynamiku tekutin a Navier-Stokesovy rovnice, které jsou základem pro téměř všechny CFD - Computational Fluid Dynamics problémy. Dalším tématem je pak numerické modelování pomocí souboru nástrojů ANSYS FLUENT (Bednář J., Zikmunda O., 1985).

4. Charakteristika studovaného území

Pro stavbu jaderné elektrárny musí být správně vybráno místo. Vhodné místo musí odpovídat mezinárodním normám a požadavkům pro jaderný průmysl. Mělo by to být geologicky vhodné stabilní podloží s velkým čistým zdrojem vody. Před zahájením výstavby se provádí biologické hodnocení území, které pak musí být zrekultivováno do původního stavu (Margulova T. CH., 1984).

V okolí jaderné elektrárny Dukovany je dostatečné pro provoz elektrárny množství vody z Vodní nádrže Dalešice (Obr.8). Existuje ale pro Českou republiku obtížnější požadavek, při kterém trvalé bydlet v blízkosti 1,5 kilometru od jaderného reaktoru nikdo nesmí (Státní úřad, 2002).



Obr. 8 : JE Dukovany, [www. oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz)

Jaderná elektrárna Dukovany se nachází vedle vesnice Dukovany v České Republice, přibližně 30 km směrem na jihovýchod od města Třebíč. Elektrárna se nachází v trojúhelníku, vymezeném obcemi Slavětice, Dukovany a Rouchovany.

Produkce elektřiny z čtyř reaktorových bloků jaderné elektrárny Dukovany pokrývá 20% roční spotřeby energie v České republice.

Areál elektrárny obsahuje další stejně důležitá jaderná zařízení – úložiště středně a nízko radioaktivních odpadů (je ve státním vlastnictví) a sklad pro použité jaderné palivo, kde se to palivo bezpečně skladuje v kontejnerech (Skupina ČEZ, 2004).

5. Metodika práce

Při zpracování diplomové práce byly stanovené dílčí cíle v rámci procesu, při kterém dochází k naplnění hlavního cíle práce. Cílem práce je numerické modelování v aplikaci CFD softwaru ANSYS FLUENT, popis a analýza výsledků simulace výbuchu nebo jiné havarijní situace v jaderné elektrárně Dukovany. Práce byla rozdělena na literární rešerši, metodiku práce, praktickou část, výsledky práce a závěr.

K provedení vlastního hodnocení bylo třeba získat analýzou sekundárních zdrojů informace z odborné literatury potřebné pro teoretický základ. K tvorbě literární rešerše byla použita metoda deskripce s využitím odborných publikací, internetových zdrojů a platné legislativy. Sekundární zdroje obsahují většinou obecnou informaci o jaderné energetice. Jiné zdroje, které byly využity ke zpracování této práce se většinou zabývají průzkumem a poskytují podkladová data pro simulaci.

Získané informace byly následně aplikovány v praktické části práce. Při modelování pole proudění a rozptylu znečišťujících částic byly využity zvolené matematické modely a vhodná numerická řešení.

Pole proudění se modeluje Reynoldsovým zprůměrováním turbulentních pohybů a rovnicí kontinuity, nastavením standardní metody kontrolních objemů, výpočtem okrajových podmínek a vstupního profilu pro $k - \varepsilon$ modelováním turbulence. Po zkonvergování iterací se reprezentují nejpravděpodobnější simulovaná pole proudění.

Rozptyl znečišťujících látek provádí simulaci na základě již existujícího pole proudění, a to při použití Lagrangeovského modelování. Při simulaci rozptylu bylo použito Lagrangeovské modelování transportu individuálních prachových částic, vektory kterého vychází z řešení rovnic a nastavení neutrálních rozptylových podmínek.

Tato metodika modelování byla nastavena v CFD softwaru ANSYS FLUENT pro výpočet grafických mapových výsledku. Metodika je zaměřena na výpočetní dynamiku proudění a Navier-Stokesovy rovnice, které jsou základem pro téměř všechny CFD - Computational Fluid Dynamics problémy.

V této práci byly modelovány pole proudění pro čtyři směry větru. Pro každé pole proudění byly modelovány nejen pole koncentrací v přízemní atmosféře, ale i

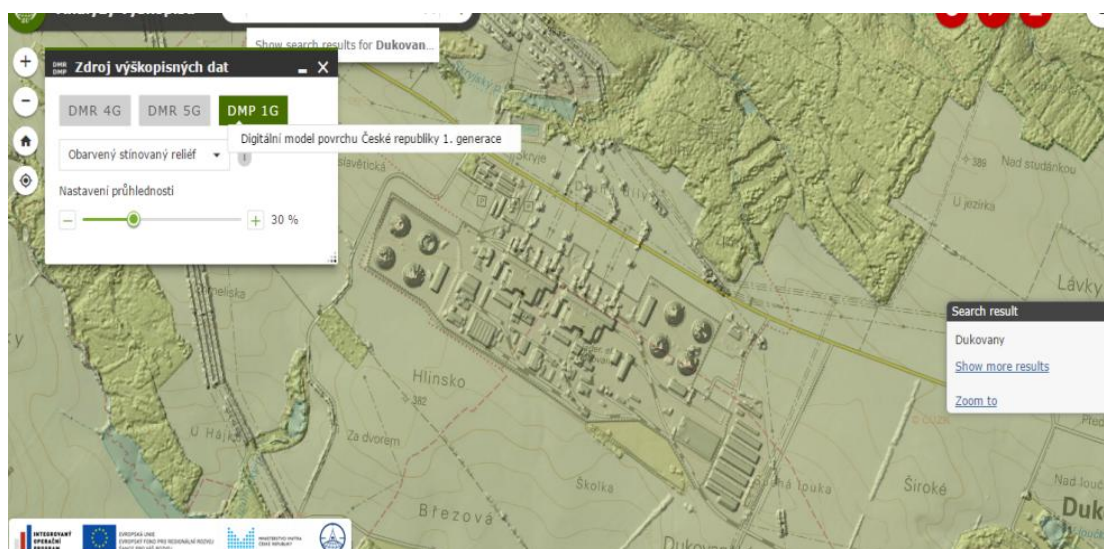
prostorová distribuce deponovaných prachových částic. Podrobnější informace modelování jsou v praktické části.

6. Praktická část

6.1. Vytvoření podkladu

V této kapitole je popsán preprocessing - přípravná fáze numerické simulace. Pro vytvoření podkladu (sítě) se musely získat data. Odpovídající data pro diplomovou práci byly nalezené na webové stránce Geoportál ČÚZK (<https://geoportal.cuzk.cz>). Z tohoto zdroje na vyžádání byl získán vhodný digitální model povrchu České republiky 1. generace, který představuje zobrazení území včetně staveb a rostlinného pokryvu ve formě sítě výškových bodů (Obr.9).

Stažená data se musely převést do vhodného tvaru, byly uskutečněné úpravy a zjednodušování. Dalším krokem byla příprava výpočetní sítě před modelováním v softwaru ANSYS FLUENT.



Obr. 9 : JE Dukovany, www.geoportal.cuzk.cz

6.2. Modelování v softwaru

V daném modelu území byl realizován výpočet 3-D pole proudění v CFD softwaru FLUENT pomocí numerického řešení systému pohybových rovnic s Reynoldsovým zprůměrováním turbulentních pohybů a rovnice kontinuity.

Výpočet Reynoldsových tenzorů se opíral o Boussinesquovy hypotézy, což znamenalo možnost využití modelu turbulence I. řádu. Izotropní koeficient turbulentní viskozity μ_t byl získán z kinetické turbulentní energie k a její disipace ε použitím standardního $k - \varepsilon$ modelu turbulentního uzávěru (Jonesem W., Lauderem., B., 1972).

Numerické řešení systému rovnic bylo provedeno standardní metodou kontrolních objemů v 3-D neortogonální síti vymezené spodní hranicí za použití nestřídavého uspořádání výpočtu tlakové korekce v šestibokých objemových elementech (Vach M., Duong V., 2011).

Podrobným modelem povrchu odvozeným z výškopisné mapy daného území, který byl připraven pro simulaci v CFD softwaru ANSYS FLUENT, byla vytvořená spodní hranice výpočetní oblasti. Pro horizontální krok sítě (pro danou oblast - 4960 m (x) 4960 m (y) 800 m (z)) byla stanovena hodnota 20m, s ohledem na výpočetní možnosti. Vertikální krok se zvyšuje ve směru od spodní hranice pro narůstající vzdálenost. První uzel ve vertikálním směru byl nastaven ve vzdálenosti 1m od zemského povrchu.

Pomocí okrajových podmínek byl proveden výpočet pole proudění. Pole proudění bylo spočítáno pro základní čtyři směry větru. Okrajové podmínky byly zadány v laterálních hranicích výpočetní oblasti. Výškový profil rychlosti (6) byl vypočten jako logaritmický:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z + z_0}{z_0} \quad (6)$$

kde $u(z)$ představuje rychlost větru ve výšce z , u^* je třetí rychlost, κ - Karmánova konstanta a z_0 je parametr drsnosti povrchu.

V laterálních hranicích jako rychlost větru byla zadána hodnota 2.5 ms^{-1} ve výšce 10 m nad povrchem (korespondující $u^* = 0.172 \text{ ms}^{-1}$) a jako z_0 byla použita hodnota 0.1. Vstupní profil pro $k - \varepsilon$ modelování turbulence (7,8) byl nastaven odhad (Richardsem R., Hoxey R., 1993).

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa z} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (8)$$

kde C_μ - koeficient definující vírovou viskozitu, která má zadanou hodnotu 0.09 a δ - tloušťka mezní vrstvy atmosféry.

Na spodní hranici výpočetní oblasti vymezené zemským povrchem byly obě složky turbulentní energie standardně determinovány pomocí stěnových funkcí.

