



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských
studentů na ČVUT

**Model šíření radionuklidů při havarijních
podmínkách jaderného reaktoru s ohledem na
velikost aktivní zóny**

Tat Ha Noi Nguyen

Gymnázium Václava Hlavatého
Poděbradova 661, Louny

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

2. Fyzika

Model šíření radionuklidů při havarijních
podmínkách jaderného reaktoru
s ohledem na velikost aktivní zóny

Radionuclide Dispersion Model for
a Nuclear Reactor Under Accident
Conditions with Respect to Reactor Core
Size

Jméno: Nguyen Tat Ha Noi

Škola: Gymnázium Václava Hlavatého

Kraj: Ústecký kraj

Konzultant: Ing. Ondřej Lachout

Louny, 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci **SOČ** vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů. Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce **SOČ** jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Lounech dne

.....

Nguyen Tat Ha Noi

Poděkování

Děkuji všem, kteří při mě stáli, hlavně svému garantovi práce Ing. Onřeji Lachoutovi za cílevědomé vedení a podporu. Dále svým rodičům, kteří vždy upřednostňovali moje vzdělání nad vlastními zájmy. Mnohokrát Vám děkuji.

Nguyen Tat Ha Noi

Abstrakt

Tato práce se zabývá šířením radionuklidů v ovzduší při spuštění bezpečnostních systémů po závažné havárii v primárním okruhu jaderné elektrárny, se zaměřením na porovnání velkých reaktorů ([APR1000](#)) a malých modulárních reaktorů ([SMR](#)). Hlavním cílem bylo vytvořit zjednodušený numerický model v jazyce Python, který umožňuje odhadnout efektivní dávku záření pro obyvatelstvo na základě šíření radioaktivního mraku za různých podmínek. Model zohledňuje faktory jako rychlost větru, výšku komína, účinnost filtru a stabilitu atmosféry, které ovlivňují šíření radionuklidů. Výsledky ukazují, že menší množství paliva v [SMR](#) vede k nižším dávkám radiace ve srovnání s [APR1000](#), přičemž klíčovou roli hrají účinnost filtrace a výška komína. Studie přispívá k lepšímu pochopení rizik a bezpečnostních aspektů různých typů jaderných reaktorů.

Klíčová slova

Jaderná energetika, šíření radioaktivního mraku, Rolls-Royce [SMR](#), [APR1000](#)

Abstract

This work focuses on the dispersion of radionuclides in the atmosphere following the activation of safety systems after a severe accident in the primary circuit of a nuclear power plant, with an emphasis on comparing large reactors ([APR1000](#)) and small modular reactors ([SMR](#)). The main objective was to develop a simplified numerical model in Python to estimate the effective radiation dose to the population based on the spread of the radioactive plume under various conditions. The model takes into account factors such as wind speed, stack height, filter efficiency, and atmospheric stability, all of which influence radionuclide dispersion. The results show that the smaller fuel inventory in [SMRs](#) leads to lower radiation doses compared to [APR1000](#), with filter efficiency and stack height playing a crucial role. This study contributes to a better understanding of the risks and safety aspects of different types of nuclear reactors.

Keywords

Nuclear energy, radioactive plume dispersion, Rolls-Royce [SMR](#), [APR1000](#)

Obsah

Úvod	7
1 Motivace pro jadernou energetiku	8
1.1 Konkurenceschopnost	8
1.2 Dopad na prostředí	9
1.3 Nové technologie	10
2 Malé modulární reaktory	11
2.1 Rolls-Royce SMR	12
2.1.1 Technické parametry	12
3 APR1000	14
3.1 Technické parametry	14
4 Popis šíření radionuklidů	16
4.1 Matematický popis šíření radioaktivního mraku	16
4.1.1 Výška stoupajícího mraku	17
4.1.2 Výška komína	19
4.2 Vliv počasí	19
4.2.1 Passquillovy třídy stability	19
4.2.2 Rozptyl radioaktivního mraku	20
4.3 Množství uvolněných radionuklidů	21
4.3.1 Rozpad radionuklidů v čase	22
4.3.2 Koncentrace v mraku na jednotku dráhy	22
4.3.3 Výběr relevantních radionuklidů	22
4.3.4 Množství (plošné) ekvivalentní dávky	23
4.4 Propojení rovnic	24
4.5 Numerický model	24
4.5.1 Python	25
4.5.2 Použité knihovny	25
5 Výsledky implementovaného modelu	26
5.1 Dávkový příkon při standardních podmínkách	27
5.2 Vliv různých Pasquillových tříd stability	27
5.3 Vliv pohlaví a věku osoby na hodnotu dávkového příkonu	28
5.4 Vliv filtru na množství vypuštěných radionuklidů	29
5.5 Vliv rychlosti větru	30
5.6 Vliv výšky komína	30
5.7 Vliv objemové rychlosti vypouštění	31
Závěr	32

Reference	33
Seznam použitých zkratk	38
Seznam použitých veličin	39
Seznam obrázků	40
Seznam tabulek	40

Úvod

V poslední době se na energetickém trhu objevují nové návrhy s jadernou technologií, která má pomoci světu s přechodem k uhlíkově neutrálnějším alternativám a nabízí řešení problematiky dlouhých stavebních prací a dalších problémů spojených s velkými konvenčními reaktory. Tyto problémy se do jisté míry snaží řešit malé modulární reaktory (SMR). Mimo ekonomické aspekty výrobci slibují vyšší bezpečnost těchto reaktorů. Jedním z cílů této práce bude srovnání velkého reaktoru APR1000 od korejské společnosti KHNP a malého modulárního reaktoru od britské společnosti Rolls-Royce (RR). Tyto dva reaktory byly vybrány kvůli jejich potenciální výstavbě v České republice. Konkrétně se jedná o případné dva bloky APR1000 v Dukovanech a jednoho reaktoru RR SMR v Temelíně. Zatímco výstavba APR1000 je, po finálním podpisu kontraktu, očekávaná v nejbližších letech, design britského SMR je stále ve fázi získávání povolení a kompletaci designu. Po úspěšné implementaci se v budoucnu počítá s nahrazením dosluhujících uhelných elektráren za tyto technologie.

Malé reaktory obsahují méně jaderného paliva, a tedy při případné havárii by měly uvolnit i menší množství radionuklidů.

Hlavními cíli této práce jsou vytvoření modelu popisujícího šíření radioaktivního mraku v atmosféře a srovnání dávkových příkonů při havarijních podmínkách. Havarijními podmínkami se rozumí hypoteticky nejhorší možný scénář nekontrolovatelné štěpné reakce, která bude mít za příčinu vypaření chladicí kapaliny, roztavení jaderného paliva a uvolnění relevantních radioaktivních látek. V praxi existuje mnoho modelů pro výpočet podobných scénářů, ale většinou jsou velice složité, časově náročné a veřejnosti nepřístupné.

Prezentovaný model v této práci je značně zjednodušený, ale i tak poskytuje uživateli dobrý prvotní odhad při nepředpovídatelných haváriích. Numerický model šíření radionuklidů byl vytvořen v programovacím jazyce Python. Prezentovaný model popisuje šíření kontrolovaně odčerpaných plyných radioaktivních látek v prostředí s proměnlivými parametry. Vliv jednotlivých parametrů na celkové množství efektivní dávky je analyzován a detailněji rozebrán.

Výsledky mohou přispět k lepšímu pochopení rizik a pomoci optimalizovat havarijní plány pro budoucí generace jaderných reaktorů.

1 Motivace pro jadernou energetiku

Jaderná energetika hraje ve světě důležitou roli už od 60. let, ale svého vrcholu dosáhla v období 70.-90. letech minulého století. Po dvou těžkých haváriích se tento růst zpomalil. [1] Dnes, když se hledají alternativy k uhlí a ropě, jaderná energetika opět nachází své místo. Hlavní výhody jádra jsou především v nezávislosti na počasí, denním cyklu a ostatních parametrech, které jsou blíže popsány níže.

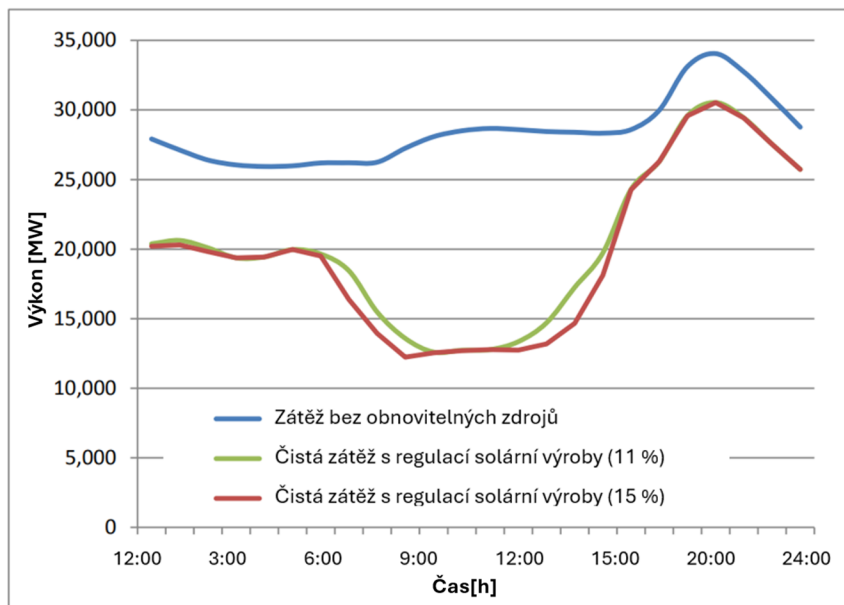
1.1 Konkurenceschopnost

V současné době se jaderné reaktory také využívají na letadlových lodích a v jaderných ponorkách po celém světě, tudíž technologie malých, které dokážou bez problémů běžet několik desítek let, se osvědčila a jejich využití je dobrou ekonomickou investicí.

Důležitým argumentem pro [SMR](#) a jadernou energetiku obecně je výroba nejen elektrické energie, ale i tepla, které je důležité hlavně pro průmysl. Průmyslové odvětví spotřebuje ročně 25,1 % energetické produkce v [EU](#) a světově to činí 1/3 veškeré produkce. [2], [3]

Proti jaderné energetice se staví nejen fosilní paliva, ale musí být konkurenceschopná i vzhledem k ostatním uhlíkově neutrálním alternativám. Nejčastěji diskutovanými jsou fotovoltaika a větrné elektrárny. Jejich význam a podíl pro dosažení uhlíkové neutrality jsou nezanedbatelné, závisí však na mnohých vnějších faktorech, jako je počasí (rychlost větru, oblačnost, teplota) nebo podnebí (méně slunečního svitu v zimě). Následná “chybějící energie” musí být kompenzována jinými zdroji elektrické energie, kterými tedy často bývají uhlí, voda nebo jádro. Tyto zdroje se přizpůsobí poptávce, díky jejich nezávislosti na vnějších faktorech. Poptávka po elektrické energii je časově (na úrovni hodin) proměnná a podle toho je potřeba zajistit výrobu. Tento jev zachycuje tzv. Duck curve, viz [Obrázek 1](#).