Byl použit *upwind* druhého řádu jako prostorové diskretizační schéma. Časová diskretizace byla realizována prostřednictvím implicitního schématu. Kontinuita byla řešena tlakovou korekcí typu SIMPLEC (Van Doormalem J., Raithy G., 1984), jako modifikace SIMPLE algoritmu (Patankara S., 1980). Pro dosažení zkonvergovaného *steady state* řešení bylo nutné provést přibližně 300 iterací iteračního procesu.

Pole proudění, která byly namodelovány pomocí CFD, determinují transport prachových částic z reaktoru jaderné elektrárny Dukovany. Simulovaná pole proudění ukazují modelově nejpravděpodobnější stav vymezený okrajovými podmínkami. Daný výsledek byl získán způsobem iteračního řešení diskretizovaných RANS, při kterém v síti počítané parametry konvergují k nejpravděpodobnějšímu *steady state*. Simulovaná pole proudění neodpovídají variabilitě reálného proudění ukázanou nepřetržitými fluktuacemi.

Pokud zadávané okrajové podmínky se shodují s reálnou meteorologickou situací v modelovaném území, výsledky simulovaných výpočtů by měly být v souladu s odrazem reálného pole proudění zprůměrovaného v delším časovém úseku.

Lagrangeovské modelování transportu individuálních prachových částic byly použité pro simulaci teoreticky možných důsledků úniku radioaktivních částic v místě jednoho z reaktorů jaderné elektrárny Dukovany. Touto metodou byly namodelovány pole koncentrací v přízemní atmosféře a taky i prostorová distribuce deponovaných prachových částic.

Modelované 3-D vektorové pole proudění generovalo vstupní data pro navazující Lagrangeovskou simulaci transportu a difúzního rozptylu pasivních modelových částic teoretické emitovaných ze zdroje. Lokální transportní posun každé částice je determinován vektorem rychlosti proudění. Tento vektor působí v dráze tohoto posunu. Vektor rychlosti proudění \bar{u} je získán lineární interpolací vstupního pole proudění. Z řešení Langevinovy rovnice vychází posun částic simulující rozptyl turbulentní difúze. Složky fluktuačního vektoru (9) jsou dány rovnicí:

$$u_i(t + \Delta t) = au_i(t) + b\sigma_{u_i}\xi + \delta_{i3}(1+a)\Gamma_{Lx_i} \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{u_i}^2) \quad (9)$$

Nová poloha pasivní gravitačně neklesající částice je dána spolupůsobením obou vektorů (10):

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + (\bar{u}_i + u_i)\Delta t \quad (10)$$

Amplituda modelovaných turbulentních fluktuací zahrnující náhodný parametr ξ se pohybuje v rozsahu vymezeném koeficienty $b = (1 - a^2)^{1/2}$; $a = \exp(-\Delta t/T_L)$; T_L představuje Lagrangeův čas, který byl na základě přístupu Zannettiho nastaven na 200 s v rovině horizontální a na 20 s ve vertikální (Zannetti P., 1990).

Z modelované turbulentní kinetické energie byly odhadnuty rozptylové parametry: $\sigma_u = 0.91k^{1/2}$, $\sigma_w = 0.52k^{1/2}$. Příslušné konstanty korespondují s neutrálními rozptylovými podmínkami. Časový krok posunu pasivní částice Δt byl zvolen 5 s v kontextu rychlosti modelovaného proudění (2 - 4 m.s⁻¹) a horizontálního kroku sítě (20 m). Emisní tok fiktivního zdroje byl stanoven na úrovni 3000 částic za časový krok Δt . S ohledem na simulaci prašnosti bylo počítáno s gravitačním poklesem odpovídajícím částicím o uvažovaném modelovém průměru 10 μ m. Nebyl zahrnut odraz částic od zemského povrchu.

7. Výsledky a diskuse

Jaderná energetika je velmi zajímavým tématem pro diskusi. Hodně lidí si to představují jako průmysl produkující významné množství radioaktivního odpadu. Ve skutečnosti to tak není, a ve zprávě o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou bylo zveřejněno aktuální množství emise z jaderných elektráren, které nepřesahuje stanovené legislativou emisní limity. A při normálním provozu elektrárny se tyto limity nikdy nepřesahují.

V různých zemích se limity efektivního dávkového ekvivalentu trochu liší, avšak skutečná emise jaderných elektráren odpovídá mezinárodní bezpečnostní normě IAEA. Na území České republiky pro jaderné elektrárny limity na výpustě jsou stanovené na úrovni 40 mikroSievert na výpustě plynné a 3 mikroSievert do vodotečí. Ze zprávy o výsledcích činnosti SÚJB o monitorování radiační situace v rámci monitorování radiační situace na celém území ČR a monitorování jaderných zařízení včetně jejich okolí lze konstatovat, že v roce 2017 nedošlo na území České republiky k žádnému významnému úniku radionuklidů do prostředí. Výpusti do ovzduší ani do vodotečí z JE Dukovany v roce 2017 nepřekročily stanovené autorizované limity.

Jaderná elektrárna při normálním provozu produkuje 14 kubických metrů vysoce radioaktivního použitého paliva, 500 kubických metrů středněradioaktivních a také 500 kubických metrů nízkoradioaktivních odpadů. Radioaktivita se ročně emituje do ovzduší v hodnotách 300 curie. Daný objem výpusti z jaderných elektráren není významným a nemá velký vliv na životní prostředí.

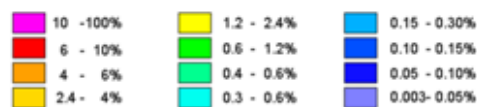
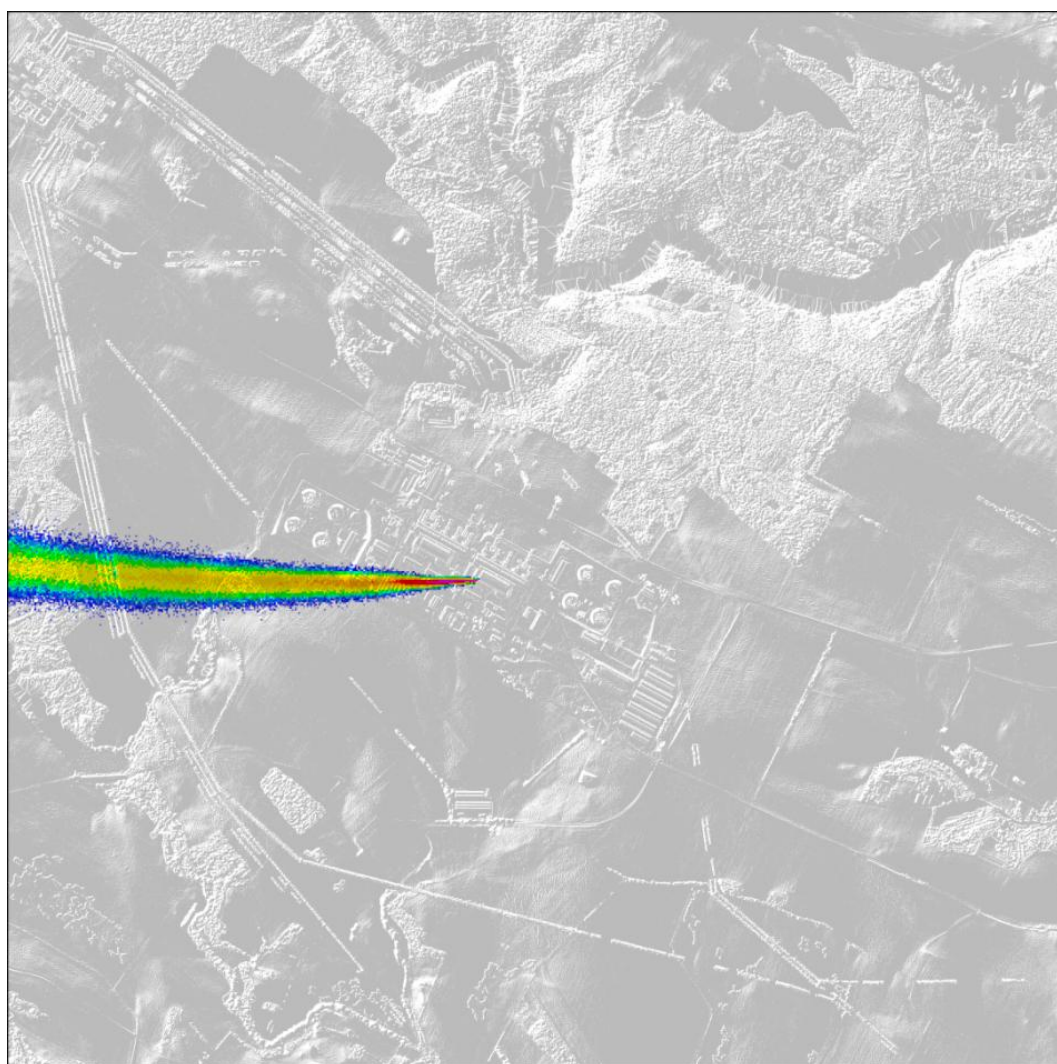
V této práci byla simulována situace výbuchu z reaktoru JE Dukovany pro předvídání transportu radioaktivních částic a prevence možných následků havárie. Preventivní opatření pomáhají se vyhnout velkému množství problémů, například znečištění okolního prostředí a poškození lidského zdraví.

Pomocí softwaru ANSYS FLUENT byly zjištěny výsledky ukazující možné varianty proudění při stejné meteorologické situaci.