Graf ukazuje denní energetickou zátěž, tedy poptávku po elektřině. Zátěž v poledních hodinách klesá, kdy solární elektrárny jsou schopné generovat nejvyšší možný výkon. Jejich produkovaný výkon musí být dále regulován, protože by se vytvářelo více energie, než je potřeba v oběhu a náhlé kolísání by mohlo poškodit rozvodný systém. Dále z grafu vyplývá, že obnovitelné zdroje energie obvykle zajišťují spíše přerušované dodávky energie, oproti tomu uhelné a primárně jaderné elektrárny pracují především v základním zatížení, tzv. base load. [4]



Obrázek 1: Denní energetická zátěž. [5] (modifikováno)

Jedním z cílů dnešního světa je přechod od velkých centralizovaných výroben elektrické energie a přejít na menší, tzv. mikrosítě. Právě mikrosítě by měly zajistit lepší stabilitu sítě, dále zlepšit spolehlivost a odolnost kritické infrastruktury. V otázce decentralizace by mohly výborně posloužit malé reaktory. Podle studie malých modulárních reaktorů v moderních decentralizovaných mikrosítích z roku 2014 bylo zjištěno, že celková cena využití [SMR](#) pro výrobu elektřiny by byla výrazně nižší než v porovnání s ostatními zelenými alternativami po jejich úspěšné implementaci. Nezávislost [SMR](#) vůči vnějším faktorům je klíčová, protože se dají umisťovat i do těžko dostupných lokalit, nebo tam, kde nejsou jiné zdroje pro získávání energie. Příkladem je jaderná elektrárna Akademik Lomonosov, která je umístěná na ledoborci obsahující 2 reaktory s celkovým výkonem 70 MW. Tato plovoucí elektrárna dodává energii do nejsevernějšího města Ruska, Peveku (na poloostrově Čukotka). [6], [7]

1.2 Dopad na prostředí

Když se mluví o dopadu na prostředí, vyčnívají nejvíce uhelné elektrárny, kde lze přímo pozorovat jejich znečišťování ovzduší. Nelze opomenout samotnou těžbu, která tvoří náročný proces, kde se buď hloubí kilometrové doly, nebo povrchově odklidí stovky tun zeminy. [8] Nelze přehlédnout, jak ovlivňují jednotlivé zdroje své okolí. Pro výstavbu vodní elektrárny se musí přehradit tok řek, a tím se zatopí značná část území, vypouštěná voda je také regulována, snižuje se tím tok a konstantnost průtoku vody, což ovlivňuje dolní části řeky, kde je menší objem vody. [9] Solární panely zabírají ohromné plochy půdy. Větrné turbíny vyžadují určitou rychlost větru, která musí být vyšší než jejich minimální rychlost, a produkováný výkon

tedy závisí na rychlosti větru a velikosti. [10]

Jadernou elektrárnu lze provozovat na značně menší ploše, neprodukuje hluk a přestože se uranová ruda pro výrobu jaderného paliva musí těžit, množství produkováné energie na kilogram je mnohonásobně vyšší než u uhlí. [11] Přitom množství jaderného paliva a tedy potřebné rudy se odlišuje podle velikosti reaktorů.

1.3 Nové technologie

V nynější době dochází k jaderné renesanci. Roste zájem o výzkum nových bezpečnějších technologií a zkoumají se nové aplikace jaderné energetiky, jako třeba vesmírné technologie. [12] Na energetickém trhu s jadernými technologiemi se v poslední době ukazuje více nových start-upů, které mají za cíl produkovat energii stejně spolehlivě jako velké komerční reaktory za menší cenu a menší potřebný objem paliva. [13] Tohoto cíle chtějí dosáhnout pomocí tzv. **SMR** (Malých modulárních reaktorů). Hlavní rozdíly mezi malými reaktory a velkými jsou:

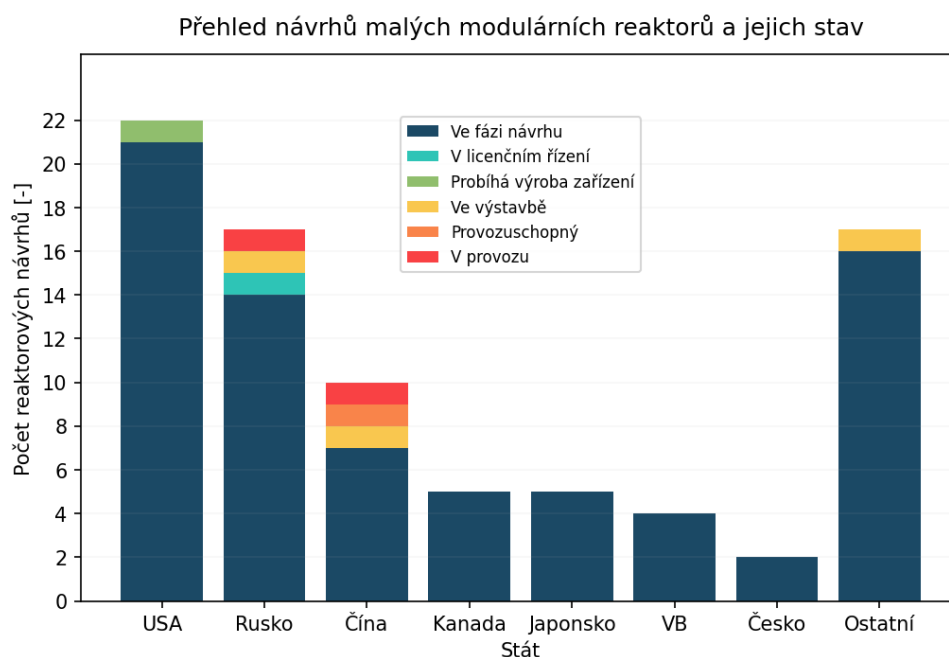
- Menší kapacita,
- modularita,
- flexibilní instalace,
- odpad a palivo.

Rozdíly budou detailněji rozebrány v další kapitole.

2 Malé modulární reaktory

Malý modulární reaktor (dále jen **SMR**) je definován jako reaktor s elektrickým výkonem do 300 MW(e) pro jeden modul. [14] Hlavní výhodou malých reaktorů je jejich modulárnost, tedy že se dají vyrábět sériově, čímž se sníží konstrukční doba a zredukuje cena; není zapotřebí velkých ploch, menší náklady na materiály a samotnou výstavbu.

Dnes existuje více jak 80 návrhů **SMR**. V Obrázku 2 lze vidět, že značný počet designů pochází ze Spojených států, avšak pouze 3 z nich jsou v pokročilém stádiu výstavby, a to v Číně (Linglong One), Rusku (Leningrad 2-3), Argentíně (CAREM). [13] Česká republika plánuje **SMR** od společnosti Rolls-Royce v Temelíně. Přehled návrhů **SMR** a jejich stav vývoje pro jednotlivé země je prezentován na Obrázku 2.



Obrázek 2: Počet nových designů **SMR** (2022). [15] (modifikováno)

Jedna z nejvíce vyzdvihoovaných výhod **SMR** je pasivní bezpečnost, kdy v případě havárie dojde k odstavení reaktoru a dostatečnému chlazení aktivní zóny. Tato bezpečnost funguje na principu přirozené cirkulace chladiva. Využívá se zde fyzikálních zákonů, kdy teplejší voda stoupá vzhůru a studená klesá dolů, tím se vytvoří přirozené proudění bez nutnosti čerpadel. Tento systém je mnohem spolehlivější než aktivní bezpečnostní systémy, protože (při dobrém designu reaktoru) funguje i při úplné ztrátě elektrického napájení. [16]

2.1 Rolls-Royce SMR

Rolls Royce (RR) SMR je první reaktor pro komerční využití od britské společnosti Rolls-Royce. Známa automobilová firma nemá daleko od jaderných technologií, má mnoholeté zkušenosti s konstrukcí jaderných ponorek pro britské námořnictvo. Jejich koncept SMR se liší od konkurence sníženým objemem potřebných stavebních činností, díky předchozím zkušenostem s menšími reaktory, mají také část manufakturního procesu už postavenou. [17]

Reaktor Rolls Royce není přesnou definicí SMR, kvůli jeho nominálnímu výkonu, který činí 470 MWe. Jelikož neexistuje kategorie středních reaktorů a plocha na výstavbu činí pouze 40 000 m², řadíme jej stále mezi malé modulární reaktory. [16]

První ucelený design konceptu vznikl v roce 2017 a v roce 2022 byl legislativně přijat. Společnost by chtěla začít s výstavbou už v roce 2026. Plánovaná doba výstavby je plánována na 500 dní. V roce 2030 by měl být reaktor uveden do komerčního provozu. [18]

2.1.1 Technické parametry

Primární okruh a aktivní zóna

Skládá se z třísmýčkového obvodu využívajícího nepřímý Rankinův cyklus. Chladicí kapalina cirkuluje třemi odstředivými čerpadly do tří odpovídajících vertikálních u - trubnicových parogenerátorů. (viz Obrázek 3) I přes zmenšení se zachovává vysoká bezpečnost, tedy ochranná obálka (kontejnment) zůstane těsná při pádu letadla, tsunami i zemětřesení.

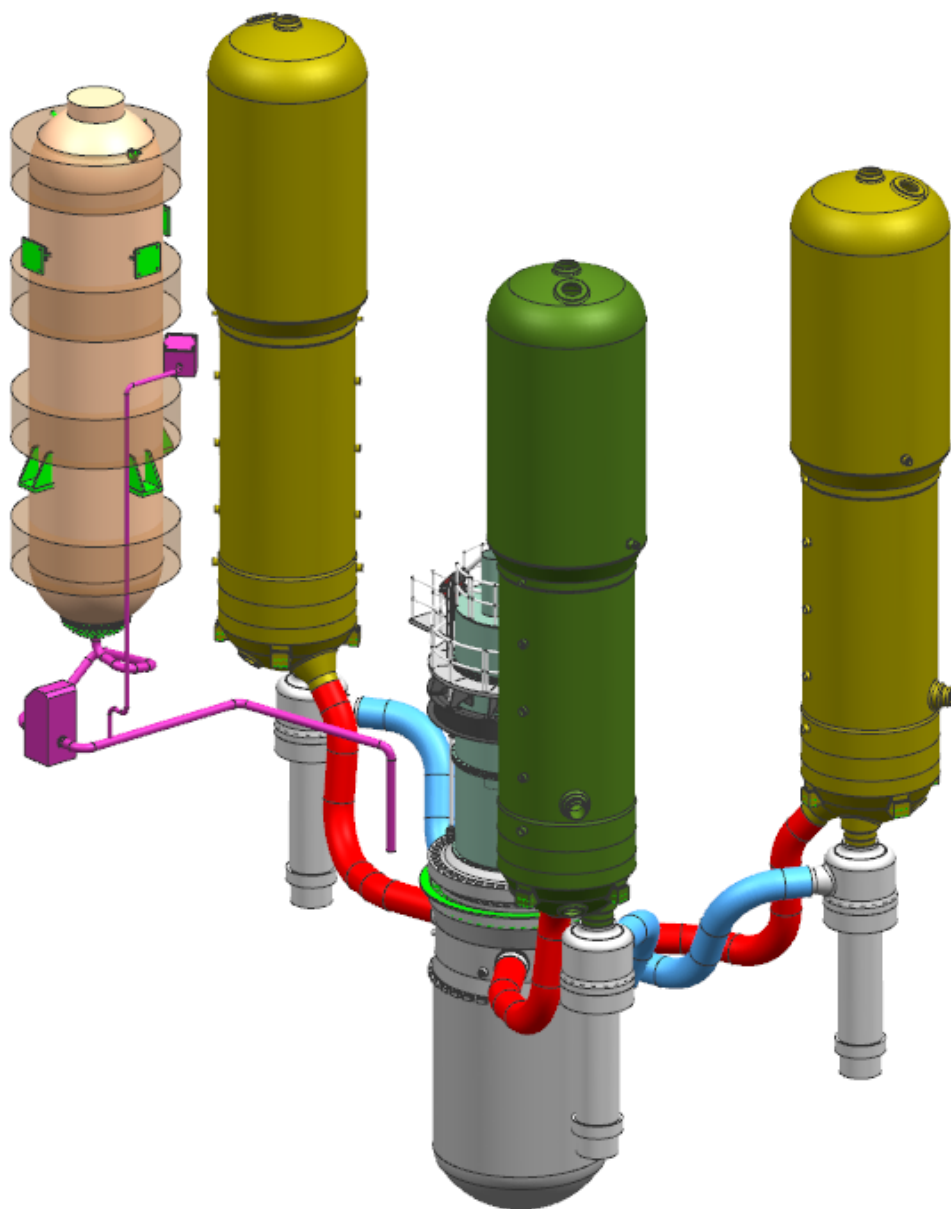
Doplňování paliva je řízeno prostřednictvím uzavřeného tankovacího bazénu, který dočasně skladuje nové i použité palivo během odstávky. Použité palivo se následně převádí do vnějšího bazénu vyhořelého paliva, kde se skladuje před přemístěním do dlouhodobého suchého skladu. [16]

Aktivní zóna

Zóna je uspořádána ve čtvercové konfiguraci 17×17. Ta obsahuje 121 palivových souborů. Palivo ve formě UO₂ bude obohaceno až na 4,95 %. Jak už bylo zmíněno, nominální výkon reaktoru dosahuje 430 MW(e) a 1358 MW(t). Jedna palivová kampaň bude trvat 18 měsíců. Odhadované vyhoření jednoho souboru je 50-60 MWd/kg_{HM}. [17]

Bezpečnostní parametry

Rolls-Royce uvádí, že pasivní chlazení dokáže udržet bezpečný autonomní chod reaktoru na 72 h, minimalizuje se tím potřeba lidské činnosti a snižuje riziko chyby lidského faktoru. [17] Havarijní chlazení aktivní zóny zajišťuje odvod tepla pomocí snížení tlaku v chladicím systému reaktoru a trvalého přívodu vstřikovaného chladicího média.



Obrázek 3: Schéma primárního okruhu [RR SMR](#). Velké zelené nádoby reprezentují tepelné výměníky s parogenerátory, v levé části se nachází kompenzátor objemu, ve spodní části je samotná nádoba reaktoru. [19]

3 APR1000

APR1000 je v současné době vlajkovým reaktorem jihokorejské státní společnosti KHNP (Korea Hydro and Nuclear Power). Jedná se o tlakovodní reaktor generace III+. Vyznačuje se výkonem 1050 MW(e), vychází z předchozích projektů společnosti, které jsou korejský standard OPR1000 a projekt APR1400, z kterého byly převzaty bezpečnostní prvky. [20]

Tento model nebyl ještě nikde realizován, plánovaná výstavba dvou bloků v Dukovanech se po otevření a uvedení do provozu stane prvním svého druhu. Tato zakázka je také prvním vstupním projektem korejských firem do Evropy. Obdobný model s vyšším instalovaným výkonem APR1400 už je v provozu v Koreji a Spojených arabských emirátech. V Koreji už bylo postaveno několik bloků tohoto typu. Jsou instalované v nejvýkonnějších jaderných elektrárnách na světě Shin Kori a Shin Hanul, tím prokázaly svou spolehlivost a bezpečnost pro zahraniční investory. V Emirátech byl tento projekt vybrán pro výstavbu JE Barakah. [21], [22]

Datum podepsání smlouvy mezi ČEZ a KHNP se plánuje nejpozději do 31.3.2025, poté by mohly započít první práce. Kdy bude reaktor dostavěn a kdy uveden do provozu, se zatím neví. KHNP uvádí, že by stavba mohla trvat i pouhých 57 měsíců, to je necelých 5 let.

3.1 Technické parametry

Primární okruh

Primární okruh je tvořen dvousmyčkovým chladicím uspořádáním s dvěma parogenerátory, čtyřmi hlavními cirkulačními čerpadly a samozřejmě kompenzátorem objemu. Stanovený tepelný výkon má dosahovat 2815 MW(t), což je ekvivalent 1050 MW(e). [16]

Aktivní zóna

Je tvořena 177 palivovými soubory v čtvercovém uspořádání 16×16 k řízení reaktoru slouží 73 kontrolních tyčí. Průměrný měrný objemový výkon aktivní zóny je $96,26 \text{ W/cm}^3$. [16]

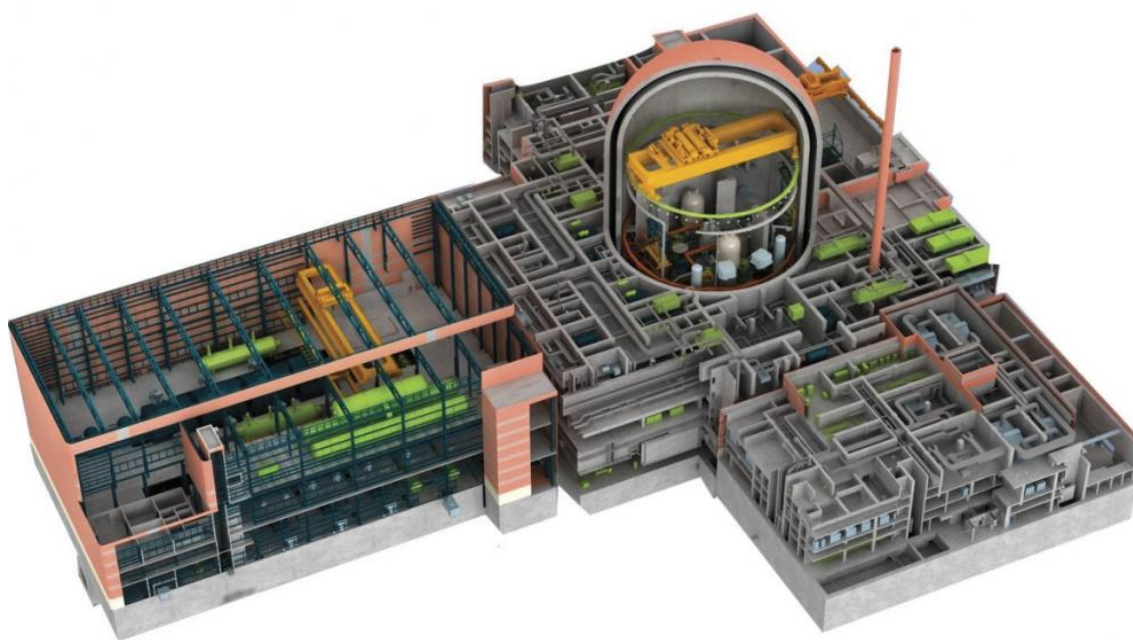
Jako palivo se využívají pelety oxidu uraničitého (UO_2) v kombinaci s vyhořívajícím absorbátorem ve formě obsahující Gd_2O_3 . Konstrukce paliva HIPER16TM má průměrné vyhoření až 60 MW/kgHM a má zvýšenou rezervu nadměrného výkonu ve srovnání s předchozí konstrukcí paliva PLUS7TM, které se využívá v OPR1000. [16]

Plánovaná délka jedné kampaně je 24 měsíců, což je více než u RR SMR. [16]

Bezpečnostní parametry

Z obecného hlediska je APR1000 jeden z nejbezpečnějších reaktorových designů generace III+.

Bezpečnostní parametry se specializují zvláště na strategii ochrany do hloubky, redundanci a pasivní bezpečnostní systémy, aby byla zajištěna stabilita reaktoru a snížila se pravděpodobnost vzniku havárie. Klíčové bezpečnostní prvky zahrnují pasivní systém zadržení a chlazení roztaveného paliva (PECS), opatření pro zmírnění hromadění vodíku a systém udržení tlaku v nádobě reaktoru (IVR). Reaktor je také seizmicky odolný vůči zemětřesení na úrovni 5 m/s^2 PGA a obsahuje ochranu proti nárazu letadla díky zesílené konstrukci kontejnmentu. Dalším důležitým systémem je systém filtrovaného odvětrání kontejnmentu (FCVS). Který odvádí teplo a tlak z kontejnmentu při havárii či úniku radioaktivních látek. Tento systém, přesněji dopady šířícího se radioaktivního mraku, budou rozebrány v následující kapitole. [23]



Obrázek 4: Schéma elektrárny s reaktorem s APR1000. [24]

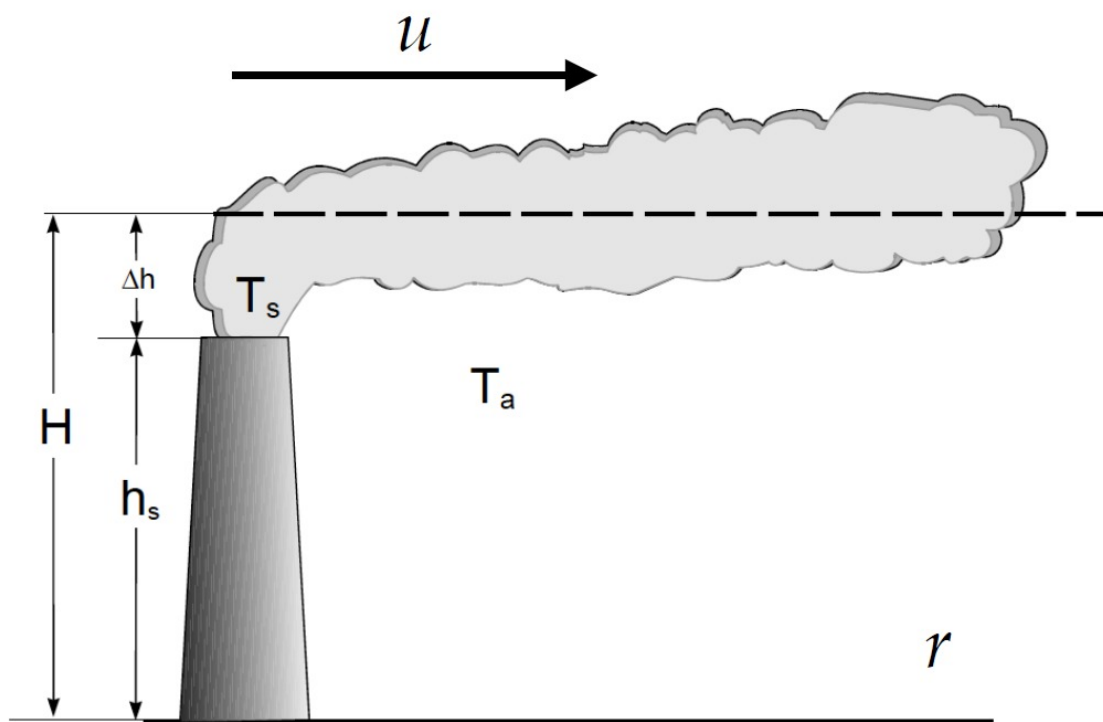
4 Popis šíření radionuklidů

Při poškození reaktoru, chladicího systému, nebo úniku chladiva existují bezpečnostní systémy pro odvětrání filtrovaného objemu pro snížení tlaku a teploty v kontejnmentu. Tento systém má zaručit snížení nepravděpodobného výbuchu kontejnmentu z důvodu přetlakování. Další text je věnován popisu šíření vzniklého radioaktivního mraku po jeho vypuštění do atmosféry. V praxi se šíření modeluje kombinací dat z experimentálního pozorování a stochastických výpočtů (využívající metody Monte Carlo) na komplexních simulačních modelech. Cílem dalšího textu bude popis a vytvoření zjednodušeného deterministického modelu.

4.1 Matematický popis šíření radioaktivního mraku

Pro matematický popis šíření radioaktivního mraku je potřeba zohlednit více vlivů, mezi nejdůležitější patří:

- Výška mraku od země,
- vliv počasí,
- množství uvolnění radionuklidů,
- možnost zachycení filtrem.



Obrázek 5: Počáteční uvažované parametry. [25] (modifikováno)

4.1.1 Výška stoupajícího mraku

Výšku stoupajícího mraku lze popsat tzv. Briggsovou rovnicí, viz (1). [26]

$$\Delta h(r) = \frac{1,6}{u} r^{2/3} F_b^{1/3}, \quad (1)$$

kde $\Delta h(r)$ je výška mraku nad komínem, u je rychlost větru, r je kolmá vzdálenost od komína a F_b je vztakový faktor.

Rovnice může mít více vyjádření v závislosti na hodnotě vztakového faktoru F_b , který je dán vztahem (2) [27].

$$F_b = \frac{g}{\pi} RR(t) \frac{T_s - T_a}{T_s}, \quad (2)$$

kde g je gravitační zrychlení, T_s je teplota plynů uvnitř komína a T_a je vnější teplota atmosféry. $RR(t)$ je obecně nestacionární funkce popisující objemovou rychlost vypouštění radionuklidů z komína. Tato reprezentace vztakového faktoru byla vybrána s ohledem na měřitelnost daných parametrů.