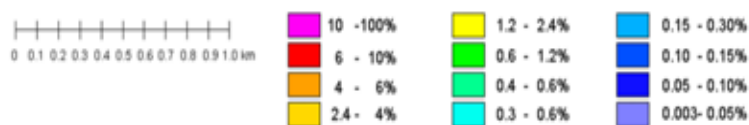
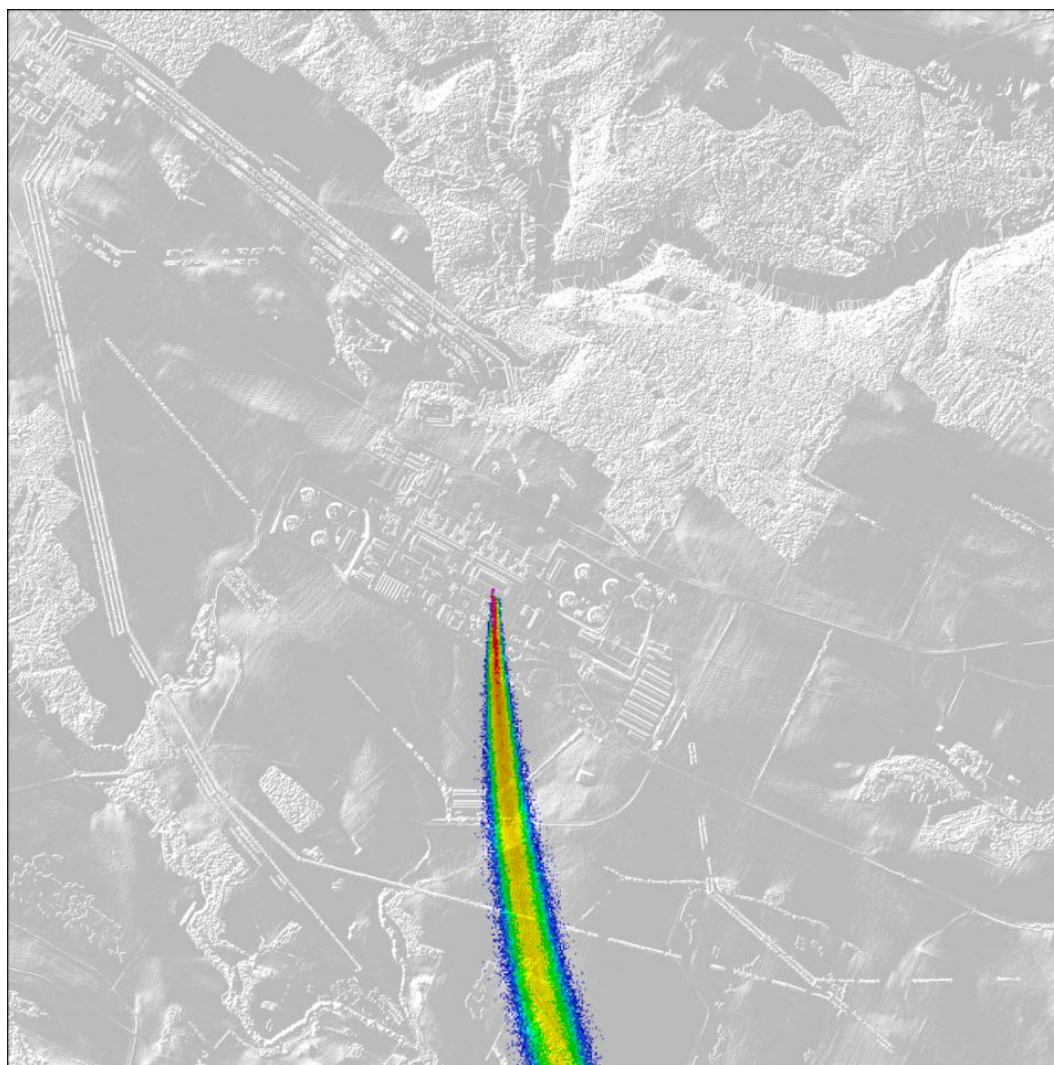
V této kapitole mám výsledky 3-D modelování ze softwaru ANSYS FLUENT koncentrace pole kouřové vlečky a koncentrace modelovaného spadu (koncentrace

na povrchu země a těsně nad ním) pro čtyři základní směry. Depozice je imise zachycená na zemském povrchu. Pro vyhodnocení těchto situací, kdy byl simulován transport prašné příměsi emitované z místa jednoho z reaktorů jaderné elektrárny Dukovany, byly použity odpovídající modelové přístupy reflektující vliv tvaru povrchu na pole proudění a transport znečišťující příměsi.

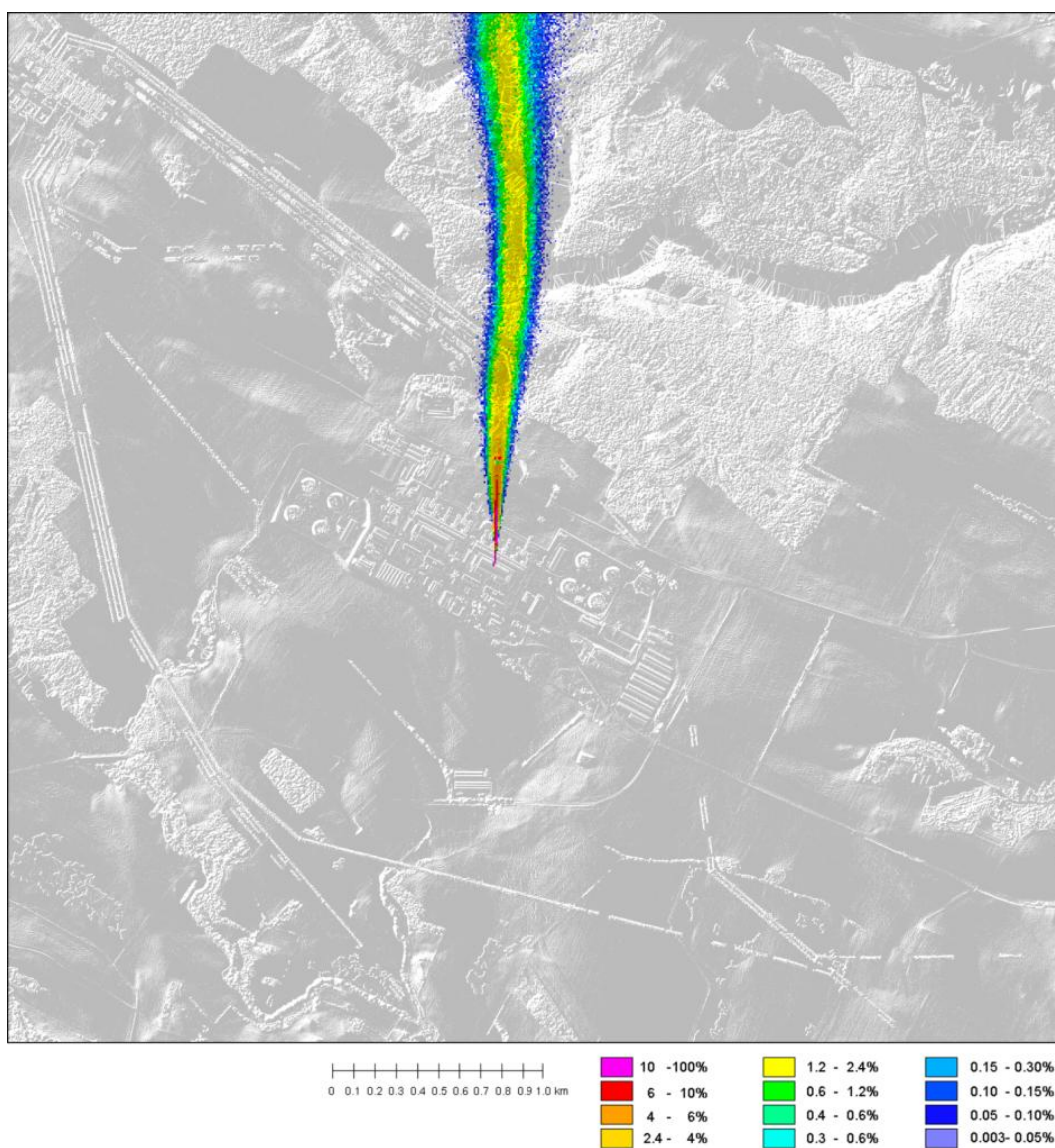
Grafické zpracované do mapových obrázků výsledky reprezentují pole polétavého prachu emitovaného z reaktoru pro zadané směry větru.