Funkci $RR(t)$ lze vyjádřit jako součin rychlosti vypouštění plynů a průřezu komína, viz (3).

$$RR(t) = S \cdot w_{\text{out}}(t) = \text{konst.} \quad (3)$$

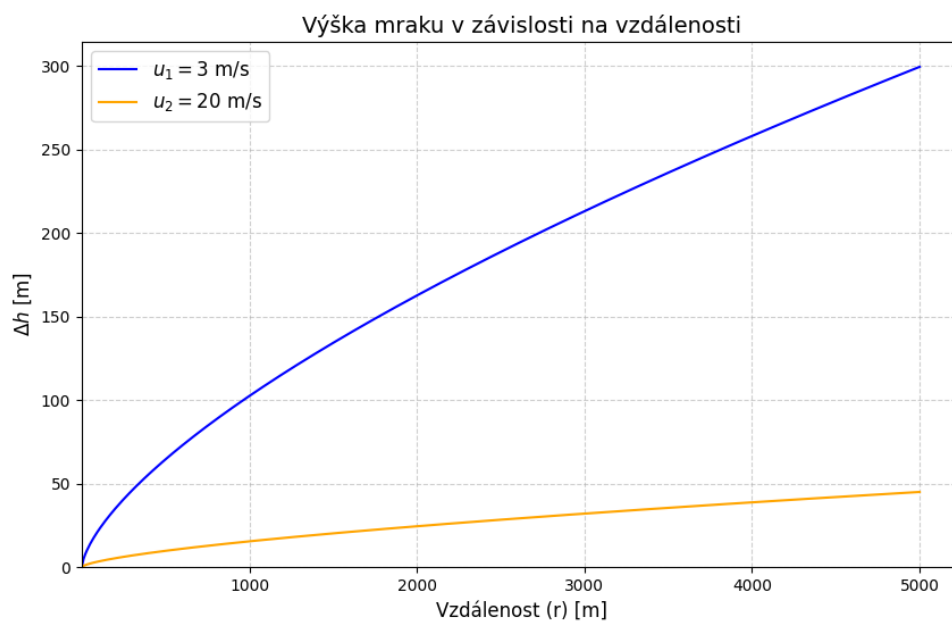
Výstupní rychlost $w_{\text{out}}(t)$ je časově proměnná funkce závisující na rozdílu tlaků, teplot a míře vypouštěných látek. Pro zjednodušení budeme dále uvažovat tuto rychlost jako konstantní.

Dosazení tohoto předpokladu do rovnice (1), dostáváme finální vztah (4).

$$\Delta h(r) = \frac{1,6}{u} r^{2/3} \left[\frac{g}{\pi} RR \frac{T_s - T_a}{T_s} \right]^{1/3}, \quad (4)$$

Tato rovnice ukazuje, do jaké výšky a vzdálenosti se mrak dostane při zvolených parametrech, jako jsou rychlost větru, plocha otvoru, z něhož uniká plyn, teplota uvolňovaných plynů a vnější teplota prostředí.

Když porovnáme nízkou rychlost větru a normální podmínky (viz Obrázek 6), vidíme, že při slabém větru se mrak přirozeným prouděním dostane rychle vysoko do atmosféry a pouze jeho nepatrná část se dostane do střetu se zemí. Oproti tomu při extrémní rychlosti větru je z grafu jasně pozorovatelné, že se mrak udržuje při zemi a nedovoluje teplejšímu vzduchu průnik do vyšších vrstev atmosféry, proudění funguje jako bariéra přirozené cirkulace. Můžeme tedy říct, že rychlost větru silně ovlivňuje šíření a v tomto zjednodušeném modelu je nejideálnější scénář pro co nejmenší kontaminaci při nebezpečném úniku radioaktivních látek z komínu by bylo při bezvětří. V praxi záleží na velkém množství parametrů a výrazně se projevují turbulence.



Obrázek 6: Vertikální výška mraku pro různé rychlosti větru.

Naopak, jak je prezentováno na Obrázku 7 rozdíl teplot $\Delta T = T_s - T_a$ má minimální vliv na výšku mraku. Z grafu je pozorovatelné, že se křivky téměř překrývají. Pro náš model byla volena konstantní průměrná rychlost větru v ČR (5 m/s) a průměrná teplota atmosféry (10 °C). [28], [29]



Obrázek 7: Vertikální výška mraku pro různé teploty atmosféry.

4.1.2 Výška komína

Radionuklidy se uvolňují z komína v určité výšce nad zemí tak, aby zabránily přímému styku se zemí a přímo tak neohrožovaly nejbližší okolí elektrárny. Celková výška mraku nad zemí je dána rovnicí (5).

$$H(r) = h_0 + \Delta h(r), \quad (5)$$

kde h_0 je výška komína, pro kterou byla vybrána hodnota 155 m což je výška komína v JE Temelín [30].

4.2 Vliv počasí

Šíření radioaktivního mraku atmosférou je ovlivňováno primárně rychlostí větru a vlivem počasí. Matematický popis počasí je velice obsáhlý a komplexní jev, takže při vytváření modelů na výpočet šíření polutantů a jiných plynných látek se pro zjednodušení popisu využívají tzv. Pasquillovy třídy stability.

4.2.1 Passquillovy třídy stability

Pasquillovy třídy stability neboli také Pasquillovy parametry stability je klasifikační systém pro atmosférickou stabilitu, který se využívá pro popis turbulencí a promíchávání vzduchu v atmosféře ovlivňující šíření mraků a lze je interpretovat jako matematickou interpretaci počasí. Tyto podmínky stability byly popsány v práci [31]. Model může využít těchto parametrů v případě plynulých proměn počasí. Popis jednotlivých Pasquillových tříd stability je prezentován v Tabulce 1.

Tabulka 1: Rozdělení Pasquillových tříd stability podle tepelného gradientu. [31]

Pasquillova třída stability	Atmosférická stabilita	Tepelný gradient
A	Extrémně nestabilní	$< -1,9$
B	Moderativně nestabilní	$-1,9$ do $-1,7$
C	Mírně nestabilní	$-1,7$ do $-1,5$
D	Neutrální	$-1,5$ do $-0,5$
E	Mírně stabilní	$-0,5$ do $1,5$
F	Stabilní	$> 1,5$

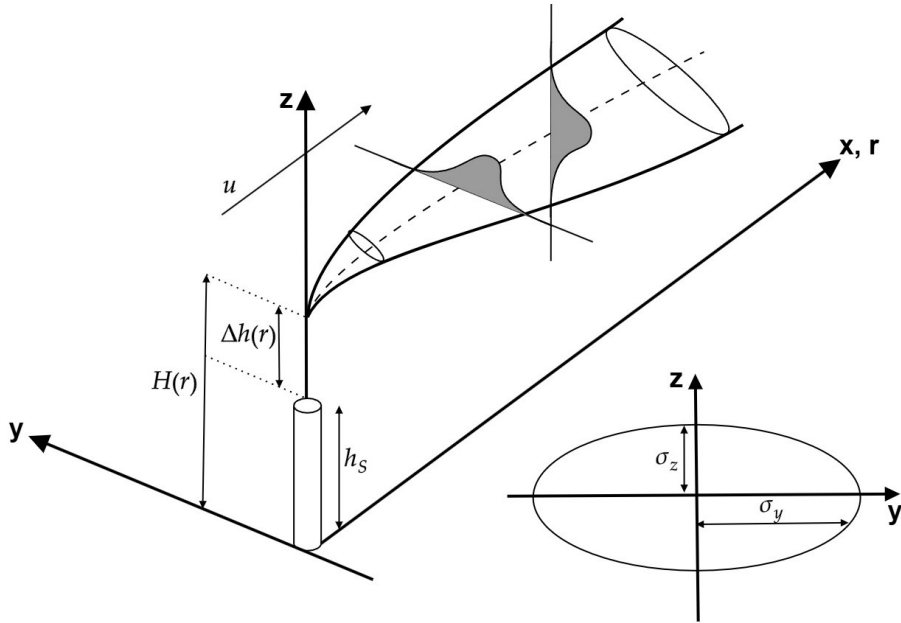
Na Obrázcích 6 a 7 bylo prezentováno, že rychlost větru je mnohonásobně významnější pro výšku mraku než uvažovaný rozdíl teplot. Tudíž použijeme upravené Pasquillovy podmínky a to tzv. Pasquill-Gifford-Turner. Tyto podmínky berou v potaz rychlost větru jako hlavní faktor pro určení stability počasí. viz Tabulka 2.

Tabulka 2: Klasifikace stability atmosféry podle rychlosti větru. [32] (modifikováno)

Rychlost větru	Denní insolace			Noční podmínky	
	Silná	Střední	Malá	Tenká oblačnost nebo $\geq 4/8$ nízká oblačnost	$\leq 3/8$ oblačnost
< 2 m/s	A	A-B	B	-	-
2-3 m/s	A-B	B	C	E	F
3-5 m/s	B	B-C	C	D	E
5-6 m/s	C	C-D	D	D	D
> 6 m/s	C	D	D	D	D

4.2.2 Rozptyl radioaktivního mraku

Pro popis vertikálního šíření radioaktivního mraku jsme zvolili Briggsovu rovnici (viz rovnice (1)). Tento model uvažuje šíření mraku gaussovým rozdělením jak v horizontální (y-osa) rovině, tak i ve vertikální (z-osa) rovině, viz Obrázek 8. Právě vertikální a přesněji polovina vertikální části gaussova rozdělení nás bude zajímat, protože tato část se bude šířit směrem k zemskému povrchu a tak přímo ovlivňovat živé organismy.

**Obrázek 8:** Vizualizace uvažovaného šíření mraku. [25] (modifikováno)

Gaussové rozdělení je dáno vztahem (6).

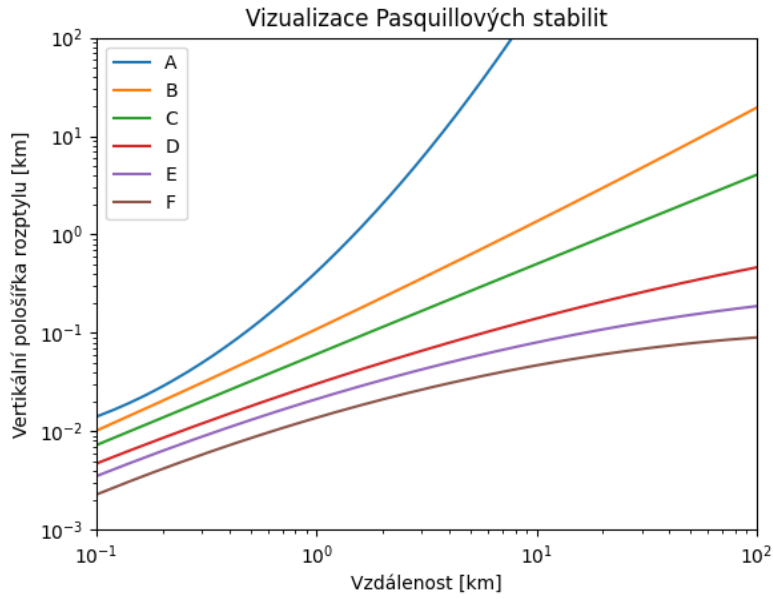
$$\text{gauss}_i(x, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (6)$$

kde proměnná x odpovídá pro vertikální složku gaussovy funkce hodnotě $H(r)$ a pro horizontální směr je rovna 0 (v horizontálním směru uvažujeme maximum funkce), μ je parametr udávající posun křivky (v našem modelu uvažujeme gaussovu funkci s maximem v bodě 0) a σ_i je rozptyl, ten bude ovlivněn už zmíněnými Pasquillovými

parametry dané rovnicí (7).

$$\sigma_i(r) = a_i + b_i \times \ln\left(\frac{r}{1000}\right) + c_i \times \ln\left(\frac{r}{1000}\right)^2, \quad (7)$$

kde a_i , b_i , c_i jsou koeficienty Pasquillových tříd stability, viz Tabulka 3 a r je vzdálenost od místa úniku. Vizualizace pološířek pro jednotlivé Pasquillovy stability je prezentována na Obrázku 9.



Obrázek 9: Rozptyl mraku podle koeficientů atmosférické stability v závislosti na vzdálenosti.

Tabulka 3: Koeficienty Pasquillových tříd stability. [33]

Stabilita	a_y	b_y	c_y	a_z	b_z	c_z
A	5,357	0,8828	-0,0076	6,035	2,1097	0,2770
B	5,058	0,9024	-0,0096	4,694	1,0629	0,0136
C	4,651	0,9181	-0,0076	4,110	0,9201	-0,0020
D	4,230	0,9222	-0,0087	3,414	0,7371	-0,0316
E	3,922	0,9222	-0,0064	3,057	0,6794	-0,0450
F	3,533	0,9181	-0,0070	2,621	0,6564	-0,0540

4.3 Množství uvolněných radionuklidů

Množství uvolněných radionuklidů závisí primárně na množství paliva v aktivní zóně reaktoru a částečně také na vyhoření paliva. Hmotnost paliva byla stanovena

na základě počtu palivových souborů, proutků v souboru a hustoty UO_2 . Pro stanovení hmotnosti a aktivity relevantních plynných štěpných produktů, které se v případě tavení paliva uvolní, byl proveden výpočet na nekonečném palivovém souboru v neutronickém kódu Serpent2 [34]. Z tohoto výpočtu byly hodnoty převzaty a přenormovány na uvažovanou hmotnost paliva, viz Tabulka 5. Tyto hodnoty poslouží jako počáteční aktivity (A_0) v rozpadovém zákoně.

Tabulka 4: Uvažované průměrné vyhoření a hmotnost paliva.

	RR SMR	APR1000
Vyhoření (MWd/kg _U)	50,0	55,0
Hmotnost UO_2 v reaktoru (t)	49,5	87,1

4.3.1 Rozpad radionuklidů v čase

Rozpad radionuklidů v čase se řídí zákonem radioaktivní přeměny, dán rovnicí (8).

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

kde A_0 je počáteční aktivita, t je čas, λ je rozpadová konstanta. S rozpadovou konstantou je svázán poločas rozpadu ($T_{1/2}$):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (9)$$

4.3.2 Koncentrace v mraku na jednotku dráhy

Uvažujeme-li, že koncentrace radioaktivních plynů je vypouštěna homogenně, lze celkovou koncentraci $C(t)$ spočítat jako součet aktivit všech radionuklidů, viz rovnice (10).

$$C(t) = \frac{\sum_i^N A^i(t)}{t_{\text{full}} \cdot u}, \quad (10)$$

kde t_{full} je celkový čas uvolňování radionuklidů a $A^i(t)$ je aktivita i -tého radionuklidu.

4.3.3 Výběr relevantních radionuklidů

Při těžkých haváriích, kde se z reaktoru uvolňuje mnoho různých radionuklidů z důvodu tavení paliva, zapříčiněného ztrátou chladicí kapaliny. Zatímco pevné látky zůstávají v reaktoru, kapaliny se mohou vypařit a společně s plynnými látkami se uvolňují při zvýšení tlaku, který musí být kompenzován. [35]

Tento plyn je směsicí mnoha radionuklidů, z nichž část je při vypouštění zachycena filtrem. Například těkavé látky, zde budou definovány nejen jako organické

těkavé látky (VOC), ale spadá pod ně i sloučeniny síry, dusíku, pevné částice a skleníkové plyny. Některé plyny však nelze odfiltrovat, to jsou hlavně vzácné plyny (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn), proto pro aktivitu vypuštěného radioaktivního mraku musíme rozlišovat na vzácné a ostatní plyny. [36]

Tabulka 5: Relevantní radionuklidy. [37]

Radionuklid	APR1000 - A_0 [PBq]	RR SMR - A_0 [PBq]	$T_{1/2}$	Dávkový koeficient
Sr-90	332	177	29,12 r	30 [nSv/Bq]
Te-132	4666	2637	78,2 h	2,4 [nSv/Bq]
I-131	3341	1883	8,04 d	11 [nSv/Bq]
I-133	6597	3744	21 h	4 [nSv/Bq]
Xe-133	6675	3783	5,245 d	0,12 [nSv/d/(Bq/m ³)]
Xe-135	1489	879	9,09 h	0,96 [nSv/d/(Bq/m ³)]
Cs-137	491	254	30 r	6,7 [nSv/Bq]
Ba-140	5460	3119	12,74 d	1,6 [nSv/Bq]

4.3.4 Množství (plošné) ekvivalentní dávky

Celková (plošná) dávka musí být spočítána jako součet dávek z těkavých (vypařených) látek a dávky ze vzácných plynů, které není možné zachytit filtrem, viz rovnice (11)

$$H^P(t) = H_{\text{vol.}}^P(t) + H_{\text{nob.}}^P(t) = C_{\text{vol.}}(t) \cdot \varepsilon^i \cdot F \cdot IR + C_{\text{nob.}}(t) \cdot \varepsilon^i, \quad (11)$$

kde $H_{\text{vol.}}(t)$ je (plošná) dávka z těkavých látek, $H_{\text{nob.}}(t)$ je dávka ze vzácných plynů, ε^i je dávkový koeficient pro i -tý radionuklid, IR je objemová míra inhalace a F je účinnost filtru nabývající hodnot v intervalu (0,1).

Objemová míra inhalace

Objemová míra inhalace je veličina popisující, kolik metrů krychlových vdechne jedinec za jednu hodinu. Průměrné hodnoty objemové inhalace podle pohlaví a věku jsou prezentovány v Tabulce 6.

Tabulka 6: Objemová inhalace podle pohlaví a věku. [38]

Kategorie	Objemová inhalace - IR [m ³ /h]			
	Odpočívající	Malá zátěž	Normální zátěž	Vysoká zátěž
Dítě, 6 let	0,4	0,8	2,0	2,3
Dítě, 10 let	0,4	1,0	3,2	3,9
Dospělý muž	0,7	0,8	2,5	4,8
Dospělá žena	0,3	0,5	1,6	2,9
Průměrný dospělý	0,5	0,6	2,1	3,9

V modelu je uvažována hodnota pro průměrného dospělého člověka při normálním fyzickém zatížení.

Limit efektivní dávky

Jako maximální ekvivalentní dávkou se rozumí stav, kdy je podle legislativy nutné evakuování obyvatelstva. Tento limit si určují jednotlivé země samy, ale nejčastěji vycházejí z nařízení [IAEA](#). V České republice je tento limit podle § 107 odst. 3 písm. c) vyhlášky č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje nastaven na hodnotu 100 mSv po dobu 7 dní. [39]

4.4 Propojení rovnic

V podkapitolách výše je uveden popis šíření radioaktivního mraku v prostředí a jeho pokles aktivity v čase. Propojením těchto rovnic lze určit aktivitu mraku v dané vzdálenosti a čase od místa uvolnění. Nejprve je definována funkce $\alpha(r, \sigma_z, \sigma_y)$ viz rovnice (12), která udává část radioaktivního mraku ve střetu se zemí.

$$\alpha(r, \sigma_z, \sigma_y) = \text{gauss}_z(H(r), \sigma_z) \times \text{gauss}_y(0, \sigma_y). \quad (12)$$

Efektivní dávkový příkon dávka v místě r a čase t je dána vztahem (13).

$$H(t, r) = \alpha(r, \sigma_z, \sigma_y) \cdot H^P(t), \quad (13)$$

Člověk stojící ve vzdálenosti R od vypouštění obdrží efektivní dávku danou součtem $H(t, r)$, přes čas vypouštění, viz rovnice (14).

$$H(R) = \int_{t_r}^{t_r+t_{\text{full}}} H(t, R) dt. \quad (14)$$

Pro výpočet jednotlivých rovnic byl model implementován v programovacím jazyce Python [40], který je schopen numerických výpočtů, transferu dat a vizualizace výsledků do grafické podoby.

4.5 Numerický model

Numerický model využívá přímého řešení deterministických rovnic z předešlé kapitoly. Oproti reálnému modelu tento zjednodušený popis obsahuje řadu zanedbání, a to zejména:

- Prostorovost,
- fyzikální bariéry,
- chemické navazování radionuklidů na atomy atmosféry,
- turbulence,
- není uvažován odraz radioaktivního mraku od země,
- nestacionarity okolního prostředí,

- rozpad uvažovaných radionuklidů na jiné radioaktivní látky,
- a další.

4.5.1 Python

Python je programovací jazyk, který navrhl Guido van Rossum v roce 1991 a vyvinula jej společnost Python Software Foundation [41]. Je navržen tak, aby byl snadno čitelný a srozumitelný, díky čemuž je ideální volbou pro začátečníky. Python využívá jednoduchou a přehlednou syntaxi, která umožňuje psát méně kódu ve srovnání s jinými jazyky, jako jsou C++ nebo Java. [42]

Další výhodou Pythonu jsou rozmanité knihovny, které pomáhají v různých nezbytných matematických operacích a grafických zobrazení výsledků.

4.5.2 Použité knihovny

Python má rozsáhlou knihovnu modulů a balíčků, které usnadňují vývoj různých aplikací. Tyto knihovny obsahují předem napsaný kód pro běžné úkoly, jako je práce se soubory, tvorba webových aplikací nebo matematické výpočty.

Nejpodstatnějšími knihovnami pro nás byly matematická knihovna NumPy, pro integrace byla využita knihovna SciPy a pro grafické zobrazení dat knihovna Matplotlib. [43], [44], [45]

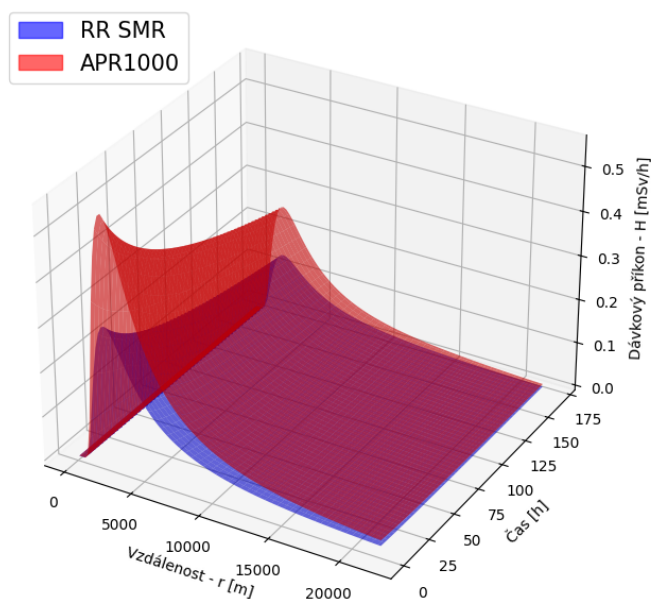
5 Výsledky implementovaného modelu

Pro výpočty s využitím vytvořeného modelu byly uvažovány parametry prezentované v Tabulce 7, není-li uvedeno jinak.