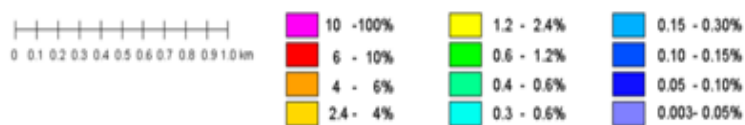
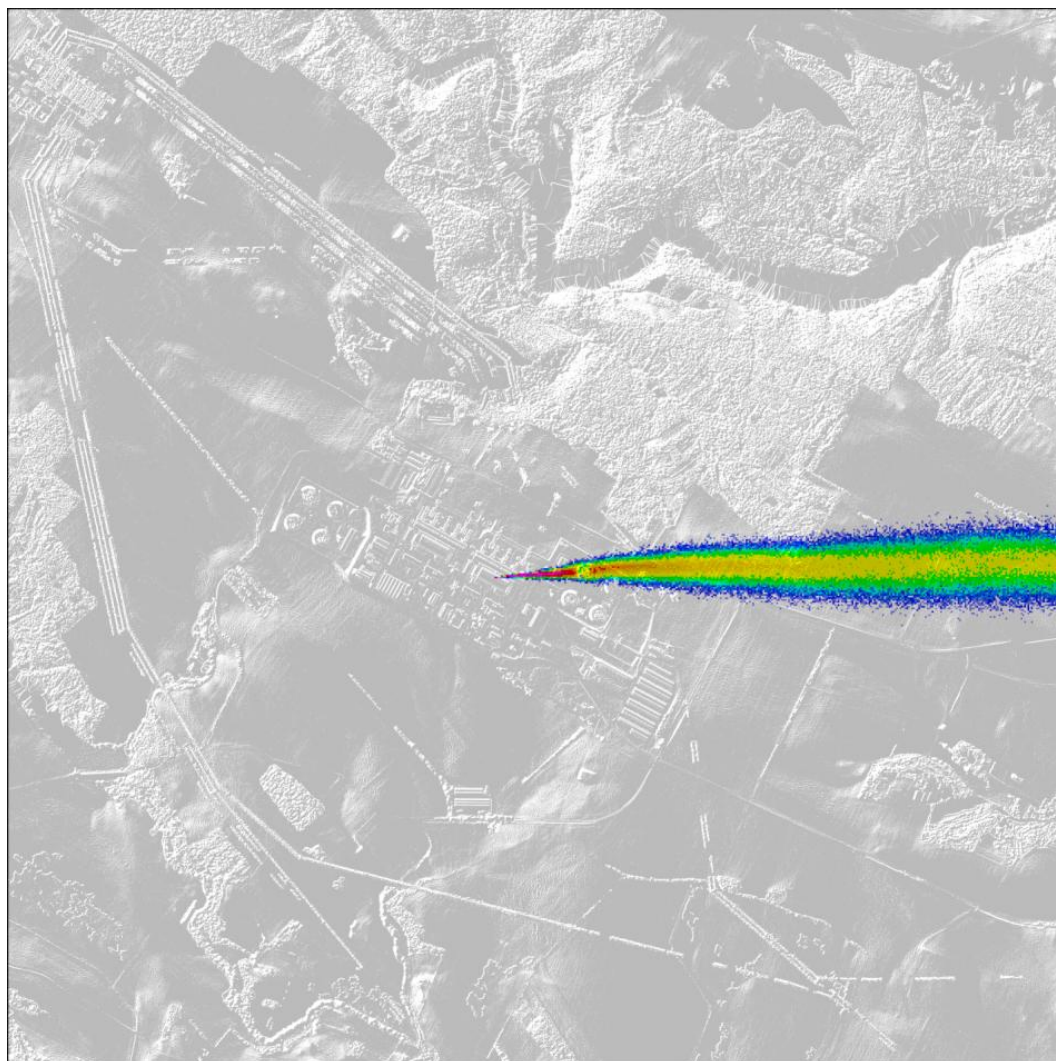
Obr. 10a : Modelované v softwaru pole relativní koncentrace polétavého prachu teoretické emitovaného v místě jednoho z reaktorů JE Dukovany pro západní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Imisní koncentrace je vyjádřena v procentech maximální hodnoty dosahované v těsné blízkosti zdroje.



Obr. 10b : Modelované v softwaru pole relativní koncentrace polétavého prachu teoretické emitovaného v místě jednoho z reaktorů JE Dukovany pro severní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Imisní koncentrace je vyjádřena v procentech maximální hodnoty dosahované v těsné blízkosti zdroje.

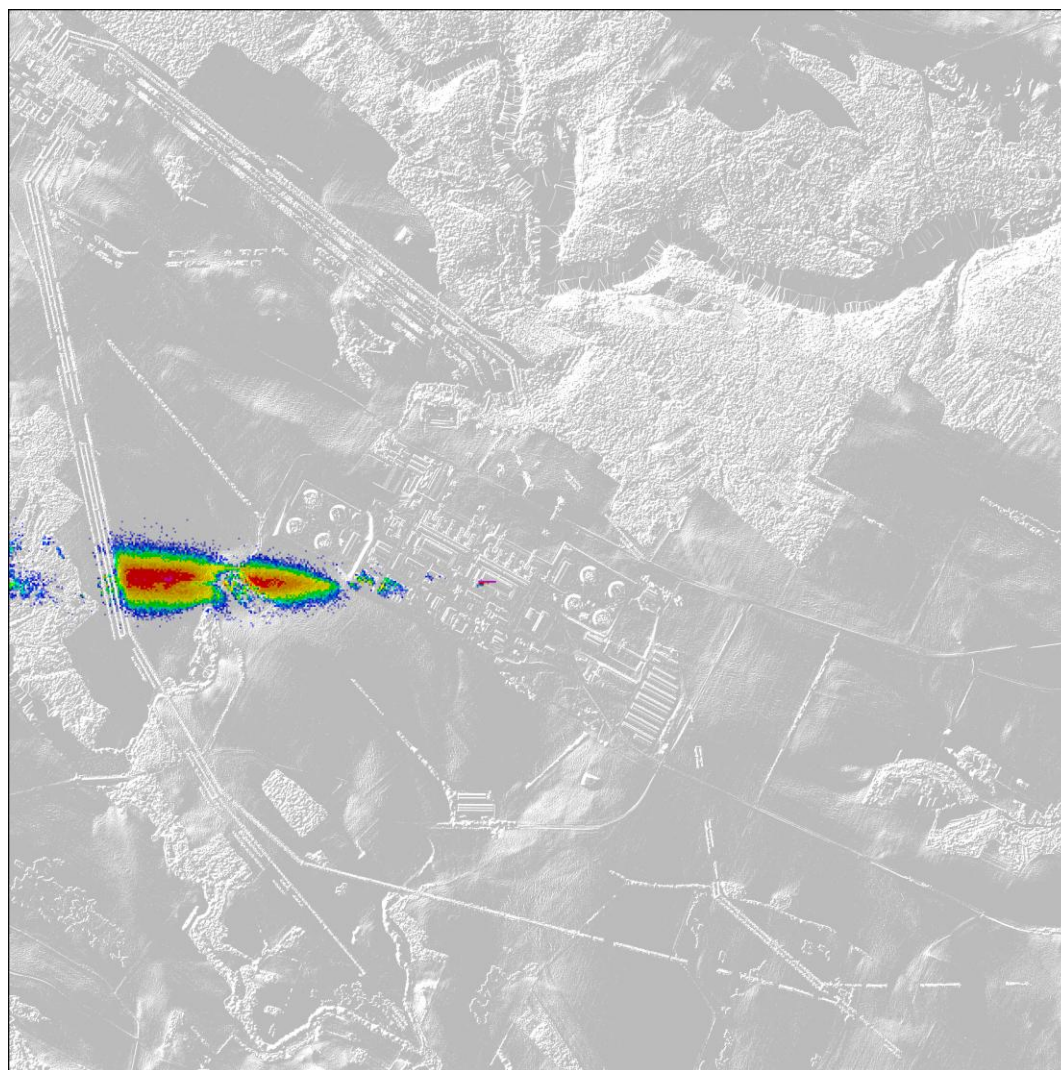


Obr. 10c : Modelované v softwaru pole relativní koncentrace polétavého prachu teoretické emitovaného v místě jednoho z reaktorů JE Dukovany pro jižní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Imisní koncentrace je vyjádřena v procentech maximální hodnoty dosahované v těsné blízkosti zdroje.

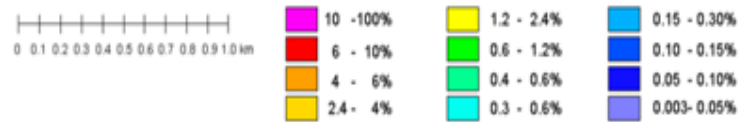
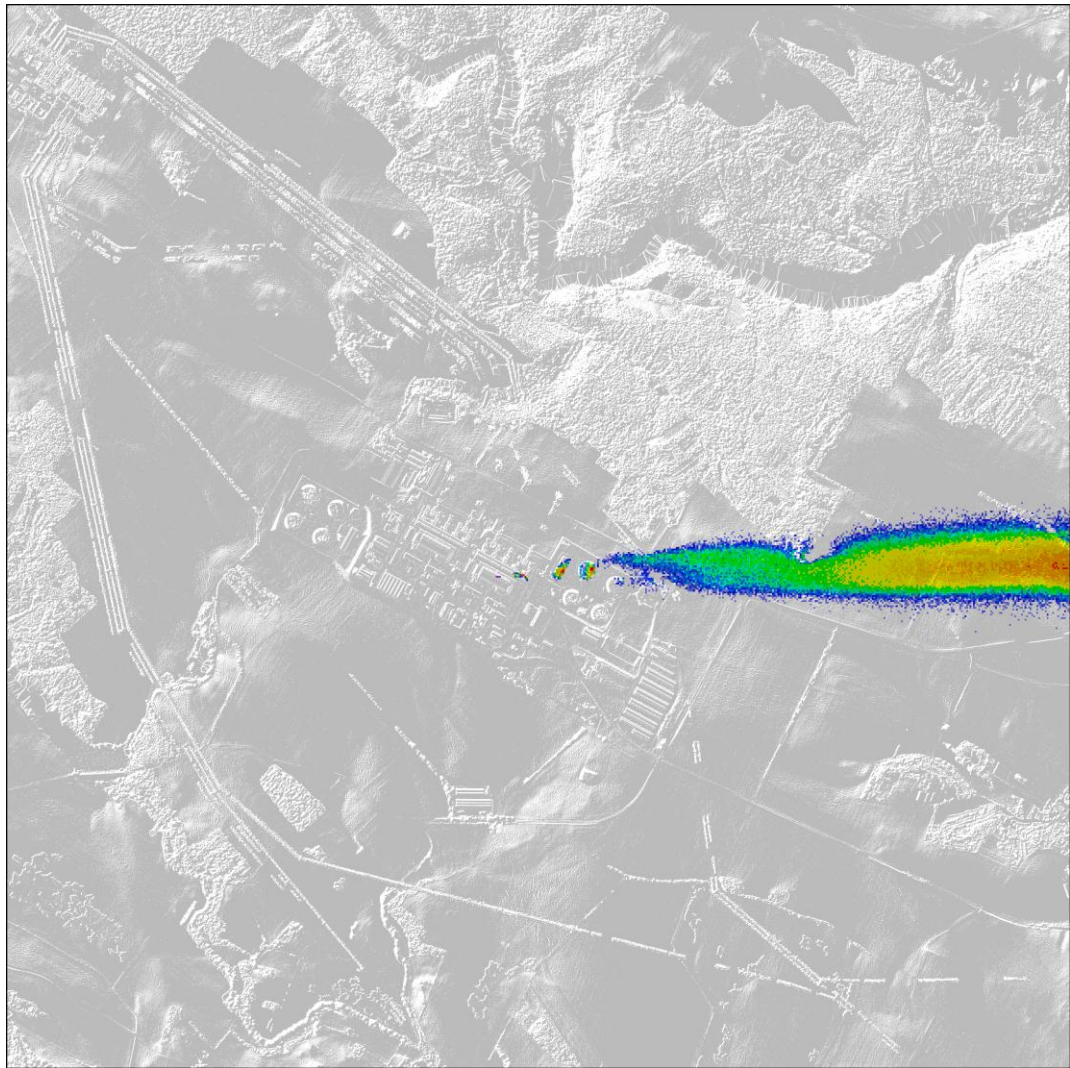


Obr. 10d : Modelované v softwaru pole relativní koncentrace polétavého prachu teoretické emitovaného v místě jednoho z reaktorů JE Dukovany pro východní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Imisní koncentrace je vyjádřena v procentech maximální hodnoty dosahované v těsné blízkosti zdroje.