Tabulka 7: Souhrn uvažovaných parametrů a jejich hodnoty. (Standartní podmínky)

Uvažované parametry	Hodnota	Odůvodnění
Výška komína (h_0)	155 m	Výška komína v JE Temelín [30]
Rychlost větru (u)	5 m s^{-1}	Průměrná rychlost větru v ČR [28]
Vnitřní teplota (T_s)	70°C	Konzervativní odhad
Venkovní teplota (T_a)	10°C	Průměrná teplota v ČR [29]
Referenční vzdálenost (r)	20 km	Velikost havarijního okruhu JE Dukovany [46]
Účinnost filtru (F)	99,5 %	Vysoká účinnost [37]
Objemová rychlost (RR)	$1,0 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$	Konzervativní odhad
Objemová inhalace (IR)	2,1	Průměrný dospělý s normální zátěží [38]
Čas vypouštění (t_{full})	7 d	Den určení nutnosti evakuace obyvatel [39]
Prostředí	Volné prostranství	Okolí JE Dukovany [46]
Paquillova třída stability	C	Minimální nestabilita [31]

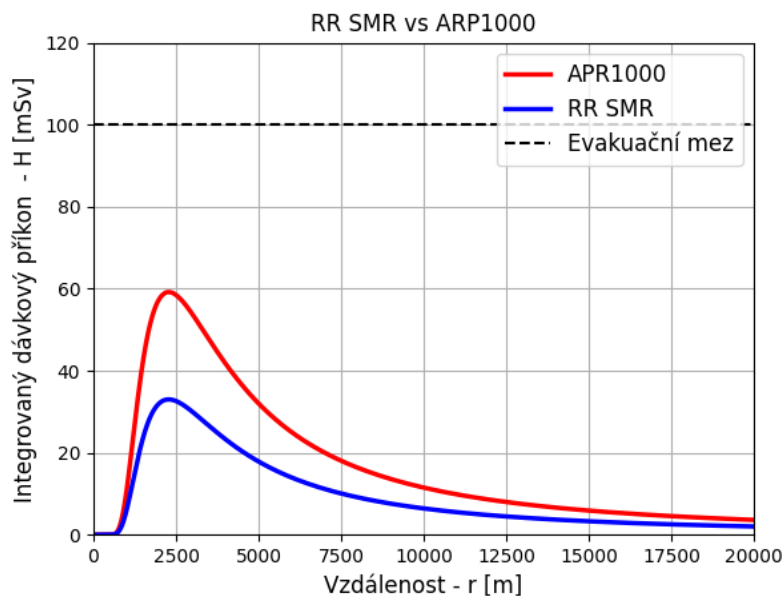
Na Obrázku 10 je prezentována závislost příkonu dávkového ekvivalentu H (mSv/h) v závislosti na čase a prostoru.



Obrázek 10: 3D vizualizace průběhu dávkového ekvivalentu v závislosti na čase a prostoru.

Na tomto grafu je vidět, že dávkový ekvivalent se snižuje se vzdáleností a hlavně časem, vliv na tuto skutečnost má rozpadový zákon (8), který říká, že aktivita klesá s časem exponenciálně.

5.1 Dávkový příkon při standardních podmínkách



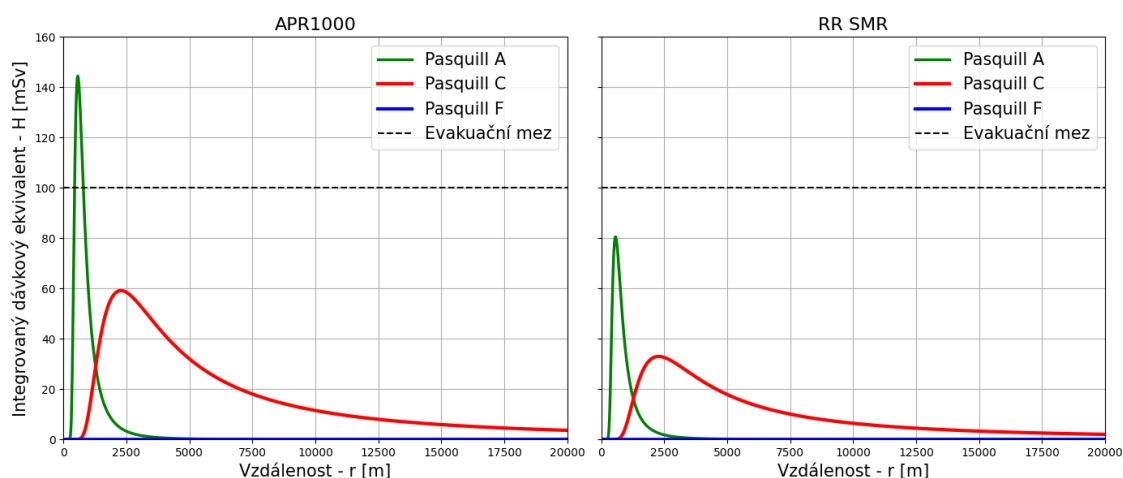
Obrázek 11: Porovnání dávkového příkonu pro reaktory **RR SMR** a **APR1000** při standardních podmínkách uvedených v Tabulce 7.

Z grafů jde vidět, že dávkový příkon v havarijním okruhu nepřevyšuje evakuační mez. V místech 20 km od místa havárie (hranice havarijního okruhu) po dobu 7 dní se při standardních podmínkách pohybuje na 3,61 mSv pro velký reaktor **APR1000** a 2,01 mSv pro **RR SMR**. Pro porovnání přirozené prostředí v **ČR** je 0,024 mSv, mezinárodní let z New Yorku do Tokia činí 0,17 mSv a CT sken hrudníku a pánve činí 10 mSv. Dvakrát nižší dávkový příkon odpovídá dvakrát menší aktivní zóně v reaktoru **SMR** naproti **APR1000**. Dalším důvodem nižšího dávkového příkonu je nižší počáteční aktivita (viz Tabulka 5), která je způsobena nižším počtem palivových souborů v menších reaktorech.

Díky modelu lze otestovat další důležité parametry, které vstupují do rovnic. Podle toho lze určit význam jednotlivých parametrů na prezentovaný model. Tento vliv bude zkoumán v následujících kapitolách.

5.2 Vliv různých Pasquillových tříd stability

Byly vybrány třídy A (silná turbulence), C (mírně nestabilní stabilita) a F (stabilní situace) z důvodu jejich výrazné odlišnosti, viz Tabulka 2.



Obrázek 12: Porovnání různých nestabilit počasí.

Z Obrázku 12 je zřejmé, že při silnějších turbulentcích *A* je dávkový příkon v nejbližších oblastech vyšší, toto chování souhlasí s hypotézou větrné bariéry, která drží radioaktivní mrak při zemi; viz Obrázek 6. Znamená to, že se v oblasti do dvou kilometrů od vypouštění radioaktivní mrak nemůže dostat do vyšších vrstev a větší míra dávkového příkonu zůstává při zemi. S rostoucí vzdáleností a časem se snižuje dávkový příkon. Při mírně nestabilních podmínkách *C* je nárůst dávkového příkonu zprvu vyšší, potom pozvolně klesá ve vzdálenosti. Při úplně stabilních podmínkách *F* se mrak stěží vůbec šíří v horizontální ose, naopak se rychle šíří po vertikální ose kvůli absenci jakéhokoliv faktoru, který by jej snášel dolů. Hodnoty dávkového příkonu v 20 km číselně jsou prezentovány v Tabulkách 8, 9.

Tabulka 8: Ekvivalentní dávka z ARP1000 podle Pasquillovy stability.

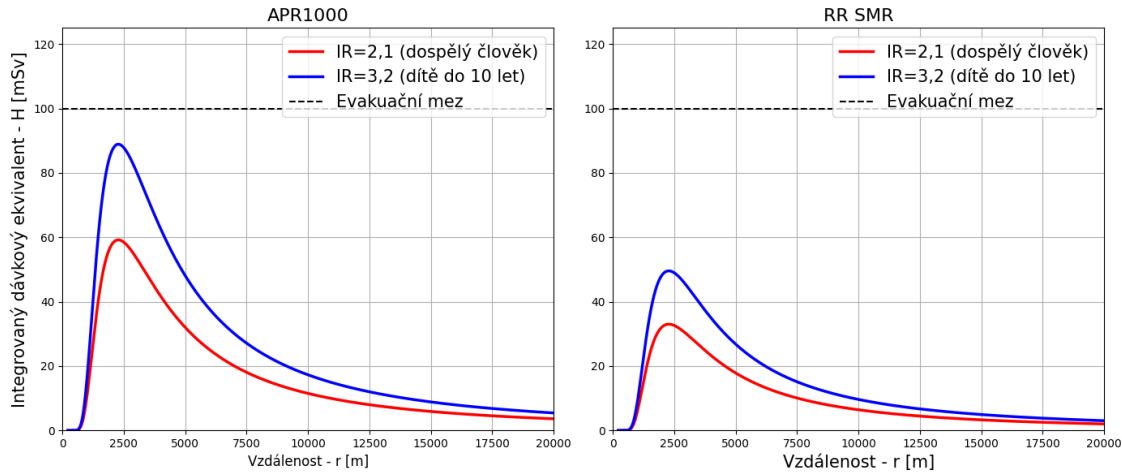
APR1000		
A	C	F
0,72 μSv	3,61 mSv	12,36 nSv

Tabulka 9: Ekvivalentní dávka z RR SMR podle Pasquillovy stability.

RR SMR		
A	C	F
0,40 μSv	2,01 mSv	6,89 nSv

5.3 Vliv pohlaví a věku osoby na hodnotu dávkového příkonu

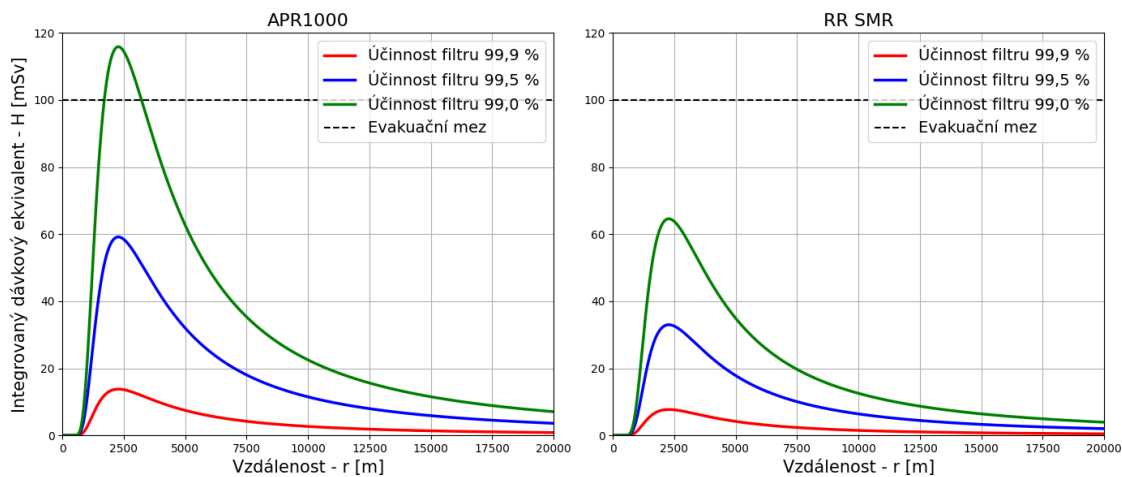
Dalším parametrem, který bude dávkový příkon upravovat, je objemová inhalace, viz Tabulka 6. Výsledky z Obrázku 13 ukazují, že pro děti do 10 let je šíření značně nebezpečnější. Proto se mladistvým do 18 ti let stanovuje legislativa nižší



Obrázek 13: Porovnání dávkového příkonu v závislosti na objemové inhalaci osob rozdělení dle věku. (viz Tabulka 6).

maximální dávky radiace. [47] Můžeme odvozovat, že jsou děti náchylnější k problémům způsobeným vlivem mimořádné radiační situace.

5.4 Vliv filtru na množství vypuštěných radionuklidů

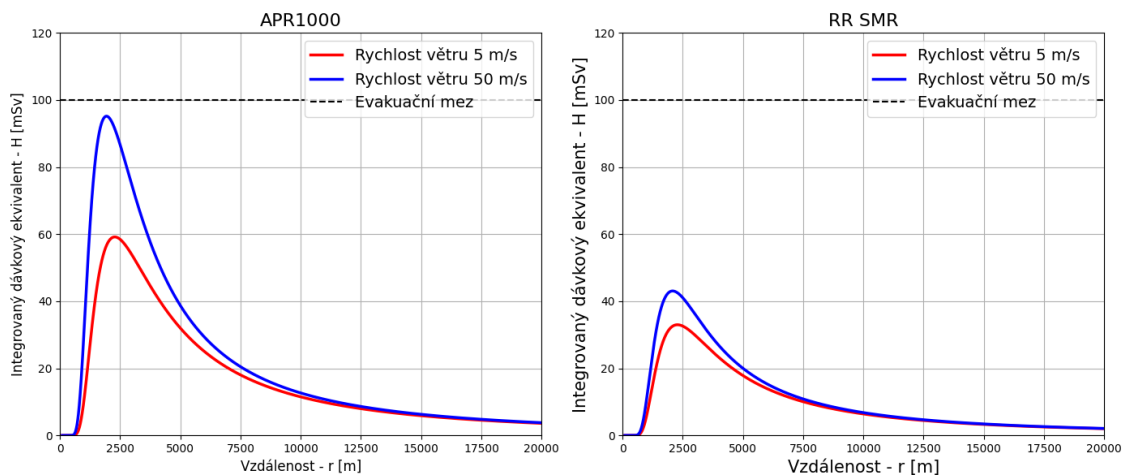


Obrázek 14: Porovnání dávkového příkonu při využití filtrů různých účinností.