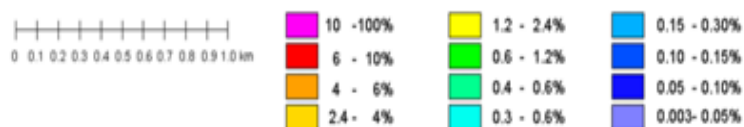
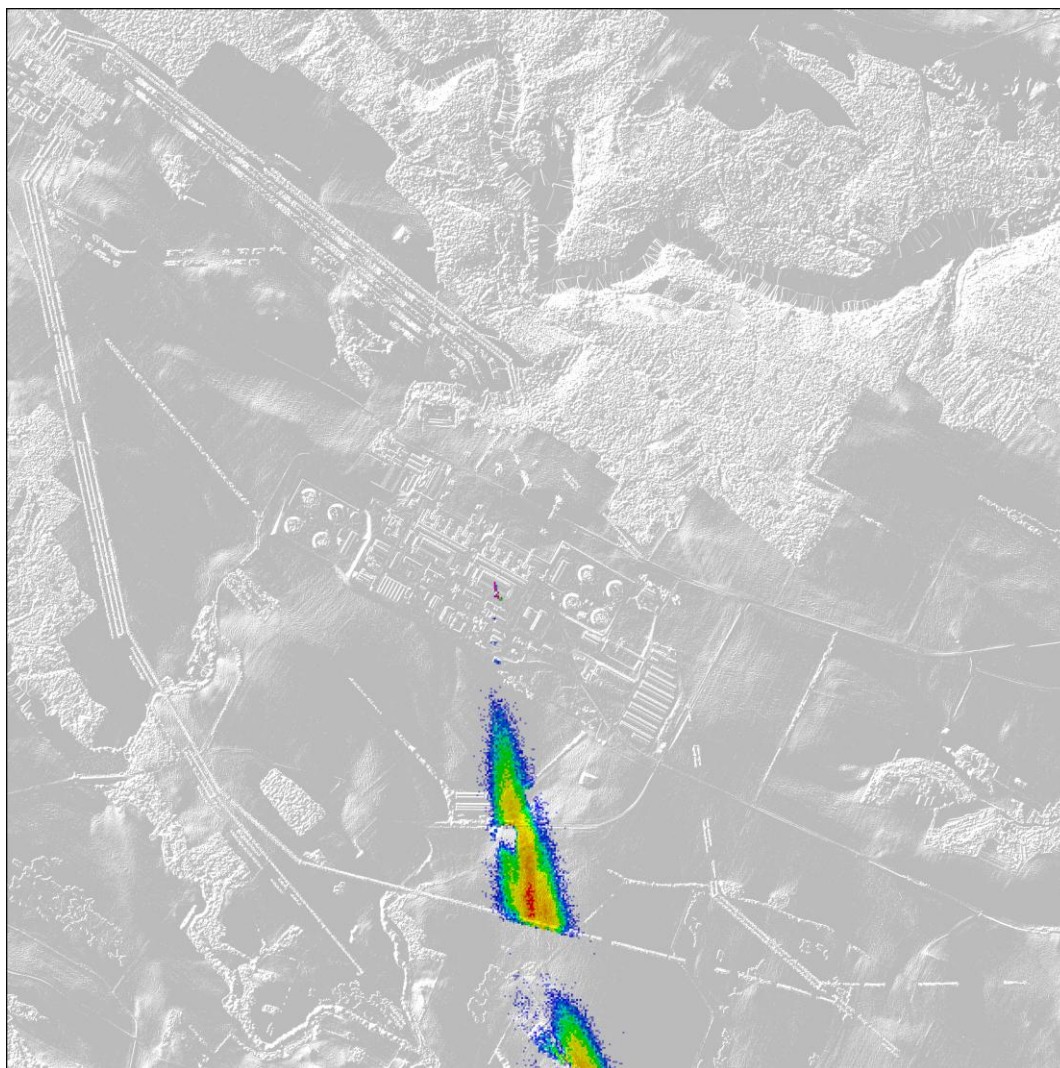
Ve výsledcích simulovaných v CDF softwaru (Obr. 11a,b,c,d), pozoruje se roztržení toku transportu emisních potoků z místa jednoho reaktoru JE Dukovany. V místech roztržení jsou dráty, které jsou příčinou dané situace. Z důvodu omezených možností softwaru FLUENT neexistoval jiný způsob modelování dané situace. Ve skutečnosti by k takovému roztržení nedocházelo.



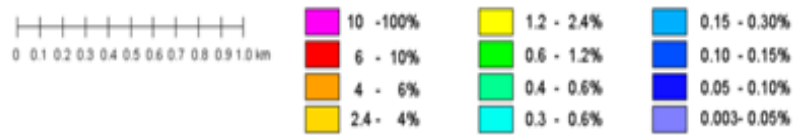
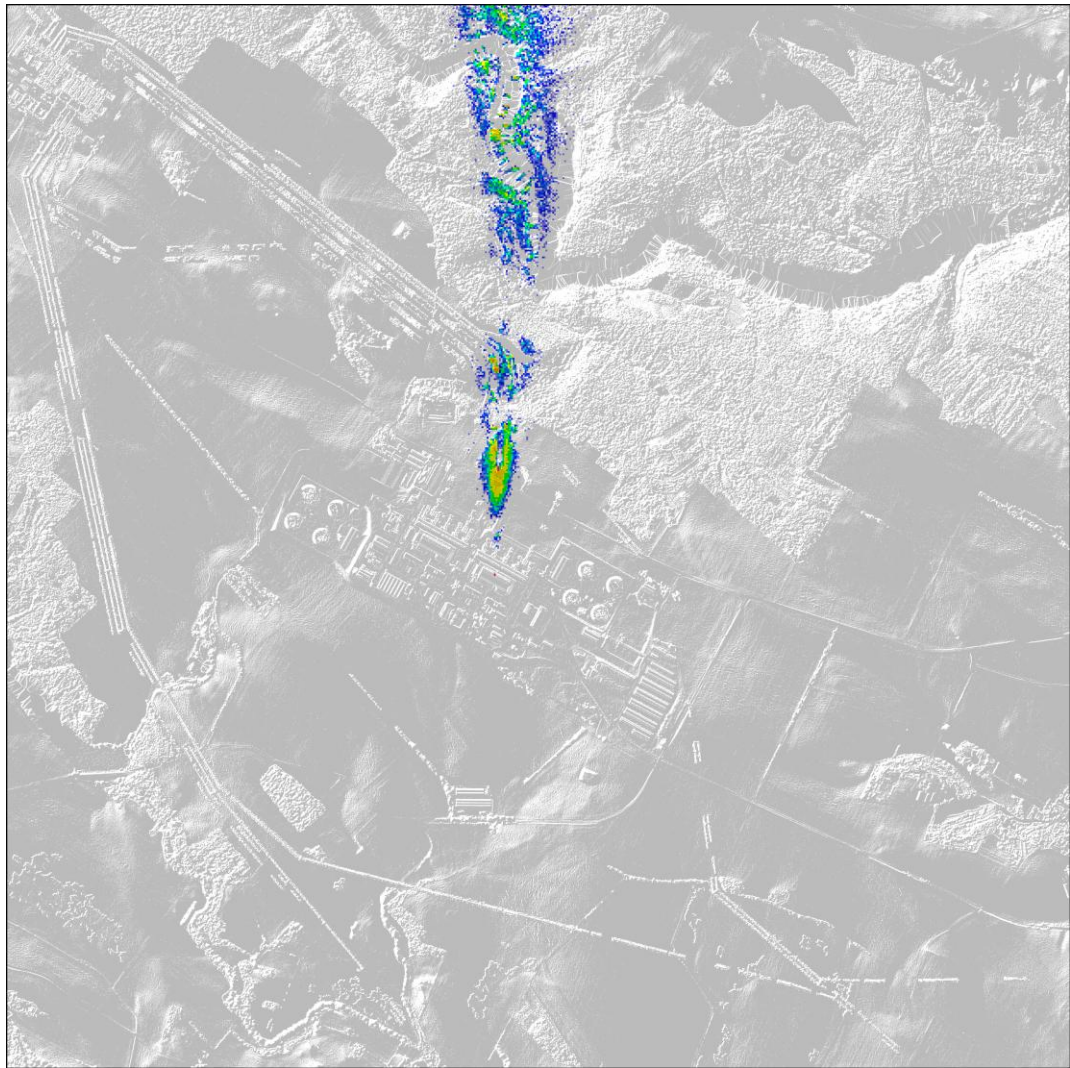
Obr. 11a : Modelované pomocí softwaru ANSYS FLUENT pole relativní depozice polétavého prachu teoretické emitovaného v okolí JE Dukovany pro východní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Depozice je vyjádřená v procentech maximální hodnoty.



Obr. 11b : Modelované pomocí softwaru ANSYS FLUENT pole relativní depozice polétavého prachu teoretické emitovaného v okolí JE Dukovany pro západní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Depozice je vyjádřená v procentech maximální hodnoty.



Obr. 11c : Modelované pomocí softwaru ANSYS FLUENT pole relativní depozice polétavého prachu teoretické emitovaného v okolí JE Dukovany pro severní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Depozice je vyjádřená v procentech maximální hodnoty.



Obr. 11d : Modelované pomocí softwaru ANSYS FLUENT pole relativní depozice polétavého prachu teoretické emitovaného v okolí JE Dukovany pro jižní směr větru zadávaný na hranici oblasti. Depozice je vyjádřená v procentech maximální hodnoty.

8. Závěr

Jaderná energetika je jedním z nejvýhodnějších způsobů zajištění elektrické energie, doba fosilních paliv se pomalu blíží ke konci. Daná diplomová práce přispívá k závěru, že jaderná energetika je čistým zdrojem energie, který nevede ke znečištění okolí. Nacházející se v České republice jaderná elektrárna Dukovany nepřesahuje povolený emisní limit stanovený na území ČR a limit mezinárodní organizace IAEA. Během procesu výroby elektřiny daným způsobem se nespotřebovává kyslík a neprodukuje se velký objem chemických látek, na rozdíl od způsobů využívajících fosilní paliva a přispívajících vzniku skleníkových plynů a následnému globálnímu oteplování. Provoz jaderných elektráren je spojen s velmi malou emisí radioaktivních látek, která nemá významný vliv na okolí. Dávka ozáření obyvatelstva v okolí jaderných elektráren, i v nejnepříznivějším případě z publikovaných, nepřekračuje 1% přirozené dávky. Jaderná energie, na rozdíl od jiných zdrojů, nevyžaduje velkou plochu pro stavbu a zvláštní okolní podmínky. Jaderná energie je bezpečnou, praktickou a šetrnou k životnímu prostředí variantou zdroje energie, což potvrzuje porovnání objemu emisí tepelných a jaderných elektráren uvedené v této diplomové práci.

Táto diplomová práce se věnuje jaderné energii. V práci se probírá jaderná energetika od provozu elektrárny do ukládání odpadů, problematika znečišťujících látek emitovaných jadernými elektrárnami a jejich vliv na životní prostředí. Byly představeny matematické a referenční modely, numerické modelování a charakteristika vybraného území. Dále byla popsána metodika práce se zvolenými modely a praktická část, která obsahuje vytvoření podkladů a modelování simulačních pole proudění.

Hlavní pozornost při psaní této diplomové práce byla věnována práci v softwaru, který je určen pro modelování transportu v ovzduší teoretické vypuštěných znečišťujících látek z JE Dukovany.

Při psaní dané diplomové práce se autorka seznámila s problematikou modelování znečištění ovzduší, získala hodně zkušeností s matematickým modelováním a výpočetní dynamikou prachových částic (CFD). Dále autorka získala návyky využití CFD nástroje ANSYS FLUENT a několika vizualizačních nástrojů. Hlavní cíl práce,

provedení numerického modelování rozptylu znečišťujících látek emitovaných z JE Dukovany v případě výbuchu nebo jiné havarijní, situace byl splněn.

Pro budoucnost je důležitá prevence, a také nápravy ekologické újmy, které vychází z principu objektivní odpovědnosti. Dané téma diplomové práce je aktuální, zvláště v případě nutnosti provedení simulace emise znečišťujících látek. Pomocí provedení simulace na základě okolních podmínek lze předvídat transport a koncentraci znečišťujících látek v případě výbuchu nebo jiné havarijní situace.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

1. Bubník, J., 1998: Symos '97: systém modelování stacionárních zdrojů : metodická příručka pro výpočet znečištění ovzduší z bodových, plošných a liniových zdrojů(online)[cit. 2019.04.10], dostupné z <https://www.idea-envi.cz/download/symos97v2006/Symos97-master.pdf>
2. Vach M.,2010: Ochrana ovzduší. Česká zemědělská univerzita, Praha.
3. Vach M., Duohg M., 2011 : Numerical Modeling of Flow Fields and Dispersion of Passive Pollutants in the Vicinity of the Temelín Nuclear Power Plant. Environmental Modeling & Assessment. Česká zemědělská univerzita, Praha.
4. Braniš, Martin, Hůnova Iva, 2009: Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší. Univerzita Karlova, Praha, 360 s.
5. Comby B., 2007: Environmentalisté pro jadernou energii. PRAGMA, Praha, 324 s.
6. Jones, W. P., Launder, B. E.,1972: The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 301-314.
7. Janouch F., 2011: Myslím zeleně, proto volím jádro (úvahy o energii a budoucnosti lidstva). Akropolis, Praha, 364 s
8. Laudner, B. E., Spalding, D. B., 1974: Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, New York.
9. Vorobiev V.V., 2009: Úvod do radioekologie. Logos, Moskva, 357 s.
10. Panofsky, P. A., Tennekes, H., Lenschow, D. H., Wyngaard, J. C.,1977: The characteristic of turbulent velocity components in the surface layer under convective condition. *Boundary Layer Meteorology*, 11, 355-361.
11. Vaněk V., 2008: Bez jádra to nepůjde. Pragma, Praha, 20 s.
12. Patankar, S. V.,1980: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Book Co.,USA.
13. Zprava o výsledcích činnosti SUJB, 2017: Při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2017, Praha, 15 s.
14. Richards R..J., Hoxey R.P.,1993: Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46/47, 145–153.
15. Státní úřad, 2002: Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost 307/2002. Praha, 86 s.

16. Mezinárodní agentura pro atomovou energii. 1997: Mezinárodní základní normy bezpečnosti pro ochranu před ionizujícím zářením a bezpečnostní hování s zdroji radiace. Věna, 403 s.
17. Van Doormal, J. P., Raithy, G. D., 1984: Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows. *Numer. Heat Transfer*, 7, 147-163.
18. Kluchnikov A.A., Pazychin E. M., Shigera U.M., Shigera V.U., 1984: Radioaktivní vypustí z AES a metody jích uložení. Státní zpráva, Moskva, 30 s.
19. Reichl J., Všetička M., 2006: Encyklopedie fyziky. Copyright, Praha. (online)[cit. 2019.04.5], dostupné z
< <http://fyzika.jreichl.com/> >
20. Antonov V.F., Chernysh A.M., Pasechnik V.I., Voznesenckii S.A., Kozlova E.K., 2000: Biofyzika. Vlados. Moskva, 236 s.
21. McCracken G., 2006: Fúze: Energie vesmíru. Kolumbus, Praha, 183s.
22. Pamela J., 2006: Čistá energie pro budoucnost: Vývoj fúzní energie. EFDA, Mnichov.
23. Zannetti, P., 1990: *Air Pollution Modeling – Theories, Computational Methods and Available Software*. Springer, New York, 444 s.
24. Evropská komise, 2009: Ředitelství Euratom. Jaderná fúze a průmysl společně pro budoucnost. Úřad pro úřední tisky Evropských společenství, Lucemburk.
25. Evropská komise, 2006: Ředitelství Euratom. Výzkum fúze: volba energie pro budoucnost Evropy. Úřad pro úřední tisky Evropských společenství, Lucemburk.
26. Bednář J., Zikmunda O., 1985: Fyzika mezní vrstvy atmosféry. Academia Praha, Praha, 265s.
27. Kessler G., 1986: Jaderná energetika. Energoatomizdat, Raduga, Moskva, 248 s.
28. Koler D., Chjuitt D., 1989: Uvod do jaderné energetice. Energoatomizdat, Raduga, Moskva, 300 s.
29. Margulova T. H., 1989: Atomová energie dnes a zítra. Věda, Moskva, 75 s
30. Margulova T. H., 1984: Jaderné elektrárny. Věda, Moskva, 100 s.
31. Jenkins T., 2001: Porovnání emisí CO₂ mezi evropskými státy využívajícími jadernou energetiku a jejich bezjadernými protějšky. Hnutí DUNA, 15 s.
32. Petr I., 1979: Radioaktivita v životním prostředí minulosti, současnosti a budoucnosti. Atom, Praha, 465 s.
33. Hill J., 1978: Nuclear power in the publik eye. Atom. 257s.

34. Singer J., 1997: Vliv jaderných elektráren na životní prostředí. České noviny 23: 55-68.
35. Bromová E., Vargončík D., Sovadina M., 2013: Jaderná energie a energetika. Simopt. Praha, online: <http://www.simopt.cz/cz/uvodni-stranka>. cit. 6.3.2016.
36. Skupina ČEZ, 2009. Základní informace. Praha, online: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika.html>. cit. 8.3.2016.
37. Skupina ČEZ, 2012. Historie a současnost Elektrárny Dukovány. Praha, online : <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderna-elektranycez/ete/historie-asoucasnost.html>. cit. 16.3.2016.
38. Vach M., 2010: Modelový výpočet prostorové distribuce polétavého prachu v okolí deponie vybraného zdravotnického zařízení. Česká zemědělská univerzita, Praha.
39. Kusala J., 2003: Minienciklopedia Jaderné energetiky.
40. DeSantis F., Allegrini I., 1996: Urban Air Pollution. Springer- Verlag, Berlin, 478 s.