Množství odfiltrovaných radionuklidů závisí na účinnosti filtru. Z Obrázku 14 je vidět, že účinnost filtru na zachycení plynných látek má významný vliv na množství jejich uvolnění a tedy i na množství ekvivalentní dávky obdržené člověkem. Kdyby filtry byly o 0,5 % méně účinné, vypuštěný dávkový příkon by byl několikanásobně vyšší. I přes nižší množství paliva v malém modulárním reaktoru dávkový příkon nabývá značně vysokých hodnot i v 5-ti kilometrech od místa samotné havárie. Při ještě horší, ale nepravděpodobnější situaci, kdy by filtr měl účinnost 99,0 %

ekvivalentní dávka z APR1000 by dosáhla v maximu přes 110 mSv, což přesahuje limit pro evakuaci v 2,5 km od místa havárie. Z toho vyplývá velký výrobní nárok na kvalitu filtrů; ty mají v dnešní době účinnost 99,99 %, o jeden řád více, než uvažujeme jako standardní podmínky. Jsou také vrstveny, aby se zaručila jejich správná funkce. [37]

5.5 Vliv rychlosti větru

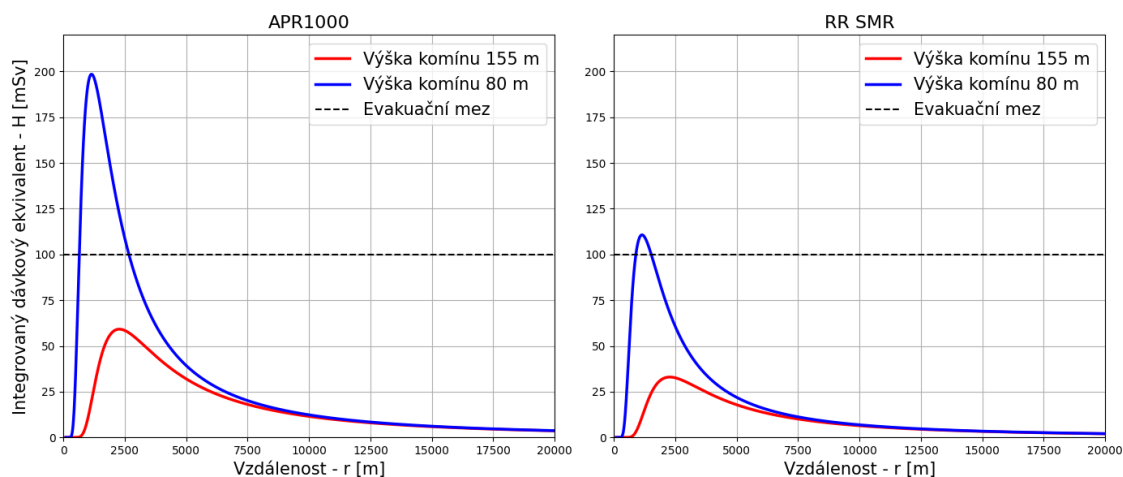


Obrázek 15: Míra dávkového příkonu při různých rychlostech větru.

V předchozích kapitolách byl viděn vliv rychlosti větru, který ovlivňoval šíření mraku. Z pozorování bylo usouzeno, že s vyšší rychlostí větru se zvýší jen dávkový příkon v prvotních kilometrech, tento jev by se dal vysvětlit tím, že při rozfoukání mraku se dostane rychleji k zemi a tam nechává většinu své aktivity. Tato hypotéza byla ještě otestována s hodnotou rychlosti větru $u = 50 \text{ ms}^{-1}$. To prokázalo, že rychlost větru zvyšuje dávkový příkon jen v oblastech blízko havárie.

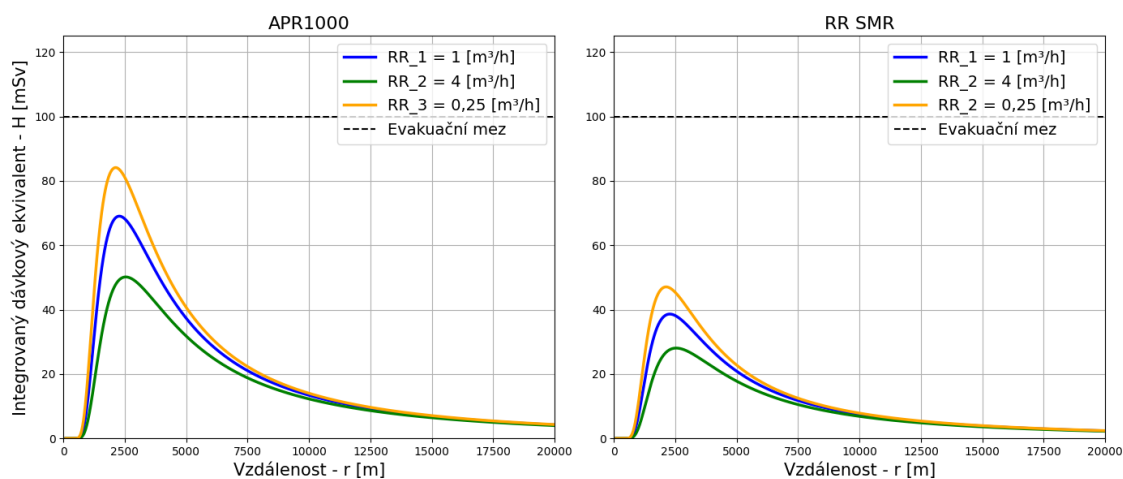
5.6 Vliv výšky komína

Dalším zajímavým parametrem je výška komína, která bývá u elektráren proměnná, neexistuje standard, jak vysoký jej postavít. Graf ukazuje, že po zkrácení komína by se unikající dávkový příkon do prostředí ztrojnásobil. Tento jev se projevil na obou reaktorech. Tohle zjištění bylo překvapující, byl očekáván nárůst dávkového příkonu z důvodu rychlejšího přístupu z mraku k zemi, avšak nebylo očekáváno, že to bude v takové míře. Při budování nových elektráren se musí brát tento fakt v potaz a komín by měl být dostatečně vysoký, aby mechanicky zabránil jednoduchému přístupu vypouštěných látek k povrchu země. Radioaktivní mrak poté nebude v takové míře ohrožovat bezprostřední okolí elektrárny.



Obrázek 16: Vliv výšky komína na míru dávkového příkonu.

5.7 Vliv objemové rychlosti vypouštění



Obrázek 17: Vliv rychlosti vypouštěných látek na dávkový příkon.

Při vyšší rychlosti vypouštění $RR(t)$ se podle rovnice (4) bude hodnota $\Delta h(r)$ narůstat s třetí odmocninou, mrak se dostává rychleji do vyšších vrstev atmosféry a méně interaguje se zemí. Naopak při pomalém vypouštění se mrak nedostává do vyšších poloh, ale zůstává spíše při zemi, kde zvyšuje hodnotu dávkového příkonu. Homogenní rozložení mraku má také za následek, že se uvolní vysoká koncentrace radionuklidů i v malém množství.

Závěr

V práci byly popsány rozdíly mezi velkými a malými reaktory s důrazem na reaktor APR1000 nabízený jihokorejskou společností KHNP na dostavbu Dukovan a malého modulárního reaktoru od společnosti Rolls-Royce s plánovanou výstavbou v Temelíně. Hlavním cílem práce byl popis a následná implementace rovnic popisujících šíření radioaktivního mraku prostředím. Model popisuje šíření radioaktivního mraku a umí určit dávkový příkon v určité vzdálenosti od místa šíření. Dalším cílem bylo porovnání dat a zjištění důležitých parametrů, které se podílejí na hodnotě dávkového příkonu. Získaná data z výpočtů byla porovnána, vyhodnocena a bylo zjištěno, že malé modulární reaktory mají skutečně nižší dávkový příkon. To je ovlivněno menším množstvím paliva v aktivní zóně, viz Tabulka 4. Citlivostní analýzou byly zjištěny nejvýznamnější parametry na šíření, kterými jsou výška komína, efektivita filtru a stabilita počasí, menší význam mají nestability počasí, rychlost větru a objemová inhalace.

Je důležité poznamenat, že uvažované situace jsou možné jen za těch nejhorších možných podmínek. Reaktory jsou inženýrsky navrženy, tak aby využily i jiných možných bezpečnostních prvků zabudovaných v havarijním plánu. Právě několika násobné vrstvy bezpečnostních a ochranných systémů dělají z jaderné elektrárny nenáchylnou k tak rozsáhlým haváriím. Proto má uvažovaná havárie prakticky zanedbatelnou, avšak nenulovou pravděpodobnost. V praxi se využívá daleko více komplexnějších modelů při řešení havárií.

V práci by se dalo pokračovat, rovnice použité v této práci se dají ještě doplnit, protože náš model pracoval s mnoha zjednodušeními. Podle Beychok, Milton. (2005). Fundamentals of Stack Gas Dispersion [26] se dá vztakový faktor měnit podle rychlosti unikání, kterou zde bylo uvažováno za konstantní. Další uvažovaný parametr, který byl brán v potaz, bylo rovnoměrné rozložení aktivity. V neposlední řadě bylo významné vybrání místa šíření, kvůli bezpečnosti se staví jaderné elektrárny spíše dál od velkých měst, tudíž je model situován ve venkovském prostředí bez fyzických překážek, což pomáhá přirozené cirkulaci. Model by mohl být komplexnější a uvažovat s více vnějšími i vnitřními vlivy.

Reference

1. RITCHIE, Hannah; ROSADO, Pablo. Nuclear Energy. *Our World in Data* [online]. 2020 [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>.
2. EVROPSKÁ KOMISE, Eurostat. *Celková spotřeba energie v průmyslu - podrobné statistiky* [online]. 2024. [cit. 2024-12-29]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics#Highlights.
3. UNIDO. *Průmyslová energetická účinnost a změna klimatu* [Dostupné z]. 2024. [cit. 2024-12-29]. Dostupné z: <https://www.unido.org/en/our-priorities/clean-energy-and-climate-action/industrial-energy-efficiency-and-climate-change>. [online].
4. BROUWER, Anne Sjoerd; VAN DEN BROEK, Machteld; SEEBREGTS, Ad; FAAIJ, André. Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 33, s. 443–466. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076>.
5. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Confronting the Duck Curve: How to Address Over-Generation of Solar Energy* [Online]. 2017. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/confronting-duck-curve-how-address-over-generation-solar-energy>.
6. ISLAM, M. R.; GABBAR, H. A. Study of small modular reactors in modern microgrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2014, vol. 25, no. 9, s. 1943–1951. Dostupné z DOI: [10.1002/etep.1945](https://doi.org/10.1002/etep.1945).
7. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Akademik Lomonosov 1* [online]. n.d. [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/AKADEMIK%20LOMONOSOV-1>.
8. EPET.CZ. *Těžba uhlí: Historie v ČR a ve světě* [online]. 2022. [cit. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/tezba-uhli-historie-v-cr-a-ve-svete/>.
9. UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. *Environmental Impacts of Hydroelectric Power* [online]. 2013. [cit. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-hydroelectric-power>.
10. HOPPECKE. *Wind energy and wind farms - dependent on the vagaries of the weather* [online]. 2023. [cit. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://www.hoppecke.com/en/stories/show/wind-energy-and-wind-farms-dependent-on-the-vagaries-of-the-weather/>.
11. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Economics of Nuclear Power* [online]. 2023. [cit. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power>.

12. FROIS, B. Advances in Nuclear Energy. *Nuclear Physics A*. 2005, vol. 752, s. 611–622. ISSN 0375-9474. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.064>. Proceedings of the 22nd International Nuclear Physics Conference (Part 2).
13. ENERDATA. *Small Modular Reactors: Advancing Nuclear Power Generation for a Sustainable Future* [online]. 2024. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/smr-world-trends.html>.
14. MAAE, Mezinárodní agentura pro atomovou energii. *Fórum regulátorů malých modulárních reaktorů*. n.d. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/smr-regulators-forum>. Webová stránka.
15. IAEA, International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)* [online]. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022 [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Booklet_2022.pdf.
16. MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMOVOU ENERGII. *Informační systém pokročilých reaktorů (ARIS)*. n.d. Dostupné také z: <https://aris.iaea.org>. Databáze.
17. SMR, Rolls-Royce. *Proč Rolls-Royce SMR* [online]. n.d. [cit. 2024-12-29]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce-smr.com/why-rolls-royce-smr>. Webová stránka.
18. ROLLS-ROYCE. *SMR Technical Summary* [online]. 2019-06. [cit. 2024-12-29]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20190608143016/https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/smr-technical-summary.pdf>. [PDF dokument].
19. MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMOVOU ENERGII. *Obrázek reaktoru* [online]. n.d. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/member/images/DSRsImages/746c9e11-2a2a-45ac-847a-9780c309507e.png>.
20. ČEZ, A. S. *Potenciální dodavatelé* [online]. ČEZ, a. s., n.d. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/nove-jaderne-zdroje/elektrarna-temelin-ii/potencialni-dodavatele>.
21. CORPORATION, Emirates Nuclear Energy. *Technology* [Online]. 2025. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://www.enec.gov.ae/barakah-plant/technology/>.
22. POWER TECHNOLOGY. *Barakah Nuclear Power Plant, Abu Dhabi* [online]. 2020-04. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://archive.ph/20211230010458/https://www.power-technology.com/projects/barakah-nuclear-power-plant-abu-dhabi/>.

23. OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Status Report on Filtered Containment Venting* [online]. 2014. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_19514/status-report-on-filtered-containment-venting?details=true.
24. ALL FOR POWER. *APR1000: Spolehlivá a osvědčená technologie nabízená KHNP pro Dukovany* [online]. All for Power, n.d. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/apr1000-spolehлива-a-osvedcena-technologie-nabizena-khnp-pro-dukovany-572>.
25. WALLENIIUS, Janne. *Radiological Impact* [Presentation]. 2023. Presented at KTH.
26. BEYCHOK, Milton. *Fundamentals of Stack Gas Dispersion* [online]. Milton R. Beychok, 2005 [cit. 2025-02-23]. ISBN 0-9644588-0-2. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/270049842_Fundamentals_of_Stack_Gas_Dispersion.
27. ANFOSSI, D. et al. Plume Rise. In: ZANNETTI, P. (ed.). *Air Quality Modeling - Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software* [online]. The EnviroComp Institute, 2003, vol. I - Fundamentals, chap. 6 [cit. 2025-01-26]. Dostupné z: <http://www.envirocomp.org/>. [online].
28. PEVAL. *Průměrná rychlost větru v ČR* [online]. 2012. [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: <http://www.draci.net/prumerna-rychlost-vetru-v-cr.a133.html>.
29. FAKTA O KLIMATU. *Průměrná roční teplota v ČR* [online]. 2023. [cit. 2025-02-19]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/teplota-cr>.
30. SVITÁK, Marek. *V chladičí věži Jaderné elektrárny Temelín vzniká unikátní klip* [Online]. 2022. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-chladici-vezi-jaderne-elektrarny-temelin-vznika-unikatni-klip-162487>. Mluvčí ČEZ, Jaderná elektrárna Temelín.
31. PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*. 1961, vol. 90, s. 33.
32. BENJEY, Mark. *Air Dispersion Models* [online]. n.d. [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://faculty.washington.edu/markbenj/CEE357/CEE%20357%20air%20dispersion%20models.pdf>.
33. GIFFORD, F A. Turbulent diffusion-typing schemes: a review. *Nucl. Saf.*, v. 17, no. 1, pp. 68-86. 1976. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/biblio/4077847>.
34. LEPPÄNEN, Jaakko; PUSA, Maria; VIITANEN, Tuomas; VALTAVIRTA, Ville; KALTIAISENAHO, Toni. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2015. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.

35. TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY (TEPCO). *Regarding the Estimation of Radiation Dose from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident* [Press Release]. Tokyo Electric Power Company (TEPCO), 2012 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: https://www4.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu12_e/images/120620e0104.pdf.
36. HENDERSON, Barron H.; JEFFRIES, Harvey E.; KIM, Byeong-Uk; VIZUETE, William G. The Influence of Model Resolution on Ozone in Industrial Volatile Organic Compound Plumes. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2010, vol. 60, no. 9, s. 1105–1117. Dostupné z DOI: [10.3155/1047-3289.60.9.1105](https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.9.1105).
37. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60* [Online]. 2012. [cit. 2025-02-25]. Tech. zpr., ICRP Publication 119. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Dostupné z: [https://www.icrp.org/docs/p%20119%20jaicrp%2041\(s\)%20compendium%20of%20dose%20coefficients%20based%20on%20icrp%20publication%2060.pdf](https://www.icrp.org/docs/p%20119%20jaicrp%2041(s)%20compendium%20of%20dose%20coefficients%20based%20on%20icrp%20publication%2060.pdf).
38. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Exposure factors handbook: 2011 edition* [online]. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, 2011 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-chapter06.pdf>.
39. ČESKO. § 107 odst. 1 písm. c) vyhlášky č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje - znění od 1. 1. 2021 [Online]. 2021. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422#p107-1-c>. In: *Zákony pro lidi.cz*. © AION CS 2010–2025.
40. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Programming Language* [Online]. 2025. [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.python.org/>.
41. PRAMANICK, Sohom. *History of Python* [Online]. GeeksforGeeks, 2025 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/history-of-python/>.
42. IONOS EDITORIAL TEAM. *Python vs. C: A Comparison of Programming Languages* [Online]. IONOS Digital Guide, 2023 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.ionos.com/digitalguide/websites/web-development/python-vs-c/>.
43. HARRIS, Charles R. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020, vol. 585, no. 7825, s. 357–362. Dostupné z DOI: [10.1038/s41586-020-2649-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2).
44. VIRTANEN, Pauli et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*. 2020, vol. 17, s. 261–272. Dostupné z DOI: [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2).
45. HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*. 2007, vol. 9, no. 3, s. 90–95. Dostupné z DOI: [10.1109/MCSE.2007.55](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55).

46. HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR ČESKÉ REPUBLIKY. *Vnější havarijní plány* [Online]. 2025. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://hzscr.gov.cz/clanek/vnejsi-havarijni-plany-vnejsi-havarijni-plany.aspx>. Hasičský záchranný sbor České republiky.
47. ČESKO. § 64 odst. 1 písm. a) zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon - znění od 1. 1. 2024 [Online]. 2024. [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263#p64-1-a>. In: *Zákony pro lidi.cz*. © AION CS 2010–2025.

Seznam použitých zkratek

ČEZ	České energetické závody
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
KHNP	Korean Hydro and Nuclear Power Company - Korejská a jaderná energetická společnost
FCVS	Systém filtrovaného odvětrání kontejnmentu
IVR	In-vessel retention - Udržení taveniny v tlakové nádobě
PGA	Peak ground acceleration - Maximální zrychlení na povrchu
PECS	Passive Ex-vessel Corium Retaining and Cooling System - Pasivní systém zadržení a chlazení koria mimo nádobu reaktoru
RR	Rolls-Royce
SMR	Small Modular Reactor - Malý modulární reaktor
SOČ	Středoškolská odborná činnost
VOC	Volatile Organic Compound - Těkavá organická sloučenina
JE	Jaderná elektrárna
IAEA	International Atomic Energy Agency - Mezinárodní agentura pro atomovou energii
APR	Advanced power reactor - Pokročilý energetický reaktor

Seznam použitých veličin

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
$\Delta h(r)$	Výška mraku nad zemí	m
u	Rychlost větru	ms^{-1}
r	Kolmá vzdálenost od paty komína	m
F_b	Vztlakový faktor	m^4s^{-3}
g	Gravitační zrychlení	ms^{-2}
T_s	Vnitřní teplota plynů v komínu	K
T_a	Vnější teplota atmosféry	K
S	Příčný průřez komína	m^2
w_{out}	Rychlost vypouštění radionuklidů	s^{-1}
$RR(t)$	Funkce popisující objemovou rychlost vypouštění	m^3s^{-1}
$H(r)$	Celková výška radioaktivního mraku od země	m
h_0	Výška komína	m
$\sigma(r)$	Rozptyl radioaktivního mraku	m
a, b, c	Koeficienty Pasquillových tříd stability	-
$A(t)$	Aktivita radionuklidů	Bq
A_0	Počáteční aktivita	Bq
Σ	Součet všech prvků	-
λ	Rozpadová konstanta	s^{-1}
$T_{1/2}$	Poločas rozpadu nuklidu	s, h, d, r
$C(t)$	Koncentrace radionuklidů v mraku na jednotku dráhy	Bqm^{-1}
t_{full}	Celkový čas uvolňování radionuklidů	s, h
$H^{\text{P}}(t)$	Plošný ekvivalentní dávkový příkon	$\text{Sv h}^{-1}\text{m}^2$
$H_{\text{vol.}}^{\text{P}}(t)$	Plošný ekvivalentní dávkový příkon od těkavých látek	$\text{Sv h}^{-1}\text{m}^2$
$H_{\text{nob.}}^{\text{P}}(t)$	Plošný ekvivalentní dávkový příkon od vzácných plynů	$\text{Sv h}^{-1}\text{m}^2$
$H(t)$	Ekvivalentní dávka	Sv
ε^i	Dávkový koeficient pro i -tý radionuklid	nSvBq^{-1}
F	Účinnost filtru	%, -
IR	Objemová míra inhalace	m^3h^{-1}
$\text{gauss}_z(H(r), \sigma_z)$	Gaussovo rozdělení ve vertikální rovině	-
$\text{gauss}_y(0, \sigma_y)$	Gaussovo rozdělení v horizontální rovině	-
$\alpha(r, \sigma_z, \sigma_y)$	Funkce popisující část mraku ve střtu se zemí	-

Seznam obrázků

1	Denní energetická zátěž	9
2	Počet nových designů SMR (2022)	11
3	Schéma primárního okruhu RR SMR	13
4	Schéma elektrárny s reaktorem s APR1000	15
5	Počáteční uvažované parametry	16
6	Vertikální výška mraku pro různé rychlosti větru	18
7	Vertikální výška mraku pro různé teploty atmosféry	18
8	Vizualizace uvažovaného šíření mraku	20
9	Rozptyl mraku v závislosti na vzdálenosti	21
10	Průběh dávkového ekvivalentu v závislosti na čase a prostoru	26
11	Porovnání dávkového příkonu při standartních podmínkách	27
12	Porovnání různých Pasquillových stabilit.	28
13	Porovnání dávkového příkonu v závislosti na osobě	29
14	Porovnání filtrů různých účinností	29
15	Míra dávkového příkonu při různých rychlostech větru	30
16	Vliv výšky komína na dávkový příkon	31
17	Vliv vypouštěných látek na dávkový příkon	31

Seznam tabulek

1	Rozdělení Pasquillových tříd stability podle tepelného gradientu	19
2	Klasifikace stability atmosféry podle rychlosti větru	20
3	Koeficienty Pasquillových tříd stability	21
4	Uvažované průměrné vyhoření a hmotnost paliva	22
5	Relevantní radionuklidy	23
6	Objemová inhalace podle pohlaví a věku	23
7	Souhrn uvažovaných parametrů a jejich hodnoty	26
8	Ekvivalentní dávka z ARP1000 podle Pasquillovy stability	28
9	Ekvivalentní dávka z RR SMR podle Pasquillovy stability	28