10. Přílohy

Plynné vypustí			
Reaktor: DUKOVANY/WWER-V213		Monitorované období: 2017	
Objem vzduchu uvolněný za uvedené období (m ³): 9,110 x 10 ⁹			
Kategorie a radionuklid	Maximální hodnota MDA pro příslušný klíčový nuklid (Bq/m ³)	Celková vypuštěná aktivita (Bq) (*)	Komentář (*)
Vzácné plyny			
⁴¹ Ar	19	2,487 x 10 ¹²	
⁸⁵ Kr		<DL	*
^{87m} Kr		<DL	*
⁸⁷ Kr		<DL	*
⁸⁸ Kr		<DL	*
⁸⁹ Kr			
^{131m} Xe			
¹³³ Xe	20	5,256 x 10 ¹⁰	
^{133m} Xe			
¹³⁵ Xe	7	3,912 x 10 ¹⁰	
^{135m} Xe			
¹³⁷ Xe			
¹³⁸ Xe		<DL	*
Aerosoly			
⁵¹ Cr	1,0 x 10 ⁻⁴	2,690 x 10 ⁴	
⁵⁴ Mn	1,2 x 10 ⁻⁵	1,448 x 10 ⁵	
⁵⁸ Co	1,2 x 10 ⁻⁵	1,981 x 10 ⁵	
⁵⁹ Fe	2,2 x 10 ⁻⁵	2,514 x 10 ⁵	
⁶⁰ Co	1,4 x 10 ⁻⁵	4,162 x 10 ⁵	
⁶⁵ Zn	2,7 x 10 ⁻⁵	8,819 x 10 ⁴	
⁸⁹ Sr	4,8 x 10 ⁻⁵	<DL	*
⁹⁰ Sr	5,6 x 10 ⁻⁶	<DL	*
⁹⁵ Zr	2,0 x 10 ⁻⁵	9,570 x 10 ⁵	
⁹⁵ Nb	1,0 x 10 ⁻⁵	1,961 x 10 ⁵	
^{110m} Ag	1,7 x 10 ⁻⁵	1,981 x 10 ⁷	
¹²² Sb			
¹²⁴ Sb	1,6 x 10 ⁻⁵	8,398 x 10 ⁵	
¹²⁵ Sb	3,6 x 10 ⁻⁵	<DL	*
¹³⁴ Cs	1,2 x 10 ⁻⁵	<DL	*
¹³⁷ Cs	1,3 x 10 ⁻⁵	5,627 x 10 ⁴	
¹⁴⁰ Ba	5,5 x 10 ⁻⁵	<DL	*
¹⁴⁰ La	2,0 x 10 ⁻⁵	<DL	*
¹⁴¹ Ce	1,7 x 10 ⁻⁵	<DL	*

¹⁴⁴ Ce	7,0 x10 ⁻⁵	<DL	*
²³⁸ Pu	2,0 x10 ⁻⁷	<DL	*
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	2,0 x10 ⁻⁷	<DL	*
²⁴¹ Am	2,0 x10 ⁻⁷	<DL	*
²⁴² Cm			
²⁴³ Cm			
²⁴⁴ Cm			
Celková aktivita alfa (2)			
Jódy			
¹³¹ I	1,0 x10 ⁻³	<DL	*
¹³² I			
¹³³ I			
¹³⁵ I			
Tritium			
³ H	5,0 x10 ⁻¹	8,053 x10 ¹¹	
Uhlík			
¹⁴ C	5,0 x10 ⁻¹	6,332 x10 ¹¹	anorganická+organická forma

Poznámky (společně pro plynné a kapalně vypusti pro obě JE – tabulky 14 až 17):

(*) V případě, že alespoň jedno měření aktivity konkrétního radionuklidu bylo v průběhu roku větší než MVA, pak byla všechna ostatní měření aktivity s výsledkem menším než MVA konzervativně odhadnuta jednou polovinou hodnoty MVA a v tomto přehledu o výpustech byla vykázána aktivita tohoto radionuklidu jako součet všech hodnot větších než MVA a hodnot rovných jedné polovině MVA pro všechna měření aktivity s výsledkem menším než MVA. Pokud všechny hodnoty konkrétního radionuklidu byly za celý rok menší než MVA, pak výsledná aktivita tohoto radionuklidu byla vykázána jako nulová (v tabulce označeno symbolem „<DL“).

(1) pro případy, kdy se bilance stanovují předběžně výpočtem, pro případy, kdy se při bilancování používají smluvené náhradní hodnoty namísto hodnot nižších než MDA, informace o fyzikálně-chemické formě ³H a ¹⁴C a jódů (organická x anorganická), upřesnění monitorovacího období a monitorovacích metod

(2) pouze pokud se neměří jednotlivé alfa-nuklidy

Příloha 1. Přehled aktivit jednotlivých radionuklidů vypouštěných z JE Dukovany v roce 2017(Zprava o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Odběrové místo JE Dukovany	Datum odběru	Objemová aktivita [Bq/m ³]		
		³ H	¹³¹ I	¹⁴ C
VK-I	23. – 29.1.2017	44,9; 44,1	< 2 x10 ⁻¹	62,7 * ¹
VK-I	15. – 21.5.2017	98,5; 92	< 2 x10 ⁻¹	65 * ²
VK-I	17. – 23.7.2017	93,4	< 2 x10 ⁻¹	79 * ³
VK-II	23. – 29.1.2017	45,6; 46	< 2 x10 ⁻¹	126 * ¹
VK-II	15. – 21.5.2017	119; 127	2,4 x10 ⁻¹	24 * ²
VK-II	17. – 23.7.2017	110	< 3 x10 ⁻¹	46 * ³

Poznámka: vzorkování LRKO JE Dukovany, měření SÚRO Praha
doba odběru pro měření ¹⁴C byla měsíc (viz níže)

*¹ 26. – 29.1.2017

*² 1. – 28.5.2017

*³ 26.6. – 30.7.2017

Znak "<" má význam minimální významné aktivity pro hladinu spolehlivosti 95%.

Příloha 2. Objemové aktivity radionuklidů ve vzorcích vzdušiny odebíraných z ventilačních komínů JE Dukovany v roce 2017(Zpráva o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Monitorovaná položka	Jednotka	Nejvyšší hodnota aktivity	Počet měření	
			Celkem	> MVA
¹³⁷Cs				
aerosoly* ¹	Bq/m ³	< 2,1 x10 ⁻⁶	52	0
spady	Bq/m ²	< 4,4 x10 ⁻³	12	0
půda	Bq/kg	10,6	5	5
půda – in situ	Bq/m ²	329,2	8	6
sedimenty	Bq/kg	20,9	3	2
voda pitná	Bq/l	< 9,6 x10 ⁻³	7	0
voda povrchová	Bq/l	< 6,4 x10 ⁻³	16	0
voda podzemní – vrty	Bq/l	< 1,4 x10 ⁻²	39	0
krmiva/tráva	Bq/kg	< 1,7 x10 ⁻²	4	0
mléko kravské – surové	Bq/l	< 3,2 x10 ⁻²	26	0
ovoce	Bq/kg	< 8,4 x10 ⁻³	1	0
ryby	Bq/kg	< 3,3 x10 ⁻²	1	0
zemědělské plodiny	Bq/kg	< 4,6 x10 ⁻²	4	0
¹³¹I				
plynné jódý	Bq/m ³	< 1,2 x10 ⁻¹	52	0
⁹⁰Sr				
mléko kravské – surové* ²	Bq/l	4,5 x10 ⁻²	1	1
voda povrchová	Bq/l	5,9 x10 ⁻³	4	3

zemědělské plodiny	Bq/kg	1,3 x10 ⁻¹	4	4
voda pitná	Bq/l	5,7 x10 ⁻³	4	2
³H				
dešťová voda	Bq/l	3,71	72	18
voda povrchová (neovlivněná*)	Bq/l	4,98	20	4
voda povrchová (ovlivněná*)	Bq/l	213	36	36
voda pitná – studny	Bq/l	39,5	5	1
voda pitná – veřejné vodovody	Bq/l	49,6	24	24
voda podzemní – vrty	Bq/l	157	216	92

Poznámka:

objemová, plošná a hmotnostní aktivita radionuklidů ve složkách životního prostředí a potravních řetězců (včetně měření in situ) - vzorkování a měření LRKO (výsledky převzaty ze zprávy JE Dukovany)

* vodní toky ovlivněné nebo neovlivněné výpustmi z JE Dukovany

*¹ sloučené měření vzorků z 8 odběrových míst

*² slévavý roční vzorek

MVA značí minimální významnou aktivitu.

Příloha 3. Přehled monitorovaných položek životního prostředí a potravního řetězce okolí JE Dukovany v roce 2017(Zpráva o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Ventilační komín		VK-I				VK-II			
Datum odběru		23.1.2017		24.7.2017		23.1.2017		24.7.2017	
Čas odběru od		9:13	9:25	10:10	10:22	10:07	10:19	9:24	9:33
Čas odběru do		9:18	9:31	10:16	10:27	10:16	10:28	9:31	9:40
Nuklid	Poločas přeměny	[Bq/m ³]							
⁴¹ Ar	1,82 h	< 10	< 12	440	370	440	370	< 17	< 16
⁸⁵ Kr	10,7 r	< 47	< 44	< 39	< 45	< 65	< 81	< 71	< 66
^{85m} Kr	4,48 h	< 8	< 6	< 3	< 8	< 7	< 3	< 8	< 4
⁸⁷ Kr	1,27 h	N	N	N	N	N	N	N	N
⁸⁸ Kr	2,86 h	< 15	< 15	< 8	< 18	< 13	< 7	< 6	< 10
^{131m} Xe	11,9 d	< 11	< 9	< 7	< 10	< 14	< 17	< 15	< 14
¹³³ Xe	5,25 d	5,4	7,8	3,2	< 3	10,3	5,0	< 4	< 3
^{133m} Xe	2,19 d	< 4	< 3	< 2	< 3	< 4	< 4	< 4	< 3
¹³⁵ Xe	9,10 h	< 4	< 2	7,2	6,9	7,7	8,8	< 3	< 1

Poznámky:

Znak "<" má význam minimální významné aktivity pro hladinu spolehlivosti 95%.

N – nehodnocen (měření bylo provedeno v laboratoři SÚRO Praha několik hodin po odběru, takže nebylo možno stanovit radionuklidy s krátkými poločasy přeměny).

⁸⁶Kr – zde stanoven pouze pomocí spektrometrie gama.

Příloha 4. Objemové aktivity vzácných plynů ve ventilačních komínech JE Dukovany v roce 2017 (Zpráva o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Odběrové místo JE Dukovany	Datum odběru	Objemová aktivita [Bq/m ³]		
		³ H	¹³¹ I	¹⁴ C
VK-I	23. – 29.1.2017	44,9; 44,1	< 2 x10 ⁻⁴	62,7 * ¹
VK-I	15. – 21.5.2017	98,5; 92	< 2 x10 ⁻⁴	65 * ²
VK-I	17. – 23.7.2017	93,4	< 2 x10 ⁻⁴	79 * ³
VK-II	23. – 29.1.2017	45,6; 46	< 2 x10 ⁻⁴	126 * ¹
VK-II	15. – 21.5.2017	119; 127	2,4 x10 ⁻⁴	24 * ²
VK-II	17. – 23.7.2017	110	< 3 x10 ⁻⁴	46 * ³

Poznámka: vzorkování LRKO JE Dukovany, měření SÚRO Praha
doba odběru pro měření ¹⁴C byla měsíc (viz níže)

*¹ 26. – 29.1.2017

*² 1. – 28.5.2017

*³ 26.6. – 30.7.2017

Znak "<" má význam minimální významné aktivity pro hladinu spolehlivosti 95%.

Příloha 5. Aktivity Sr a transuranů vypouštěných do ovzduší z JE Dukovany v roce 2017 (Zpráva o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Odběrové místo EDU VK-I			
Datum odběru	23.-29.01.2017	15.-21.05.2017	17.-23.07.2017
Nuklid	Aktivita [Bq/m3]		
^{110m} Ag	1,9 x10 ⁻⁴	4,3 x10 ⁻⁵	1,6 x10 ⁻⁵
²⁴¹ Am	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 7,0 x10 ⁻⁶
¹⁴⁰ Ba	< 3,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 3,0 x10 ⁻⁵
¹⁴¹ Ce	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶	< 5,0 x10 ⁻⁶
¹⁴⁴ Ce	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵
⁵⁷ Co	< 2,0 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶	< 2,0 x10 ⁻⁶
⁵⁸ Co	1,5 x10 ⁻⁴	2,6 x10 ⁻⁵	2,8 x10 ⁻⁵
⁶⁰ Co	4,7 x10 ⁻⁴	2,0 x10 ⁻⁴	1,1 x10 ⁻⁴
⁵¹ Cr	1,2 x10 ⁻⁴	< 4,0 x10 ⁻⁵	< 3,0 x10 ⁻⁵
¹³⁴ Cs	< 3,0 x10 ⁻⁶	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶
¹³⁷ Cs	8,7 x10 ⁻⁶	5,1 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶
⁵⁹ Fe	1,8 x10 ⁻⁵	< 8,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶
¹⁵³ Gd	< 6,0 x10 ⁻⁶	< 8,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶
¹⁸¹ Hf	2,0 x10 ⁻⁵	< 6,0 x10 ⁻⁶	< 5,0 x10 ⁻⁶
¹³¹ I	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 2,0 x10 ⁻⁵

¹⁴⁰ La	< 9,0 x10 ⁻⁴	< 6,0 x10 ⁻⁴	< 2,0 x10 ⁻²
⁵⁴ Mn	1,8 x10 ⁻⁴	1,0 x10 ⁻⁴	3,8 x10 ⁻⁵
⁹⁹ Mo	< 6,0 x10 ⁻⁵	< 6,0 x10 ⁻⁵	< 4,0 x10 ⁻⁴
⁹⁹ Nb	4,5 x10 ⁻⁴	5,1 x10 ⁻⁵	2,2 x10 ⁻⁵
¹⁰³ Ru	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶
¹²⁴ Sb	7,2 x10 ⁻⁵	1,2 x10 ⁻⁵	3,5 x10 ⁻⁵
¹²⁵ Sb	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶
⁷⁶ Se	< 3,0 x10 ⁻⁶	< 5,0 x10 ⁻⁶	< 4,0 x10 ⁻⁶
¹¹³ Sn	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶
¹³² Te	< 5,0 x10 ⁻⁵	< 4,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁴
⁶⁶ Zn	1,1 x10 ⁻⁵	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶
⁹⁶ Zr	2,1 x10 ⁻⁴	1,8 x10 ⁻⁵	< 5,0 x10 ⁻⁶

Odběrové místo EDU VK-II			
Datum odběru	23.-29.01.2017	15.-21.05.2017	17.-23.07.2017
Nuklid	Aktivita [Bq/m3]		
^{110m} Ag	4,1 x10 ⁻⁵	9,8 x10 ⁻⁴	5,9 x10 ⁻⁴
²⁴¹ Am	< 1,0 x10 ⁻⁵	< 3,0 x10 ⁻⁵	< 8,0 x10 ⁻⁶
¹⁴⁰ Ba	< 3,0 x10 ⁻⁵	< 5,0 x10 ⁻⁵	< 6,0 x10 ⁻⁵
¹⁴¹ Ce	< 7,0 x10 ⁻⁶	< 7,0 x10 ⁻⁶	< 7,0 x10 ⁻⁶
¹⁴⁴ Ce	< 3,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵
⁵⁷ Co	< 3,0 x10 ⁻⁶	< 3,0 x10 ⁻⁶	3,4 x10 ⁻⁶
⁵⁸ Co	< 3,0 x10 ⁻⁶	1,2 x10 ⁻³	2,6 x10 ⁻⁴
⁶⁰ Co	4,2 x10 ⁻⁵	2,3 x10 ⁻³	5,6 x10 ⁻⁴
⁵¹ Cr	< 4,0 x10 ⁻⁵	2,6 x10 ⁻³	6,3 x10 ⁻⁴
¹³⁴ Cs	< 4,0 x10 ⁻⁶	< 7,0 x10 ⁻⁶	< 5,0 x10 ⁻⁶
¹³⁷ Cs	< 5,0 x10 ⁻⁶	6,3 x10 ⁻⁵	< 9,0 x10 ⁻⁶
⁵⁹ Fe	< 8,0 x10 ⁻⁶	2,4 x10 ⁻⁴	4,9 x10 ⁻⁵
¹⁵³ Gd	< 9,0 x10 ⁻⁶	< 1,0 x10 ⁻⁵	< 8,0 x10 ⁻⁶
¹⁸¹ Hf	< 7,0 x10 ⁻⁶	1,5 x10 ⁻³	1,1 x10 ⁻⁴
¹³¹ I	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 3,0 x10 ⁻⁵
¹⁴⁰ La	< 2,0 x10 ⁻³	< 9,0 x10 ⁻⁴	< 3,0 x10 ⁻²
⁵⁴ Mn	5,3 x10 ⁻⁶	7,5 x10 ⁻⁴	2,0 x10 ⁻⁴
⁹⁹ Mo	< 1,0 x10 ⁻⁴	< 7,0 x10 ⁻⁵	< 5,0 x10 ⁻⁴
⁹⁹ Nb	< 6,0 x10 ⁻⁶	3,0 x10 ⁻³	1,5 x10 ⁻³
¹⁰³ Ru	< 4,0 x10 ⁻⁶	4,4 x10 ⁻⁵	< 6,0 x10 ⁻⁶
¹²⁴ Sb	< 4,0 x10 ⁻⁶	5,6 x10 ⁻⁴	1,9 x10 ⁻⁴
¹²⁵ Sb	< 1,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵	< 2,0 x10 ⁻⁵
⁷⁶ Se	< 5,0 x10 ⁻⁶	6,3 x10 ⁻⁵	< 4,0 x10 ⁻⁶
¹¹³ Sn	< 5,0 x10 ⁻⁶	< 7,0 x10 ⁻⁶	< 6,0 x10 ⁻⁶
¹³² Te	< 7,0 x10 ⁻⁵	< 6,0 x10 ⁻⁵	< 3,0 x10 ⁻⁴
⁶⁶ Zn	< 2,0 x10 ⁻⁵	3,8 x10 ⁻⁵	1,4 x10 ⁻⁵
⁹⁶ Zr	< 7,0 x10 ⁻⁶	1,6 x10 ⁻³	6,2 x10 ⁻⁴

Poznámka: vzorkování LRKO JE Dukovany, měření SÚRO Praha
 Znak "<" má význam minimální významné aktivity pro hladinu spolehlivosti 95%.

Příloha 6. Objemové aktivity radionuklidů emitujících záření gama ve vzorcích aerosolových filtrů z ventilačních komínů JE Dukovany v roce 2017(Zprava o výsledcích činnosti SUJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).

Monitorovaná položka	Jednotka	Nejvyšší hodnota aktivity	Počet měření	Z toho >MVA
¹³⁷ Cs				
Spady	Bq/m ²	0,218	24	6
Mléko	Bq/l	< 0,071	4	0
Krmiva	Bq/kg	0,107	4	1
Obiloviny	Bq/kg	< 0,078	3	0
Ovoce	Bq/kg	< 0,061	1	0
Lesní plody	Bq/kg	0,156	2	1
Houby	Bq/kg	0,657	1	1
Med	Bq/kg	1,610	1	1
Voda povrchová ¹⁾ a ²⁾	Bq/l	0,011	26	4
Voda pitná	Bq/l	0,005	4	1
Půda	Bq/m ²	541	1	1
³ H				
Voda povrchová ¹⁾	Bq/l	347	82	82
Voda povrchová ²⁾	Bq/l	2,5	26	1
Voda pitná	Bq/l	18,3	4	4
Voda dešťová	Bq/l	5,7	16*	4

Poznámka:

Vzorkování a měření RC SÚJB Brno a České Budějovice

Hodnota pod MVA je před číslem vyznačena znakem „<“ pro hladinu spolehlivosti 95%

Objemová, plošná a hmotnostní aktivity radionuklidů v měsíčních spadech [Bq/m²] a ve složkách životního prostředí a potravních řetězců [Bq/kg nebo Bq/l]

¹⁾ Voda ovlivněná výpustmi z JE

²⁾ Voda neovlivněná výpustmi z JE

* vzorky nebyly odebrány pro nedostatek srážek v daném měsíci

Příloha 7. Přehled monitorovaných položek životního prostředí a potravního řetězce okolí JE Dukovany v roce 2017(Zprava o výsledcích činnosti SUJB a SÚRO při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou).