



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomie, manažerství a humanitních věd

Uplatnění jaderné energetiky na trhu s elektrickou energií

Utilization of Nuclear Power Plants on Electricity Markets

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Marek Adamec

Vítězslav Štván

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Štván** Vítězslav

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Uplatnění jaderné energetiky na trhu s elektrickou energií

Pokyny pro vypracování:

1. Třetí, třetí plus a čtvrtá generace jaderných zdrojů
2. Zátěžové testy jaderných elektráren v reakci na havárii ve Fukušimě
3. Specifika výroby elektřiny v současných jaderných zdrojích
4. Tržní uplatnění elektřiny vyráběné v současných jaderných zdrojích, Contract for Difference

Seznam odborné literatury:

1. Doležal J. a kol.: Jaderné a klasické elektrárny. ČVUT, 2011.
2. Burcl T.: Analýza vlivů dostavby JETE a jejich zhodnocení ve vazbě na cenu energie a trh v Evropě a České republice - diplomová práce. VŠE, 2000.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Adamec, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

Doc. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce, panu Ing. Marku Adamcovi za jeho vzácný čas, vstřícný přístup, věcné připomínky a cenné rady.

Zároveň děkuji své rodině za podporu při tvorbě této práce a celém studiu.

Abstrakt

Obsahem této práce je širší pohlednutí na současnost a budoucnost odvětví jaderné energetiky. V první části popisují třetí, třetí plus a čtvrtou generaci jaderných zdrojů, tedy reaktory, které znamenají budoucnost.

Druhá část se skládá z popisu stress testů, které se v Evropské unii udály po jaderné havárii v japonské elektrárně Fukušima I., a které značně ovlivnily celkový pohled investorů, politiků i veřejnosti na celé jaderné odvětví.

Ve třetí části vyjmenovávám, popisuji a rozebírám jednotlivá specifika spojená s celkovým životem takové jaderné elektrárny.

A v poslední praktické části popisuji a užívám mnou sestavený model pro výpočet hotovostních toků projektu jaderné elektrárny, NPV tohoto projektu a potřebnou výši a délku trvání podpory mechanismem Contract for Difference.

Abstract

Content of my Bachelor's thesis is a view on present and future of nuclear energy. In the first part I focus on third, third plus and forth generation of nuclear sources, therefore reactors, which represent future of nuclear energy.

The second part consists of description of stress tests, which were in European Union transpired after disaster in Japan in power-station Fukushima 1., and which have changed perspective of the investors, politicians and general public onto the whole nuclear branch.

In third part I list, describe and analyze each specific linked to lifetime of nuclear power-station.

And in the last practical part I describe and apply model created by myself for calculating cash flow in nuclear power-plant project, NPV of this project and needed price and duration of support by Contract-for-Difference mechanism.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, stress testy, tržní uplatnění, Contract for Difference

Key words

Nuclear power plant, stress tests, market utilization, Contract for Difference

Obsah

0. Úvod.....	8
1. Třetí, třetí plus a čtvrté generace jaderných zdrojů	10
1.1. Generace v jaderné energetice	10
1.2. Třetí generace jaderných zdrojů.....	11
1.2.1. Příklady reaktorů třetí generace.....	12
1.3. Třetí plus generace jaderných zdrojů	15
1.3.1. Příklady reaktorů třetí plus generace	16
1.3.2. Malé stavebnicové reaktory	18
1.4. Čtvrtá generace jaderných zdrojů	20
1.4.1. Hlavní cíle a nároky na budoucí reaktory IV:	21
1.4.2. Konkrétní reaktory generace IV:.....	21
2. Zátěžové testy jaderných elektráren v reakci na havárii ve Fukušimě.....	24
2.1. Jaderná havárie v elektrárně Fukušima I	24
2.2. Zátěžové testy	27
2.3. Zátěžové testy v České republice.....	28
3. Specifika výroby elektřiny v současných jaderných zdrojích	30
3.1. Princip	30
3.2. Palivo.....	31
3.3. Odstávky.....	32
3.4. (Ne)regulovatelnost výkonu jaderné elektrárny.....	33
3.5. Bezpečnost	34
3.6. Vysoké investiční náklady.....	37
4. Tržní uplatnění elektřiny vyráběné v současných jaderných zdrojích, Contract for Difference	38
4.1. Čistá současná hodnota.....	38
4.2. Contract for Difference.....	39
4.3. Vstupní data a předpoklady pro výpočet NPV a CfD.....	41
4.3.1. Inflace.....	41
4.3.2. Diskont	41
4.3.3. Výkon.....	41
4.3.4. Cena projektu	42
4.3.5. O&M.....	42
4.3.6. Doba využití.....	42

4.3.7.	Cena paliva	42
4.3.8.	Odvod na jaderný účet	42
4.3.9.	Cena elektřiny na burze	43
4.3.10.	Výše a doba trvání CfD.....	43
4.3.11.	Náklady na likvidaci	43
4.3.12.	Osobní náklady	43
4.3.13.	Ostatní	43
4.4.	NPV nového jaderného zdroje na území ČR	45
4.4.1.	Postup výpočtu	45
4.4.2.	Výsledné NPV a zhodnocení výsledku	46
4.5.	Contract for Difference pro nový jaderný zdroj na území ČR	46
5.	Závěr	48
	Seznam použité literatury	50
	Seznam použitých obrázků.....	51
	Seznam tabulek.....	52
	Seznam příloh	52
	Přílohy	53

0. Úvod

V dnešní době se evropská, potažmo i česká energetika nachází na rozcestí. Jakým směrem se vydá, bude rozhodnutí zásadní a bude nás provázet minimálně několik dekád. Jednou z možných cest je jít po cestě jaderné energetiky. Jádru se nám nabízí na řešení hned několika problémů, které by nás v budoucnu mohli potkat a pomůže nám je překonat. Oproti OZE vyniká svým stabilním provozem. Jaderná elektrárna je, co se skleníkových plynů týče, prakticky bezemisní zdroj a tím převyšuje například elektrárny uhelné. Plocha zasažená těžbou je výrazně nižší a koncentrace energie v palivu výrazně větší. Také zásoby uranu nám vystačí ještě minimálně na 85 let a při stavbě nových reaktorů a při vhodné recyklaci použitého paliva dokonce až na 2,5 tisíce let. Avšak doba 85 let v jaderném odvětví je velmi krátká, a pokud si chceme při současném stavu, kdy nás čeká uzavírání dosluhujících uhelných i jaderných elektráren, zajistit energetickou bezpečnost, tak si musíme pospíšet.

Proto se v první části svojí práce budu zabývat reaktory, které jsou takřikajíc aktuální nebo aktuální budou. Jedná se o reaktory III., III.+ a IV. generace. Jsou to reaktory, které by právě měly zařídit naši budoucí energetickou bezpečnost, ať již z pohledu dostatku energie, tak i z pohledu bezpečnosti provozu jaderných elektráren a předcházení jaderným haváriím.

V druhé části práce se podívám na důsledky pro provozovatele jaderných elektráren v Evropské unii po jaderné havárii nejvyššího stupně, která se udála v roce 2011 v japonské jaderné elektrárně Fukušima I. Jelikož odvětví jaderné energetiky je v posledních letech záležitostí spíše politickou, způsobila tato havárie obzvláště veliké důsledky celosvětového charakteru. Všechny jaderné elektrárny na území členských států Evropské unie měly za povinnost provést na svých zařízeních zátěžové testy – tzv. stress testy.

Další část mé práce se bude věnovat specifikům výroby elektřiny v současných jaderných zdrojích. Provoz jaderných elektráren se v mnoha ohledech odlišuje od provozu ostatních elektráren. A nejedná se pouze o provoz, nýbrž o celý život elektrárny od samotné výstavby až po likvidaci již definitivně odstavené elektrárny. Já ve své práci tuto vypíšu a rozeberu. Některá z těchto specifik jsou jedinečná pouze pro současné zdroje, zatímco jiná provází a budou provázet všechny generace jaderných elektráren.

V poslední praktické části mé práce vytvořím v tabulkovém kalkulátoru model hotovostních toků výstavby a provozu jaderné elektrárny na základě volně dostupných dat. Z tohoto modelu určím, zda by se v dnešní době při současných technologiích vyplatila výstavba nového jaderného zdroje tak, že zjistím čistou současnou hodnotu takovéto investice (NPV). Jelikož

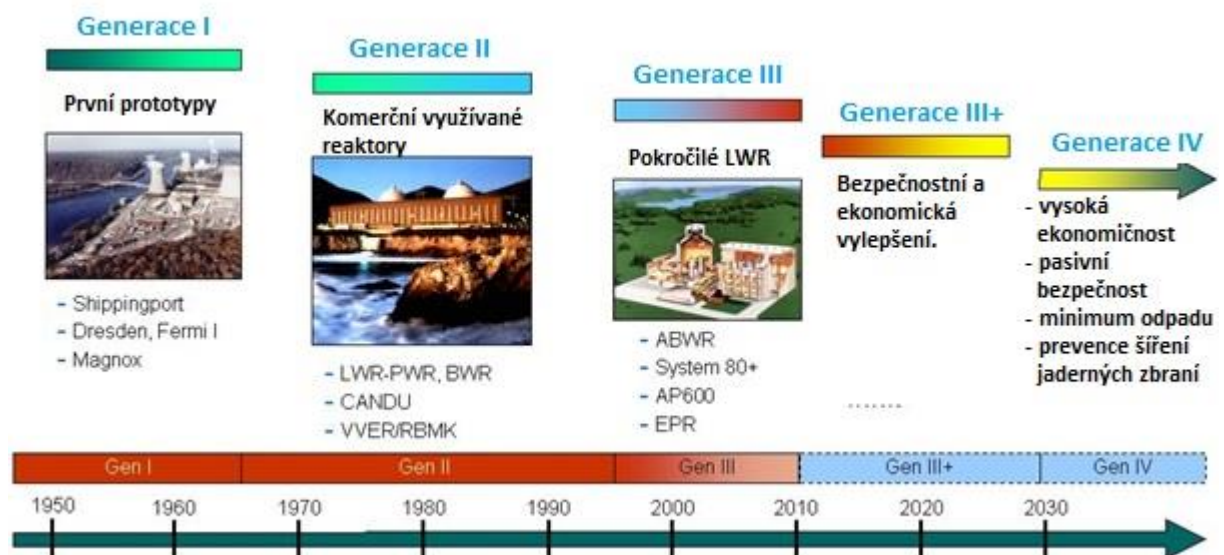
předpokládám, že NPV mnou uvažovaného projektu vyjde záporné, a pokud tomu tak opravdu bude, zaměřím se na podpůrný mechanismus Contract for Difference (CfD) a určím potřebnou výši, na jakou by musel být kontrakt uzavřen.

Tabulkový model bude přiložen k této bakalářské práci.

1. Třetí, třetí plus a čtvrté generace jaderných zdrojů

1.1. Generace v jaderné energetice

Jedním z možných přístupů k dělení jaderných reaktorů je jejich rozdělení dle historického hlediska. Jaderné elektrárny zde rozlišujeme podle čtyř (pěti) generací. Názvosloví pro toto dělení bylo prvně oficiálně zveřejněno Ministerstvem energetiky Spojených států amerických (United States Department of Energy, US DOE) při příležitosti představení reaktorů Generace IV v roce 2001.



Obrázek 1-1 Vývoj jaderných reaktorů (upraveno) [18]

- **Generace I:** Tyto jaderné reaktory se stavěly převážně v 50. a 60. letech jako kusové prototypy převážně za účelem zjištění budoucí použitelnosti jaderných zdrojů pro zajištění elektrické energie. Poslední reaktor typu Magnox v elektrárně Wylfa [19] ve Velké Británii o výkonu 490 MW_e je stále v provozu a plánuje se definitivně odstavit k 30. 9. 2014 s možností prodloužení do prosince 2015.
- **Generace II:** Druhá generace vychází z poznatků při provozu reaktorů první generace. Jejich výstavba začínala v 70. a 80. letech. Jedná se také převážně o kusové reaktory, avšak jednotlivé projekty na sebe navazují a postupně se vyvíjejí. Mezi tyto reaktory patří naprostá většina dnes ve světě používaných jaderných reaktorů, včetně reaktorů VVER-440 a VVER-1000 používaných v českých jaderných elektrárnách a reaktor RBMK použitý v jaderné elektrárně Černobyl.
- **Generace III:** Vychází z poznatků získaných při mnohaletém provozu reaktorů generace II, které rozvíjí o řadu revolučních prvků z hlediska bezpečnostního i ekonomického.

První reaktor třetí generace byl v japonské elektrárně Kashiwazaki-Kariwa uveden do provozu v roce 1996 [20] s výkonem 1315MW_e. O této generaci více v kapitole 1.2.

- **Generace III+:** Přináší další vylepšení, jak z hlediska bezpečnostního, tak z hlediska ekonomického. První elektrárnou v EU s reaktorem generace III+ měla být finská elektrárna Olkiluoto s plánovaným termínem dokončení v roce 2009, avšak přes mnoho různých zdržení nebude dokončena ani v roce 2014 [4]. O této generaci více v kapitole 1.3.
- **Generace IV:** S výstavbou jaderných reaktorů nové generace se nepočítá před rokem 2030. Otázkami ohledně čtvrté generace se zabývá Mezinárodní fórum pro generaci IV (Generation IV International Forum, GIF). U čtvrté generace se kromě bezpečnosti a ekonomičnosti klade důraz i na ekologičnost, zejména na co nejvyšší stupeň vyhoření paliva. O této generaci více v kapitole 1.4.

1.2. Třetí generace jaderných zdrojů

Jaderné reaktory třetí generace se dají přehledně charakterizovat v několika bodech

- **Vyšší míra bezpečnosti** je na prvním místě. V nových projektech jsou již běžné prvky pasivní bezpečnosti, tedy dochlazování odstaveného reaktoru bez nutnosti dodávky elektrické energie na základně fyzikálních zákonů po dobu (obvykle 48 nebo 72 hodin) než bude zajištěn zdroj pro havarijní dochlazování.
- **Standardizovaný projekt** pro každý typ reaktoru usnadní povolování staveb a licencování elektráren, dále podstatně sníží náklady na vybudování a v neposlední řadě by měl přispět k urychlení samotné výstavby.
- **Jednodušší provedení**, které přispěje k jednoduššímu ovládání a bude méně náchylné k provozním haváriím.
- **Delší životnost**, která bude až 60 let s teoretickou možností prodloužení až na 80+ let.
- **Vyšší odolnost proti vážnému poškození** s následným únikem radioaktivních látek do životního prostředí (např. teroristický útok nebo pád letadla)
- **Vyšší vyhoření paliva** a tudíž menší produkce radioaktivních odpadů.

Další velikou výhodou těchto reaktorů je, že spotřebují přibližně o 17% méně [6] uranu na vyrobenou jednotku elektrické energie (pro reaktor EPR), čímž také přirozeně snižují náklady na provoz. Frekvence poškození aktivní zóny pro reaktory Generace III je podstatně nižší než pro reaktory Generace II – 60 poškození na jednu miliardu reaktorů za rok pro EPR a dokonce pouze 10 poškození na miliardu reaktorů za rok pro reaktor ESBWR oproti pravděpodobnosti 10 tisíc poškození na jednu miliardu reaktorů za rok pro BWR/4 z generace II. [7] Reaktory také

obsahují řadu pasivních bezpečnostních prvků, které jsou v případě rizika schopny odstavit reaktor bez vnějšího zásahu operátora. Očekává se až 110 nových reaktorů generace III a III+ do roku 2020. [8]

1.2.1. Příklady reaktorů třetí generace

- **ACPR1000+**

Reaktor ACPR1000 byl projekt CGNPG (China General Nuclear Power Group) na vylepšení tehdejších čínských tlakových lehkovodních reaktorů CPR-1000. Se záměrem konstruování těchto nových reaktorů přišla CGNPG v roce 2010 s předpokládaným exportem v roce 2013. V reakci na havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima byl popsán nový projekt ACPR1000+. Bezpečnostní prvky zahrnují dvojitý kontejnment, zvýšenou odolnost proti vnější explozi a pádu letadla, zvýšení seismické odolnosti a vylepšené operační systémy. Výkon tohoto reaktoru má být 1150 MW_e a jeho export se očekává během roku 2014. Princip reaktoru je stejný jako u ostatních tlakovodních reaktorů. Doba kampaně reaktoru bude 18 měsíců a plánovaná doba životnosti je 60 let.

- **Advanced Pressurized Water Reactor (APWR)**

Tlakovodní reaktor APWR o výkonu 1500 MW_e moderovaný i chlazený obyčejnou vodou vychází ze svého předchůdce reaktoru PWR, který je nejrozšířenějším používaným jaderným reaktorem ve světě. Oproti němu ovšem disponuje několika konstrukčními vylepšeními, která ho řadí do generace III jaderných zdrojů. Je vybaven ocelovým reflektorem neutronů, který zvyšuje reaktivitu a snižuje potřebu obohacení paliva o U-235 až o 0,1%. Dalším vylepšením je účinnější parogenerátor s větší efektivností předávání tepla. Samozřejmostí jsou i vylepšené bezpečnostní systémy, které jsou kombinací pasivních i aktivních prvků.

Princip těchto reaktorů je stejný jako u všech lehkovodních tlakových reaktorů. Primární voda protéká aktivní zónou, kde se zvýší její teplota i tlak, avšak nepřemění se v páru. Tato voda předá v parogenerátoru svou energii vodě sekundárního okruhu, která se již v páru přemění a proudí na turbínu, kterou pohání. Za turbínou předá odpadní energii vodě terciálního okruhu, která se odpadního tepla zbaví v chladicích věžích.

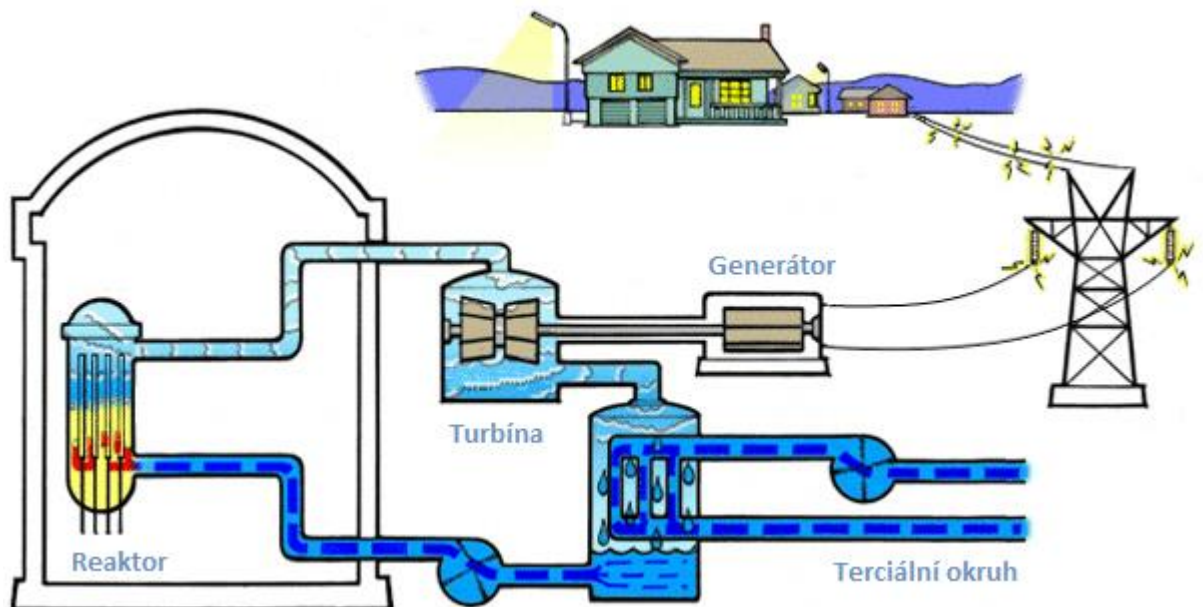
Reaktory APWR získaly licenci v Japonsku (dokonce započala výstavba, ale v roce 2011 byla ukončena) i USA, ale jejich výstavba v současné době neprobíhá nikde.

- **Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)**

Varné reaktory moderované i chlazené lehkou vodou (BWR) o výkonu vyšším než 1300 MW_e jsou druhým nejrozšířenějším typem reaktorů používaným ve světě. ABWR reaktory jsou jednookruhové. Technická voda důležitá protéká přímo přes aktivní zónu, kde se přeměňuje v páru. Tato pára proudí přes separátor, kde je zbavena veškerých kapiček kapalné vody přímo na turbínu, které předává svou energii. Následně tato nízkoenergetická pára proudí do tepelného výměníku, kde zkondenzuje a předá zbylé teplo vodě chladicího okruhu. Za výměníkem je hlavní cirkulační čerpadlo, které čerpá vodu do aktivní zóny reaktoru a celý proces začíná znovu. Koncept těchto reaktorů v elektrárně Kashiwazaki-Kariwa ukázal svou vysokou bezpečnost během zemětřesení v roce 2007, kdy se oba reaktory bezpečně vypnuly a nedošlo k jejich poškození a to i přes fakt, že intenzita zemětřesení byla větší, než na kterou byla elektrárna projektována.

Nevýhodou těchto reaktorů je samozřejmě fakt, že radioaktivní voda protéká přímo turbínou, což výrazně komplikuje například opravy a veškeré práce na turbíně, i v tepelném výměníku. Reaktory ABWR provozované ve světě v roce 2012 dosahovaly dostupnosti maximálně 72% (28% času od uvedení do provozu neprodukovaly elektrickou energii) [25] a i přesto získaly licenci v USA, Japonsku a na Taiwanu, která značně urychlí schválení a udělení povolení při výstavbě nových reaktorů tohoto typu. V roce 2013 společnost GE požádala o udělení licence také ve Velké Británii.

Všechny jednotky ABWR ve světě se budují nebo již pracují pouze v USA, Japonsku a na Taiwanu.

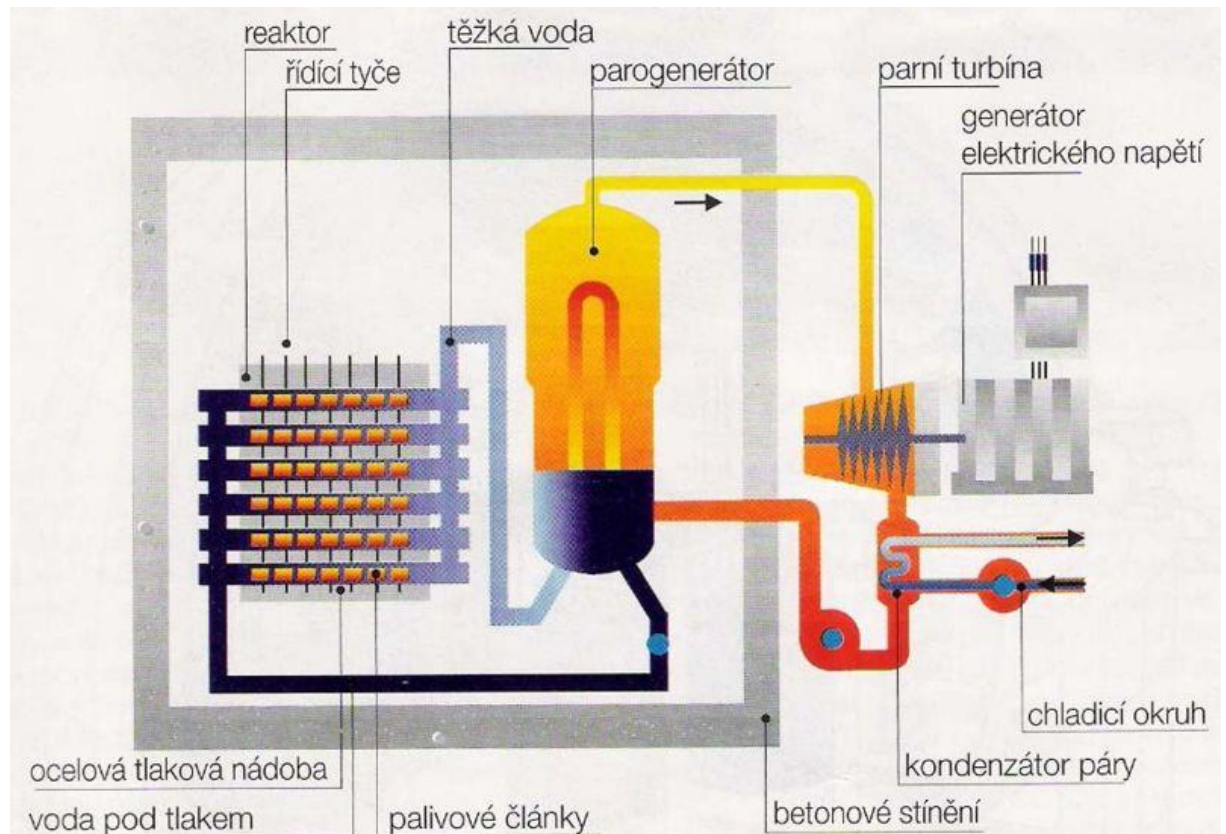


Obrázek 1-2 Schéma elektrárny s reaktorem ABWR (upraveno) [22]

- **Enhanced CANDU 6 (EC6)**

Rozšířený reaktor CANDU 6 (Canada Deuterium Uranium) o výkonu 700 MW_e je nástupce úspěšného reaktoru CANDU 6, který je úspěšně provozován v jižní Asii, Argentině a Rumunsku. Tento tlakovodní reaktor je moderovaný i chlazený těžkou vodou, což společně s konstrukcí CANDU 6 umožňuje jako palivo používat přírodní uran bez nutnosti obohacení. To má za následek mnohem menší závislost provozovatele na okolních státech, přispívá k energetické soběstačnosti země a produkce paliva je velmi snadno proveditelná lokálně. Relativně nízký výkon reaktoru taktéž umožňuje použití pro menší až střední energetické sítě. Princip reaktoru je podobný jako u reaktorů PWR a VVER. Těžká voda v primárním okruhu protéká aktivní zónou a následně v parogenerátoru předává svou tepelnou energii lehké vodě v sekundárním okruhu, která pohání turbínu a zbytkové teplo předává vodě v terciálním okruhu. Chladicí okruh je zde velmi důležitý, neboť těžká voda se zvyšující se teplotou ztrácí své moderační schopnosti.

Reaktor je vybaven dvěma nezávislými systémy pro bezpečné vypnutí a umožňuje základní údržbu za provozu, včetně doplňování paliva. Jakousi daní za tyto výhody však je větší spotřeba paliva.



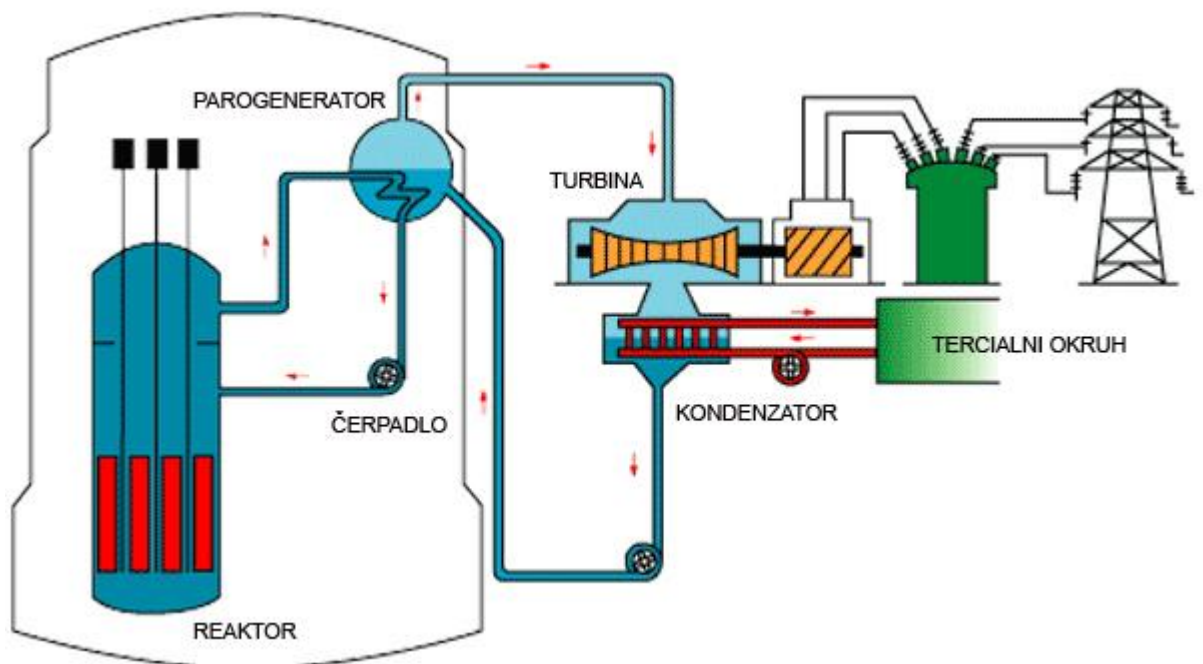
Obrázek 1-3 Schéma elektrárny s reaktorem CANDU [18]

- **VVER-1000/392 (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor)**

Vychází z mnohaletých zkušeností a nabyté praxe při výstavbě a provozu reaktorů VVER, které se například používají i v Jaderné Elektrárně Dukovany (VVER 440/213) a v Jaderné Elektrárně Temelín (VVER-1000/320). Tento pokročilý reaktor VVER-1000 disponuje vylepšeným parogenerátorem, zdokonaleným hlavním cirkulačním čerpadlem s lepším těsněním, pasivním systémem odvodu tepla a rychlým pasivním vstřikováním kyseliny borité v případě poruchy. Je konstruován na bezpečný provoz do zemětřesení o magnitudě 7, bezpečné vypnutí v případě zemětřesení do magnitudy 8 stupnice MSK 64 a ani pád letadla nezpůsobí riziko jaderné havárie.

Základní princip reaktoru se neliší od dnes provozovaných reaktorů typu VVER.

Elektrárny s tímto reaktorem jsou ve výstavbě v Indii, Číně a plánují se i v Bulharsku.



Obrázek 1-4 Schéma elektrárny s reaktorem VVER [22]

1.3. Třetí plus generace jaderných zdrojů

Generace III+ je velmi úzce propojena s generací III a oficiálně není pevně určená hranice říkající, odkud již reaktory spadají do generace III+. Obecně se uznává, že novější generace má propracovanější pasivní bezpečnostní systém, který je schopen samostatně bez vnějšího zásahu operátora bezpečně odstavit blok v případě ohrožení bezpečnosti a to pouze za pomoci přírodních fyzikálních jevů jako je přirozená cirkulace, gravitace a konvekce.

Tyto reaktory se již ve světě (i v Evropě) staví a zkušenosti a certifikace při realizaci projektů s reaktory generace III+ by mohly usnadnit následné použití těchto reaktorů při plánované dostavbě Jaderné Elektrárny Temelín i pátého bloku v Jaderné Elektrárně Dukovany. Jelikož

probíhají skutečně první výstavby této generace vůbec, doprovází stavby časté problémy. Jedním z problémů je sehnat dodavatelské firmy. Jelikož v posledních letech v západním světě stavba nových jaderných elektráren spíše stagnovala, je problémem sehnat včas dostatečné množství kvalifikované pracovní síly a společností schopných dodat požadovanou technologii (např. kvalitní beton). Tento fakt se viditelně projevil na výstavbě nového bloku ve finské elektrárně Olkiluoto, kde je již teď jisté, že se stavba protáhne minimálně o 6 let.

1.3.1. Příklady reaktorů třetí plus generace

- **Advanced CANDU Reactor (ACR-1000)**

Tlakový reaktor moderovaný těžkou vodou a chlazený lehkou vodou využívající výhod a poznatků od reaktorů CANDU a APWR. Mezi jeho výhody patří, že bezpečnostní i regulační prvky se nacházejí v nízkotlakém moderátoru (těžká voda). Reaktoru k chodu stačí nízkoobohacený uran a jeho doplňování je možné za provozu bez nutnosti odstávky.

Reaktor ACR-1000 disponuje celou řadou bezpečnostních systémů. Systém pro bezpečné vypnutí 1 (Safety Shutdown System 1 - SDS1) se skládá z regulačních tyčí umístěných přímo nad aktivní zónou. Tyče jsou drženy pomocí tří logických obvodů, a pokud dojde k aktivaci dvou okruhů, tyče se samočinně pomocí gravitace spustí do reaktoru a sníží jeho tepelný výkon o 90% během dvou vteřin. Systém pro bezpečné vypnutí 2 (Safety Shutdown System 2 – SDS2) jsou kanály dusičnanu gadolinia ($GdNO_3$) uzavřené pomocí ventilů řízených pomocí tří logických obvodů. V případě aktivace dvou ze tří okruhů dojde k vstříknutí tekutiny do aktivní zóny a snížení tepelného výkonu reaktoru o 90% během dvou vteřin. Dalším prvkem je rezervní vodní systém (Reserve water system - RWS) umístěný přímo v kontejnmentu schopný v případě potřeby doplnit vodu jak pro chlazení, tak do parogenerátoru či v případě nouze jako moderátor. A v neposlední řadě je k bloku přiřazen i systém záložního napájení (Electrical power supply system - EPS) schopný dodávat elektrickou energii k bezpečnému odstavení bloku při havarijních podmínkách. Skládá se ze záložních generátorů a baterií se zvýšenou odolností proti zemětřesení.

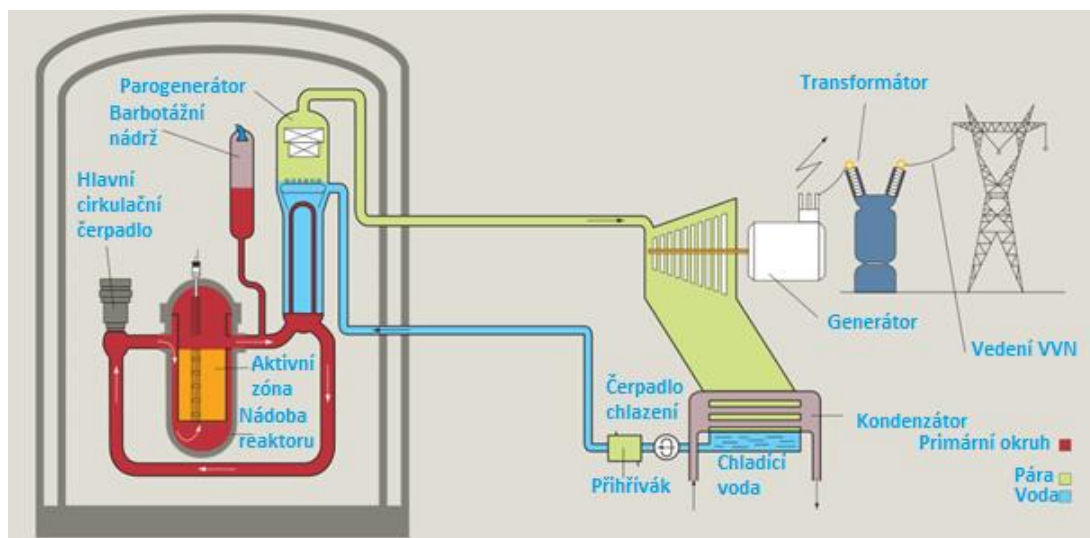
- **AP1000**

AP1000 je dvouokruhový tlakovodní reaktor společnosti Westinghouse o výkonu 1117 MW_e, který jako první obdržel z generace III+ obdržel certifikaci od Jaderné komise pro regulaci Spojených Států Amerických (Nuclear Regulatory Commission – NRC). Krom mnoha bezpečnostních prvků běžných pro třetí plus generaci se může reaktor AP1000 také pochlubit výraznou ekonomickou úsporou během výstavby. Podle [13] se sníží o 50% náklady spojené s bezpečnostními ventily, 35% náklady na čerpadla, o 80% náklady

spojené s bezpečnostním potrubím, o 85% na ovládacích kabelech a 45-ti% úsporu přinese menší seismická obestavba. Mezi specifitější bezpečnostní prvky patří pevnější kontejnment a systém jeho chlazení vycházející z koncepce AP600. Reaktor AP1000 se výrazně profiluje z hlediska pasivní bezpečnosti. Má rozsáhlé nádrže chladicí vody umístěné nad reaktorem, které v případě havárie dokáží reaktor pasivně dochlazovat po dobu 48 hodin jen pomocí gravitační síly Země. Jelikož tento blok ale nikde nestojí, není možné funkcionalitu tohoto systému ověřit. To ale z logických důvodů nebude možné ani na postaveném bloku. V současné době jsou ve výstavbě bloky s jadernými reaktory AP1000 v Číně a USA.

- **European Pressurized Reactor (EPR)**

Tento čistě evropský tlakovodní reaktor o výkonu až 1750 MW_e byl vyvinut ve spolupráci mezi Francií a Německem pod taktovkou společnosti Areva. Mezi jeho hlavní přednosti patří fakt, že reaktor je schopen používat MOX palivo, tudíž palivo s plutoniem z již jednou použitého jaderného paliva. Mezi speciální bezpečnostní prvky patří čtyři nezávislé havarijní chladicí systémy, velice těsný dvojitý kontejnment (tento požadavek protahuje výstavbu v elektrárně Olkiluoto) a 2,6 metrů tlustá betonová bariéra chránící reaktor před útokem z vnějšku. Ekonomická úspora se projeví hlavně v nižší spotřebě uranu a to až o 17% na jednotku elektrické energie. Tento reaktor je velice flexibilní, mimo široké možnosti paliva, které se použije, nabízí i možnost snadné regulace výkonu mezi 60 a 100% (o 5% za minutu za běžných podmínek) a možnost volby délky kampaně mezi 12 a 24 měsíci. Z ekologicko-ekonomického hlediska pomáhá o 15% nižší produkcí radioaktivního odpadu a životností minimálně 60 let.



Obrázek 1-5 Schéma elektrárny s reaktorem EPR (upraveno) [14]

- **Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR)**

Varný lehkovodní reaktor o výkonu 1550 MW_e vycházející z typu ABWR, vypracovaný společností GE a certifikovaný ve Spojených Státech Amerických. Je bezpečnější a ekonomičtější než předchozí varné reaktory a, s 25-ti% úsporou za čerpadla, ventily a motory, dokáže pasivně bez elektrické energie (diesel agregáty, baterie) zajistit chlazení reaktoru po dobu šesti dní pouze za využití chlazení na bázi gravitace a pasivního systému chlazení v kontejnmentu založeného na přirozené cirkulaci plynu. Předpokládaná životnost reaktoru je minimálně 60 let.

- **VVER-1200**

Reaktor VVER-1200 je nástupce reaktoru VVER-1000. Nabízí výkon 1200 MW_e při životnosti minimálně 50 let a faktoru využití 90%. Samozřejmostí je zesílený kontejnment s odolností proti útoku zvenčí. Reaktor nijak nevybočuje z řady a splňuje všechny bezpečnostní podmínky reaktorů generace III+. VVER-1200 je v současné době ve výstavbě v Rusku a Bělorusku. Reaktor VVER-1200 byl také jednou ze zvažovaných variant pro dostavbu JE Temelín. Z ekonomického hlediska jsou jistě zajímavé nižší kapitálové náklady na instalovaný kW elektrické energie a především projektovaná doba výstavby 54 měsíců, která je i možnou příčinou kratší životnosti. Dle mého názoru by takto rychle vybudovatelné reaktory mohly být budoucností pro zemi, kterou náhle postihne energetická krize. Vzhledem ke zrušení tendru na dostavbu Jaderné elektrárny Temelín a vyhlídkám české energetiky se může v budoucnu takovou zemí stát i Česká republika.

1.3.2. Malé stavebnicové reaktory

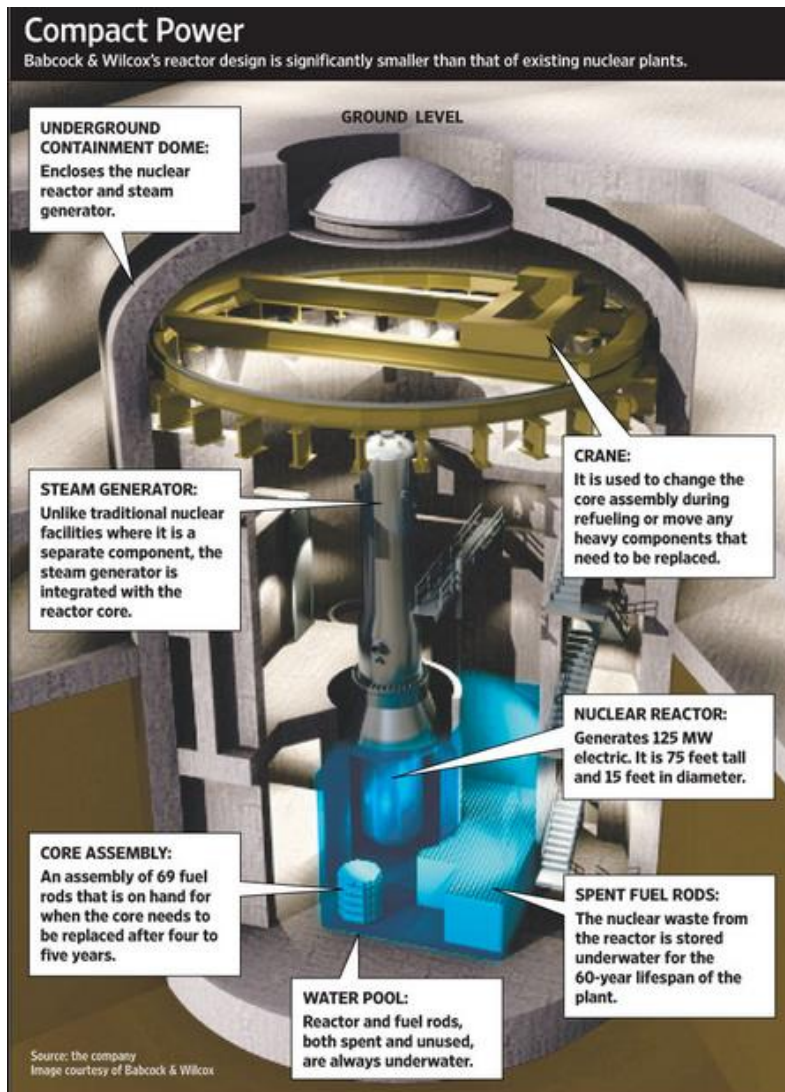
Malé stavebnicové reaktory (Small modular reactors, SMR), někdy zvané také Generace III++, byly Mezinárodní agenturou pro atomovou energii definovány jako reaktory o instalovaném výkonu do 300 MW. Takto malé zdroje elektrické energie jsou logickou volbou pro malé státy nebo státy s nedostatečně rozvinutou přenosovou soustavou. Tyto nové reaktory, které mohou být menší než železniční vagón s desetinovými náklady oproti běžné jaderné elektrárně, mohou například postupně nahrazovat bloky uhelných elektráren a tím přispět ke snížení emisí oxidu uhličitého a zároveň v předstihu řešit budoucí nedostatek uhlí. Kritici namítají, že takto malé zdroje se nemohou ekonomicky vyplatit, protože oproti velkým elektrárnám zde nedochází k úsporám z rozsahu. Toto je dle mého názoru pravda jen částečně. Bohužel mnoho nákladů zůstane nesníženo i při sériové výrobě. Kupříkladu využití místní infrastruktury, náklady místních výběrových řízení a přizpůsobování lokálním licenčním požadavkům povede k tomu, že ačkoliv bude malý reaktor levný, nedostaneme se na nákladovou cenu velkých reaktorů. Myslím si ale, že pokud nebude elektřina z malých zdrojů

konkurovat elektřině z velkých zdrojů, použití např. jako zdroj elektrické energie v odlehlých oblastech či k odsolování mořské vody, může se vyplatit stavět i tyto malé reaktory.

Výhody SMR jsou především:

- Stavebnicovost – jak už z názvu technologie vyplývá, sériová výroba jednotlivých komponent podstatně sníží cenu elektrárny a zkrátí dobu výstavby. Dále by také mohla usnadnit licenční proces, protože už bude „hotová dokumentace“.
- Nízké kapitálové náklady – je zřejmé, že se sériovou výrobou a rychlejší výstavbou klesnou i kapitálové náklady.
- Efektivita dodávky a flexibilita umístění – více malých bezemisních zdrojů rozmístěných plošněji může přispět ke stabilitě sítě a zároveň může řešit lokální problémy v menších oblastech, kam je potřeba elektřinu dovážet.
- Bezpečnost a zabránění v šíření jaderných zbraní – jelikož bude SMR reaktor pod úrovní terénu, stane se odolnějším, jak proti případnému teroristickému útoku, tak i vůči přírodním živlům. Počítá se také, že v politicky nestabilních zemích by se palivo fabrikovalo přímo v továrně, utěsnilo a odeslalo do elektrárny a po konci palivového cyklu by se opět poslalo zpět do fabriky na eventuelní přepracování i dlouhodobější uskladnění.

Jako příklad SMR technologie uvedu modul mPower [5] vyvíjený v USA aliancí Babcock and Wilcox Nuclear Energy Inc. (B&W NE) and Bechtel Power Corporation s instalovaným výkonem 125 MW. Tento iPWR (integral Pressurized Water Reactor) reaktor vychází ze zkušeností při používání současných lehkovodních reaktorů a používá již zavedené LWR technologie. Je uzpůsoben pro standardní PWR palivo a samozřejmě jsou pasivní bezpečnostní prvky. Počítá s dobou provozu 60 let a pětiletým palivovým cyklem. Je 22 metrů vysoký a 4,5 metru široký [5]. Zajímavostí oproti klasickým jaderným blokům je, že parogenerátor je integrován do reaktorové nádoby (válcová struktura podél středové osy nádoby reaktoru na obr. 1.2) a celý kontejment se nachází pod zemí.



Obrázek 1-6 Modul mPower [21]

1.4. Čtvrtá generace jaderných zdrojů

Charakteristika reaktorů generace IV byla uveřejněna v publikaci A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems Mezinárodním fórem pro generaci IV, které vzniklo v polovině roku 2001. Fórum GIF má v současné době 13 členů. Členy jsou Argentina, Brazílie, Čína, Evropská Unie jako kolektivní člen, Francie, Japonsko, Jihoafrická republika, Jižní Korea, Kanada, Rusko, Švýcarsko, USA a Velká Británie, tedy hlavní světové velmoci, které vidí svojí energetickou budoucnost vybudovanou na jaderné energetice. Členové se dohodli na spolupráci a výpomoci při vývoji nových jaderných zdrojů splňujících všechny požadavky kladené na čtvrtou generaci a ustanovili šestici typů reaktorů, na jejichž projektech se bude v rámci Fóra GIF pracovat. Tyto projekty jsou stále ještě ve svých počátcích a s jejich uvedením do praxe se nepočítá před rokem 2030. Do této doby by měly svět zásobit jadernou elektrickou energií reaktory generace III a III+.

1.4.1. Hlavní cíle a nároky na budoucí reaktory IV:

Udržitelnost:

- Reaktory budou bezpečně dodávat udržitelnou energii při splňování všech ekologických limitů.
- Množství jaderného odpadu vycházejícího z jaderné elektrárny se bude maximálně minimalizovat, a to především za dosažení vyššího vyhoření používaného paliva včetně vzniklých transuranů.

Bezpečnost a spolehlivost:

- Provoz bude extrémně bezpečný a spolehlivý.
- Pravděpodobnost poškození aktivní zóny reaktoru bude velmi nízká.

Ekonomičnost:

- Elektrárna bude mít životnost minimálně 60 let s možností prodloužení a její provoz bude co nejjednodušší a nejlevnější.
- Míra investičního rizika bude srovnatelná s jinými zdroji elektrické energie.

Zabránění v šíření jaderných zbraní:

- Bude se používat výhradně palivo, které již nebude atraktivní pro teroristické skupiny a z něhož půjdou získat látky potřebné na výrobu jaderných zbraní pouze velice složitou a velmi nákladnou metodou.

1.4.2. Konkrétní reaktory generace IV:

- **Reaktor využívající superkritickou vodu (SCWR – SuperCritical Water Reactor):**

U reaktoru SCWR se primárně počítá s tepelnými neutrony, kde jako moderátor i chladivo slouží vodní pára v kritickém stavu. Provozní teplota vody bude až 550°C a tlak 25MPa. Díky použití superkritické páry se zvýší účinnost až na 45 %. Kritická pára proudí přímo na turbínu, což přináší výhody spojené s absencí sekundárního okruhu. Ekonomická úspora při výstavbě bude tudíž nesporná díky absenci mnoha komponent jako jsou například parogenerátory a separátory vody. Nevýhodou ovšem je zvýšená korozivost kritické páry a tudíž větší nároky na použité materiály. Projekt vychází ze dvou již odzkoušených elektráren. První jsou klasické BWR elektrárny, které jsou předchůdcem SCWR a druhé jsou nadkritické tepelné elektrárny, které jsou ve světě již také provozovány. Na vývoji SCWR se také podílí Centrum výzkumu Řež s.r.o. v rámci projektu ARCHER.

- **Velmi vysokoteplotní reaktor (VHTR - Very-High-Temperature Reactor):**

Reaktor pracující s tepelnými neutrony moderovanými grafitem. Chladivo tohoto reaktoru bude helium a jeho provozní teplota bude dosahovat až 1000°C, což samozřejmě velmi zvyšuje nároky na použité materiály. Díky velmi vysoké teplotě účinnost dosahuje až 50% a počítá se i s přidruženou výrobou vodíku. Při konstrukci VHTR se lze inspirovat u britských reaktorů Magnox, kde byl jako moderátor také používán grafit. Podle [10] podepsalo v roce 2006 sedm členů fóra GIF dohodu o spolupráci na vývoji technologií pro VHTR a tudíž by tento reaktor mohl být jako jediný dokončený před rokem 2030.

- **Olovem chlazený rychlý reaktor (LFR - Lead-Cooled Fast Reactor)**

V reaktoru LFR se jako chladivo používá olovo nebo směs olovo-bismut. Tato směs má nižší teplotu tavení, ale nevýhodou je, že bismut reaguje s neutrony za vzniku izotopu polonia, který je nebezpečný alfa-zářič. Olovem chlazené reaktory jsou úspěšně používány v ruských jaderných ponorkách a Rusko se také aktivně podílí na vývoji LFR. Produkovaný elektrický výkon může být až 1200 MW_e, ale zajímavější jsou jistě tzv. bateriové jednotky o výkonu do 100 MW_e, u kterých se počítá se zavedením paliva ještě v továrně a následné výměny paliva také v továrně po přivezení celého reaktoru. Toto opatření zvyšuje bezpečnost a snižuje riziko zneužití paliva, protože k palivu nemá nikdo přístup, ani provozovatel reaktoru. Na vývoji LFR se také podílí Centrum výzkumu Řež s.r.o. v rámci projektu MATTER.

- **Sodíkem chlazený rychlý reaktor (SFR - Sodium-Cooled Fast Reactor)**

Tento rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem vychází z již provozovaných sodíkem chlazených reaktorů po celém světě. Reaktor využívá uzavřený palivový cyklus. Rychlé neutrony dokáží štěpit uran 238, polonium i další transurany vzniklé v současných reaktorech a tudíž reaktor SFR výrazně přispěje ke snížení produkce radioaktivních odpadů. Tekutý sodík má oproti vodě hned dvě zásadní výhody. Má menší korozivost než voda a jako chladivo může pracovat i při tlaku blízkému atmosférickému, což oboje snižuje technické nároky na použité materiály. Na vývoji SFR se velmi aktivně podílí Rusko, Japonsko a Francie, které již reaktory chlazené sodíkem na svém území provozují.

- **Plynem chlazený rychlý reaktor (GFR - Gas-Cooled Fast Reactor)**

Rychlé reaktory chlazené plynem zatím ve světě nejsou, ale dá se vycházet z běžných plynem chlazených reaktorů. Jako nejpravděpodobnější chladivo se jeví helium. Počítá se s provozní teplotou chladiva až 850°C, která umožní i produkci vodíku. Reaktor má

uzavřený palivový cyklus, ve kterém se počítá s přepracováním použitého paliva přímo v areálu elektrárny, které vede ke snížení množství přepravovaného radioaktivního materiálu. Na vývoji GFR se také podílí Centrum výzkumu Řež s.r.o. v rámci projektu GoFastr.

- **Reaktor na bázi roztavených solí (MSR - Molten Salt Reactors)**

MSR reaktor je schopen pracovat s celým spektrem neutronů. Jako moderátor se zde uvažuje grafit. Chladivo i palivo budou zastávat roztavené soli. To v sobě skýtá několik výhod. Takové palivo bude jen velmi těžko zneužitelné kvůli náročnosti separace radioaktivních izotopů z palivové směsi. Další výhodou je možnost provozovat reaktor za běžného tlaku díky nízké tenzi par. Také fakt, že soli jsou téměř netečné vůči vzduchu a vodě, nám velice snižuje nároky na použité zařízení a technologie. Bohužel kromě experimentů prováděných ve Velké Británii v 60. letech jsou reaktory na bázi roztavených solí pouze na papíře.

Tabulka 1-1 Vybrané parametry šesti základních typů reaktorů generace IV [12]

reaktor	neutrony	chladivo	teplota [°C]	tlak	palivo	palivový cyklus	výkon (Mwe)	konečný produkt
SCWR	tepelné, rychlé	voda	300 - 550	velmi vysoký	UO ₂	otevřený, uzavřený	1500	elektřina
VHTR	tepelné	helium	1000	vysoký	UO ₂	otevřený	250	vodík, elektřina
LFR	rychlé	olovo - bismut	550 - 800	nízký	U238	uzavřený	50 - 1200	elektřina, vodík
SFR	rychlé	sodík	550	nízký	U238, MOX	uzavřený	150 - 1500	elektřina
GFR	rychlé	helium	850	vysoký	U238, Pu	uzavřený	300	elektřina, vodík
MSR	epitermální	fluoridové soli	700 - 800	nízký	UF ₄ , PuF ₃	uzavřený	1000	elektřina, vodík

2. Zátěžové testy jaderných elektráren v reakci na havárii ve Fukušimě

2.1. Jaderná havárie v elektrárně Fukušima I

Dne 11. března 2011 zasáhlo severovýchodní pobřeží japonského ostrova Honšú jedno z největších zemětřesení v historii. Toto zemětřesení bylo o síle 9,0 momentové magnitudy, což zhruba odpovídá stupni 9 na více známé Richterově stupnici. Zemětřesení svými důsledky přímo postihlo tyto čtyři jaderné elektrárny:

- Fukušima I
- Fukušima II
- Onagawa
- Tokai-2



Obrázek 2-1 Zasažené jaderné elektrárny [11]

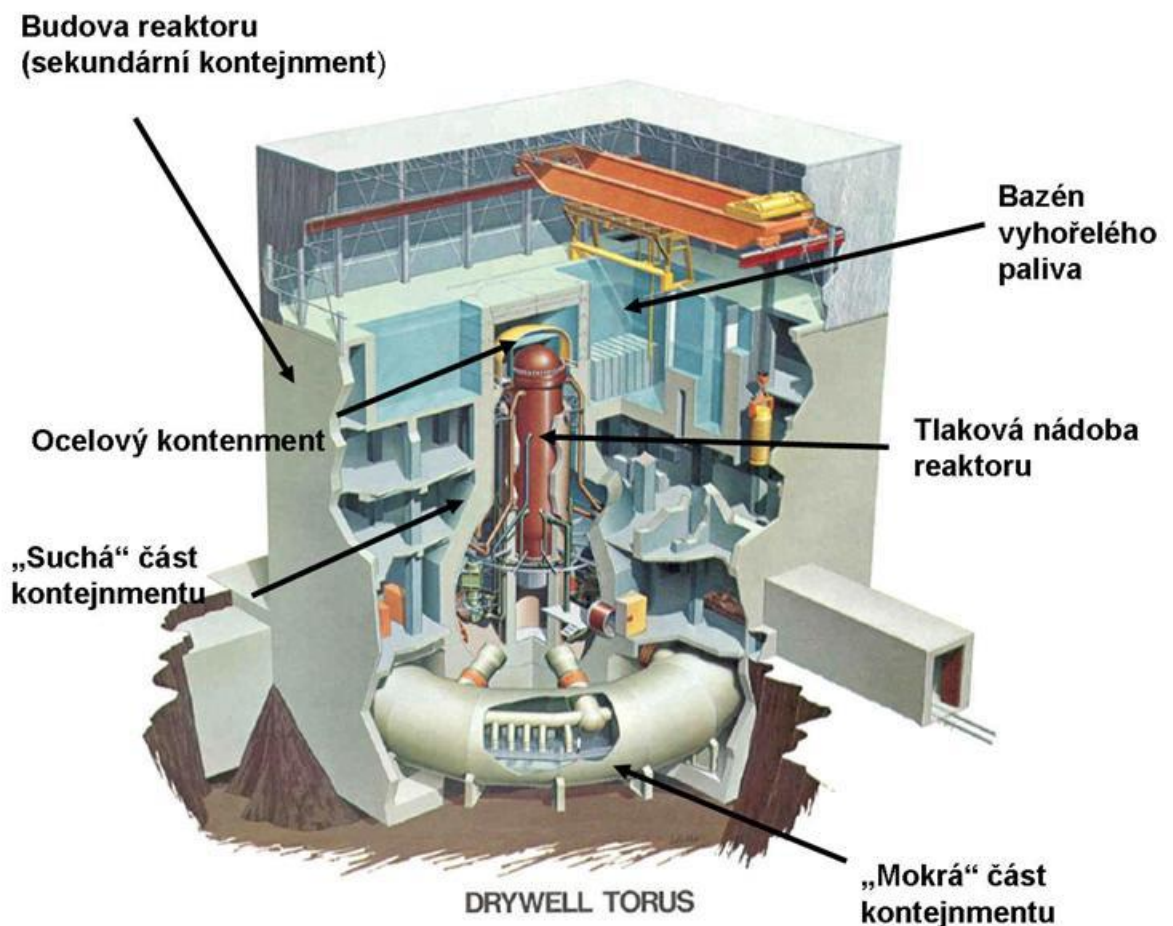
Průběh událostí po zemětřesení byl následující: Bezprostředně po zemětřesení se bezpečně odstavily všechny bloky v těchto jaderných elektrárnách. Jelikož i po zastavení štěpné reakce produkuje jaderné palivo značné množství tepelné energie, je potřeba ihned zahájit jeho dochlazování. Proto elektrické pumpy začaly čerpat chladící demineralizovanou vodu jako chladící médium v primárním okruhu. Zdrojem pro tyto pumpy byl náhradní zdroj elektrické energie. Reaktory v elektrárnách Fukušima II, Onagawa a Tokay-2 se nakonec povedlo bezpečně dochladit, proto se jimi už nebudu nadále zabývat a zaměřím se pouze na sled událostí v elektrárně Fukušima I. V elektrárně Fukušima I jsou jedny z nejstarších ve světě používaných varných reaktorů chlazených lehkou vodou. První spuštěný je typu BWR-3, další čtyři jsou typu BWR-4 a uvedeny do provozu jako poslední je typu BWR-5, který byl spuštěn v roce 1979.

Nutno říci, že do této chvíle fungovaly všechny bezpečnostní prvky přesně tak, jak měly, a nebylo nutné mít jakékoliv obavy o únik radiace. Přibližně po hodině od zemětřesení dorazila k pobřeží vlna tsunami, která předčila veškerá očekávání a úvahy, s kterými projekt počítal. K elektrárně Fukušima I, která stojí přímo na okraji moře, dorazila vlna tsunami vysoká 15 metrů. Projekt elektrárny počítal, a tudíž byla elektrárna dimenzována, na vlnu vysokou šest metrů [24]. Mořská voda vyřadila téměř všechny systémy dochlazování a posledním funkčním zdrojem elektrické energie byly akumulátory, které však byly schopny chladit elektrárnu jen na několik málo hodin a po jejich vybití byla elektrárna zcela bez zdroje elektrické energie a potažmo také bez chlazení.

Vzhledem k nefunkčnosti cirkulačních čerpadel se začala voda v reaktorech nebezpečně ohřívat a měnit ve vodní páru. V důsledku toho začal nebezpečně narůstat tlak v kontejnmentu, a jelikož dosahoval nepřijatelných a neudržitelných hodnot, bylo třeba upustit část této radioaktivní páry z primárního kontejnmentu do reaktorové budovy. V upouštěné páře byl vodík (vzniklý tepelným rozkladem chladící vody), jód 131 a cesium 137, což jednoznačně ukázalo, že došlo k odhalení části aktivní zóny. Pokud reaktorová budova umožňovala dostatečně masivní odpouštění vnitřního vzduchu ven, což není autorovi práce známo, jeví se ze současné perspektivy jako chyba obsluhy, že k tomuto vypouštění směsi plynu nedošlo. V důsledku přítomnosti vodíku totiž došlo na třech blocích k explozím a zničení či značnému poškození budov a tím stejně došlo k uvolnění vnitřní směsi plynu mimo reaktorovou budovu. Jelikož reaktory přeměňovaly v páru stovky tun vody denně, rozhodli se japonští inženýři, že zahájí chlazení reaktorů a bazénů s vyhořelým jaderným palivem mořskou vodou i za cenu zničení reaktorů. Což byl jistě správný krok, ale v důsledku toho uniklo mnoho radioaktivních

látek do životního prostředí (které by bez tohoto zásahu unikly stejně, protože v této fázi se už nejspíš nedalo nic jiného dělat).

Radiace v některých částech elektrárny je stále příliš vysoká, a proto je značná část prací dělána roboty. Na tato místa nebude možno vstoupit, pokud nedojde k intenzivní dekontaminaci. I přesto už začalo vyklízení bazénu s vyhořelým jaderným palivem u bloku 4, což znamená, že 1331 palivových souborů bude přepraveno do náhradního chladícího bazénu poblíž budovy bloku 4.



Obrázek 2-2 Kontejnment Mark 1 používaný v JE Fukušima I [11]

Testy ukázaly, že civilní obyvatelstvo dostalo díky včasným a racionálním rozhodnutím vlády (hlavně bezprostředně po zemětřesení) pouze zanedbatelnou dávku radiace. Pro obyvatele České republiky je vliv žádný nebo nezměřitelný. Rozsah havárie se samozřejmě nedá srovnávat například s havárií v Černobylu, ale i tak se jedná o druhou největší jadernou havárii, které musel svět čelit a která ovlivnila odvětví jaderné energetiky jako celek.

2.2. Zátěžové testy

Nedlouho po jaderné havárii v japonské elektrárně Fukušima I byl na jednání v Bruselu při účasti všech zemí Evropské unie vysloven požadavek na provedení zátěžových testů (stress testů – pojem dříve používaný mimo jiné v bankovníctví) na všech reaktorech nacházejících se na území členských států Evropské unie. Zátěžové testy prokazují robustnost jaderné elektrárny bez ohledu na její typ reaktoru, výkon a umístění.

„Zátěžové zkoušky jsou v této fázi definovány, jako cílené přehodnocení bezpečnostních rezerv JE ve světle událostí, které se staly na JE Fukushima, tedy extrémní přírodní události vážně ohrožující bezpečnostní funkce a vedoucí k těžké havárii.“ [23 - <<http://www.stresstest.cz>>]

Počítá se, že při těchto extrémních situacích dochází k postupné ztrátě jednotlivých úrovní ochran bez uvažování pravděpodobností takové situace. Výsledná zpráva od každé elektrárny obsahuje případná slabá místa a možné mezní podmínky pro každou extrémní situaci a také její odezvu na zjištění a plánovaná nápravná opatření. Tuto zprávu zhotovili provozovatelé jaderných elektráren a postoupili jí k připomínkám národním orgánům dozoru (v ČR SÚJB). Orgán dozoru ji po kontrole předal sdružení evropských orgánů dozoru nad jadernou bezpečností ENSREG (European Nuclear Safety Regulators), které na základě podkladů ze všech jaderných elektráren EU, ke kterým se dobrovolně připojila Ukrajina a Švýcarsko, vyhotovilo závěrečnou zprávu pro Evropskou komisi. Samotné hodnocení všech národních zpráv proběhlo formou Peer review (společného partnerského hodnocení). Samotný proces zvyšování bezpečnosti se tedy skládá ze čtyř hlavních kroků:

- 1) Analýzy a vyhotovení zpráv provedené provozovatelem Jaderné elektrárny (volně dostupné na internetu)
- 2) Posouzení zpráv Národním orgánem dozoru a vyhotovení Národní zprávy (volně dostupné na internetu)
- 3) Partnerské hodnocení Národních zpráv týmy expertů ze zúčastněných zemí a návštěvy jaderných elektráren
- 4) Vyhotovení závěrečné zprávy skupinou ENSREG (volně dostupné na internetu)

Testování bylo podrobena 145 jaderných reaktorů v 15-ti členských zemích (včetně českých jaderných elektráren Temelín a Dukovany). Žádná s testovaných elektráren nebyla v souvislosti s výsledky zátěžových zkoušek odstavena. Většinu evropských jaderných elektráren byly pouze doporučeny kroky vedoucí ke zvýšení bezpečnosti a robustnosti. Náklady na provedení těchto kroků byly předběžně vyčísleny na 25 miliard eur.

Technický rozsah stress testů je rozdělen do tří bodů: [23]

- a) Inicializační události – zemětřesení, záplavy, velmi špatné povětrnostní podmínky
- b) Ztráta bezpečnostní funkcí kvůli jakékoliv inicializační události na území elektrárny – station blackout (úplná ztráta elektrického napájení), ultimate heat sink (dlouhodobá ztráta koncového jmače tepla), popř. kombinace obou
- c) Problematika řízení těžkých havárií - opatření pro předcházení a zvládnutí ztráty funkce chlazení aktivní zóny, ztráty funkce chlazení bazénu skladování paliva a ztráty integrity kontejnmentu

Tedy vidíme, že technický rozsah přesně pokrývá události, které se udály v jaderné elektrárně Fukušima I.

Při vytváření zprávy se počítá s nejnepříznivějšími podmínkami, ve kterých se může elektrárna nacházet, a zvažují se všechny možné provozní stavy (tedy i například to, že se elektrárna zrovna nachází ve stavu odstávky).

2.3. Zátěžové testy v České republice

Na úvod je potřeba vyzdvihnout zejména fakt, že území České republiky, především lokality kde se nachází jaderné elektrárny, není vystaveno extrémním přírodním jevům, jako jsou zemětřesení, záplavy, extrémní klimatické podmínky aj., které by mohly snížit bezpečnost jaderných elektráren Dukovany a Temelín.

I přes časové a personální náročnosti a zároveň i omezený čas na provedení stress testů byly zkoušky v České republice provedeny mimořádně důkladně. Hodnocení bezpečnostních kapacit pro zvládnutí extrémních přírodních podmínek, ztrátě elektrického napájení, dlouhodobé ztrátě koncového jmače tepla a těžkých havárií potvrdilo, že české jaderné elektrárny disponují dostatečnými rezervami a robustností pro jejich zvládnutí jak z hlediska technického, tak personálního i administrativního. Přesto všechno se našly možnosti zvýšení bezpečnosti zejména při nadprojektových velmi nepravděpodobných situacích. Náklady na provedení těchto úprav přesáhnou 1,5 miliardy korun a většina úprav již byla provedena.

Zátěžové zkoušky elektráren Dukovany a Temelín také ukázaly mnoho jejich silných stránek: [15 - SÚJB: Národní zpráva „Zátěžové zkoušky“ JE Dukovany a JE Temelín Česká republika Hodnocení bezpečnosti a bezpečnostních rezerv ve světle havárie JE Fukushima]

- *robustnost a konzervativnost projektu připraveného zvládat náročné podmínky*

- projekt, který prochází stálou kontrolou a prověřováním s aktuálními bezpečnostními požadavky
- trvalý proces zapracování nových bezpečnostních požadavků
- lokality s minimálním seizmickým rizikem (v EDU probíhající zodolnění na PGA 0,1g)
- lokality prakticky vylučující vnější záplavy
- dvě velké vodní nádrže na surovou vodu pro obě elektrárny
- velká zásoby chladicí vody uvnitř elektráren
- kompaktní bazény VJP zajišťující podkritičnost paliva i při zaplavení čistou vodou
- u EDU zejména velký objem hermetických prostor (barbotážní systém) a relativně menší zdrojový člen (menší výkonové parametry reaktoru).
- u ETE umístění bazénu VJP uvnitř plnotlakého kontejnmentu, aj.

Tabulka 2-1 Ukázka výsledků statisticky vypočtených extrémních klimatických jevů v oblasti JE Dukovany ze Závěrečné zprávy z jaderné elektrárny Dukovany [16]

Událost (klimatický jev) / Parametr	Doba návratu 100 let		Doba návratu 10 000 let	
	Hodnota	Zatížení	Hodnota	Zatížení
Nárazový vítr / rychlost	46,2 m/s	0,69 kN/m ²	60,6 m/s	1,26 kN/m ²
Sníh / přepočtený vodní sloupec	109,0 mm	1,09 kN/m ²	195,0 mm	1,95 kN/m ²
Maximální teplota / abs.max / rok	39,0 °C	-	46,2 °C	-
Minimální teplota / abs. min / rok	- 30,8 °C	-	- 46,7 °C	-

Tabulka 2-2 Ukázka nálezu bezpečnostních rezerv ze Závěrečné zprávy z jaderné elektrárny Temelín [17]

	FUNKCE	NO - ZPŮSOB ŘEŠENÍ	RIZIKA	DALŠÍ KROK
ALTERNATIVNÍ TECHNICKÉ PROSTŘEDKY	1. Odvod tepla z AZ přes I.O	Doplňování vody alternativním způsobem do (a) PG/BSVP z nádrží TX (při možnosti sek. odvodu tepla z I.O), (b) I.O/BSVP (při roztěsněném I.O) z nádrží s obsahem H ₃ BO ₃ (TB30) pomocí:	záplavy UHS SBO	Jedná se o diverzní (nezávislé) prostředky napojené do elektrovedení / potrubních tras stávajících BS. Jč. řešení ověřující projekt stávajících BS. OKAMŽITĚ: koordinace s ostatními provozovateli VVER / WANO / projektantem VVER – upřesnění koncepce řešení 2012: studie proveditelnosti
	2. Odvod tepla z AZ přes II.O.	i) stabilního motorčerpadla vně bloku (čerpací výkon max. cca 140 kW) (jedno na blok, transportovatelné) ii) požárního vozu	záplavy UHS SBO	
	3. Čerpání médií pro BSVP (včetně plnění BSVP)	Zřízení přípojných míst a přísl. rozvodů (příruby, prostupy, armatury, možnost instalace „flexibilních“ propojů) do stávajících potrubních tras (systémů TX10, TQ, TG). Možnost alternativního zdroje vody po vyčerpání určených nádrží.	záplavy UHS SBO	
	4. Zajištění napájení I.kategorie	DGS 400 kW (0,4 kV / 50 Hz) pro zajištění napětí pro ZN I.kategorie + napětí pro vybrané spotřebiče 0,4 kV II. kat. (UV55 (BD), UV01(ND), vybrané armatury, popř. i divizní UJ). (Kontejnerový DG (jeden na blok, transportovatelný), připojení kabelovým vedením na zvolenou (libovolnou) divizi ZN (ÚR 0,4 kV Cx03 + kabel. propoj na Cx02). Možnost externího doplňování PHM.)	SBO	
	5. Obyvatelnost BD/ND	Pozn. k chlazení SKŘ: Odstavit vybrané skříně, otevřít dveře ... zřejmě nejsou nutné žádné speciální prostředky	SBO	
	6. Zabezpečení odvodu tepla z prostředků SKŘ		SBO UHS	

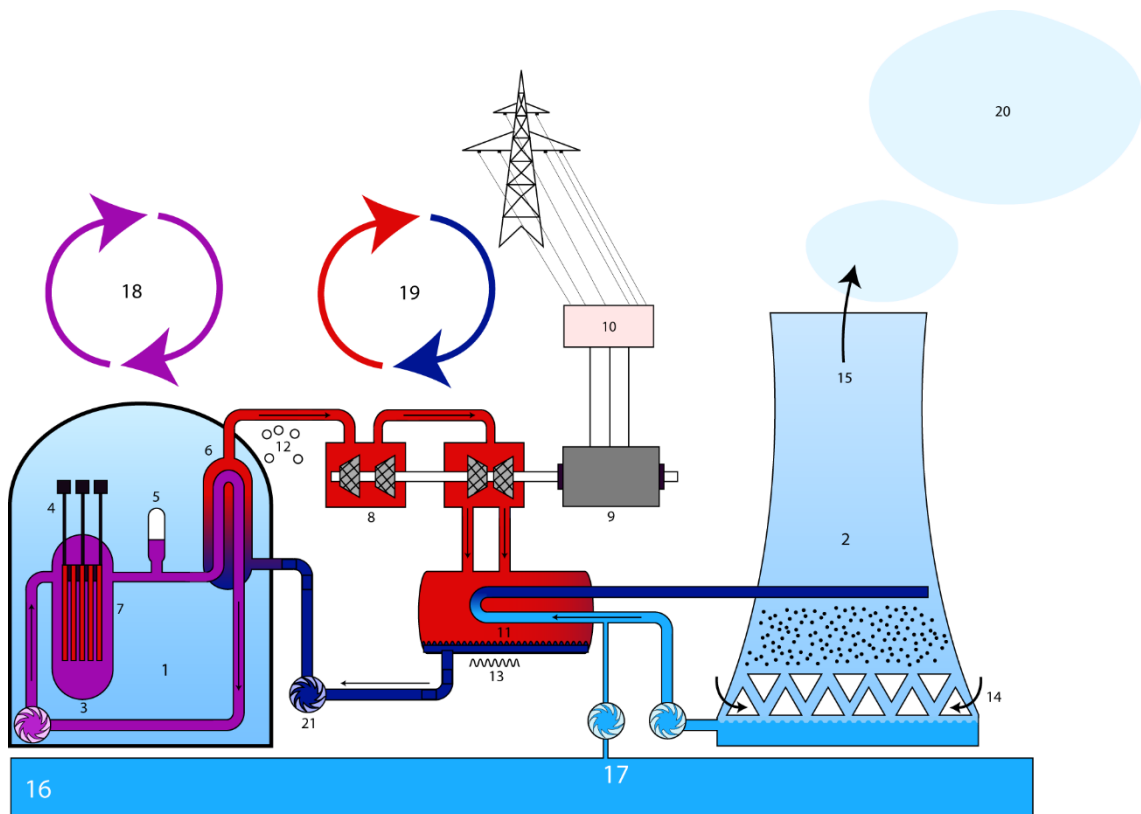
3. Specifika výroby elektřiny v současných jaderných zdrojích

Výroba elektrické energie ve všech typech v současnosti používaných zdrojů má určitá specifika a omezení. U většiny typů elektráren nejsou natolik význačná či zásadní. Avšak u zdrojů jaderných jsou některá natolik jedinečná, že považuji za nutnost si je vyjmenovat a alespoň základně objasnit. V roce 2014 lidstvo plně zvládá pouze řízenou nukleární reakci, ale já pevně věřím, že v nedaleké budoucnosti dostaneme pod kontrolu i řízenou termojadernou reakci, což s sebou ovšem přinese další specifické aspekty výroby elektrické energie.

3.1. Princip

Princip dosažení dostatečné mechanické energie, která pohání turbínu, je u jaderné elektrárny veskrze podobný jako u klasické tepelné elektrárny. Velmi zjednodušeně řečeno: pomocí paliva přeměníme vodu v páru, která pohání turbínu. Počet okruhů závisí na druhu reaktoru. Ve světě jsou nejvíce rozšířeny (používané, ve výstavbě i projektované) tlakovodní reaktory [1], tudíž nyní základně popíšu právě elektrárnu s tímto typem reaktoru.

Jako chladivo a moderátor slouží u tlakovodního reaktoru běžná demineralizovaná voda H_2O . Palivo je tvořeno palivovými tyčemi většinou z oxidu uraničitého, jak je tomu dnes u většiny reaktorů (ale pravděpodobně nebude v budoucnosti, viz výše).



Obrázek 3-1 JE s tlakovodním reaktorem [32]

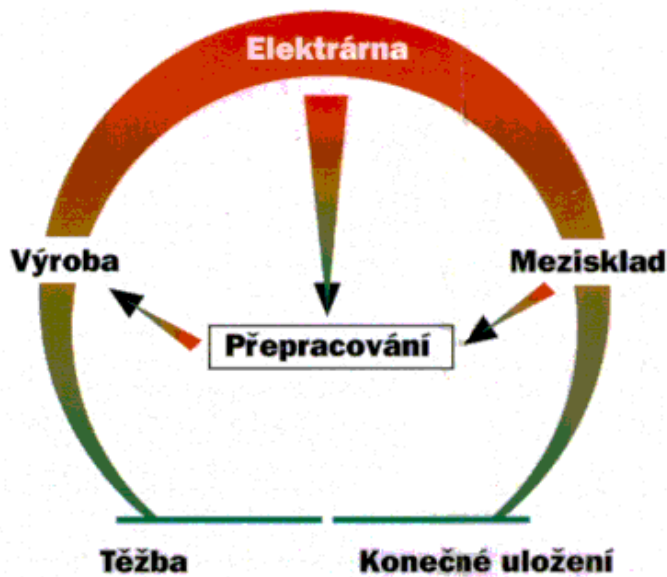
V reaktoru (3), který je umístěn v kontejnmentu (1) dochází ke štěpné reakci paliva při produkci tepelné energie. Tato energie je předána vodě (přes velmi vysoký tlak nedochází k přeměně na páru) primárního okruhu (18), která proudí do parogenerátoru (6). V parogenerátoru voda primárního okruhu předá teplo vodě sekundárního okruhu (19) o nižším tlaku, v důsledku čehož se tato voda přemění v suchou páru a proudí na turbínu, kterou pohání. Turbína je přes hřídel spojena s generátorem elektrické energie, čímž dochází k produkci žádané elektrické energie. V kondenzátoru (11) předá pára za turbínou zbytkové teplo chladící vodě v chladícím okruhu (17) a proudí opět do parogenerátoru. Voda chladícího okruhu velmi často necirkuluje, ale protéká např. z řeky, kam je po ochlazení v chladicí věži (2) vracena. V chladicí věži dochází k maření tohoto tepla. Ovšem ne vždy je teplo mařeno, může být například použito k vytápění přilehlých obcí či k jiným specifickým účelům jako je například chov ryb.

3.2. Palivo

Palivo pro jaderné elektrárny je jedinečné v mnoha ohledech. Samotná uranová ruda, tak jak se vytěží, nemůže být použita jako palivo v jaderné elektrárně. Před jejím energetickým využitím musí být provedeno několik technicko-technologických operací, které jsou zároveň ekonomicky nákladné. Proti této nevýhodě však stojí výhoda, že koncentrace energie v palivu na jednotku hmotnosti je podstatně vyšší než u ostatních tepelných elektráren. Známé energetické přirovnání [1] nám říká, že z 1 kilogramu hnědého uhlí vyrobí hnědouhelná elektrárna přibližně 1 kWh, kdežto jaderná elektrárna z 1 kilogramu jaderného paliva přibližně milionkrát více – 1 GWh. Takto jednoznačné to však není u porovnání množství vytěžené horniny na jednotku energie, kde se dostáváme na poměr 1:10 – 1:100 ve prospěch jaderných elektráren. Po využití jaderného paliva je potřeba s tímto, v současné době, nebezpečným odpadem vhodně nakládat, což s sebou přináší další náklady. Toto použité palivo nejprve stráví několik let v bazénu vedle reaktoru a po snížení jeho aktivity se dočasně ukládá v meziskladech, které jsou většinou v areálech jaderných elektráren a v budoucnu se buď uloží trvale do hlubinného úložiště, nebo se přepracuje a použije znovu například v reaktorech čtvrté generace.

Dalším specifikem je, že palivo je v reaktoru přítomno po celou dobu kampaně bez jeho výměny či doplňování, oproti např. uhelné elektrárně, kam se palivo doplňuje kontinuálně zvenčí. Když fyzikové počítají skladbu různých palivových tyčí v reaktoru, tak se snaží prodloužit dobu kampaně tím, že záměrně nadhodnotí množství štěpitelné složky v reaktoru. Toto je kompenzováno větší koncentrací kyseliny borité, která má vlastnosti jako moderátor, tedy že absorbuje neutrony, tudíž zpomaluje štěpnou reakci, v primární vodě a následně s vyhoříváním

paliva dochází k postupnému snižování této koncentrace a tudíž k většímu množství neutronů v aktivní zóně.



Obrázek 3-2 Palivový cyklus JE (upraveno) [33]

3.3. Odstávky

Vzhledem k tomu, že se jaderné palivo do reaktorů nedá doplňovat kontinuálně, je potřeba jednou za čas reaktor odstavit a část paliva obměnit a ponechané palivové tyče vhodně přeskládat. Odstávka reaktoru se děje přibližně jednou za jeden až jeden a půl roku a trvá přibližně měsíc. Obecně je samozřejmě snahou provozovatelů délku kampaně maximálně prodlužovat a dobu odstávky minimalizovat. Je zřejmé, že v době výměny paliva daný blok nevyrábí elektřinu a to se samozřejmě projeví v zisku. Během odstávky však nedochází pouze k výměně paliva. Provádí se také veškeré rekonstrukce, revize, opravy a modernizace, které není možné dělat za provozu. Ač to může pro nezavěčeného čtenáře znít podivně, v době odstávky jaderného bloku, tudíž v době, kdy blok nevyrábí elektřinu, na něm pracuje mnohem více zaměstnanců, než když blok jede na plný výkon.

Odstávka je také limitující faktor při maximální době využití jaderné elektrárny. Budu-li počítat odstávku o délce 30 dní, dostanu se na maximální kapacitu využití 8040 hodin. Toto číslo se však nadále snižuje neplánovanými sníženími výkonu z jakýchkoliv příčin. Kupříkladu jaderná elektrárna Dukovany překonala v roce 2013 svůj dosavadní rekord a zvýšila svou maximální kapacitu využití na 7840 hodin [18].

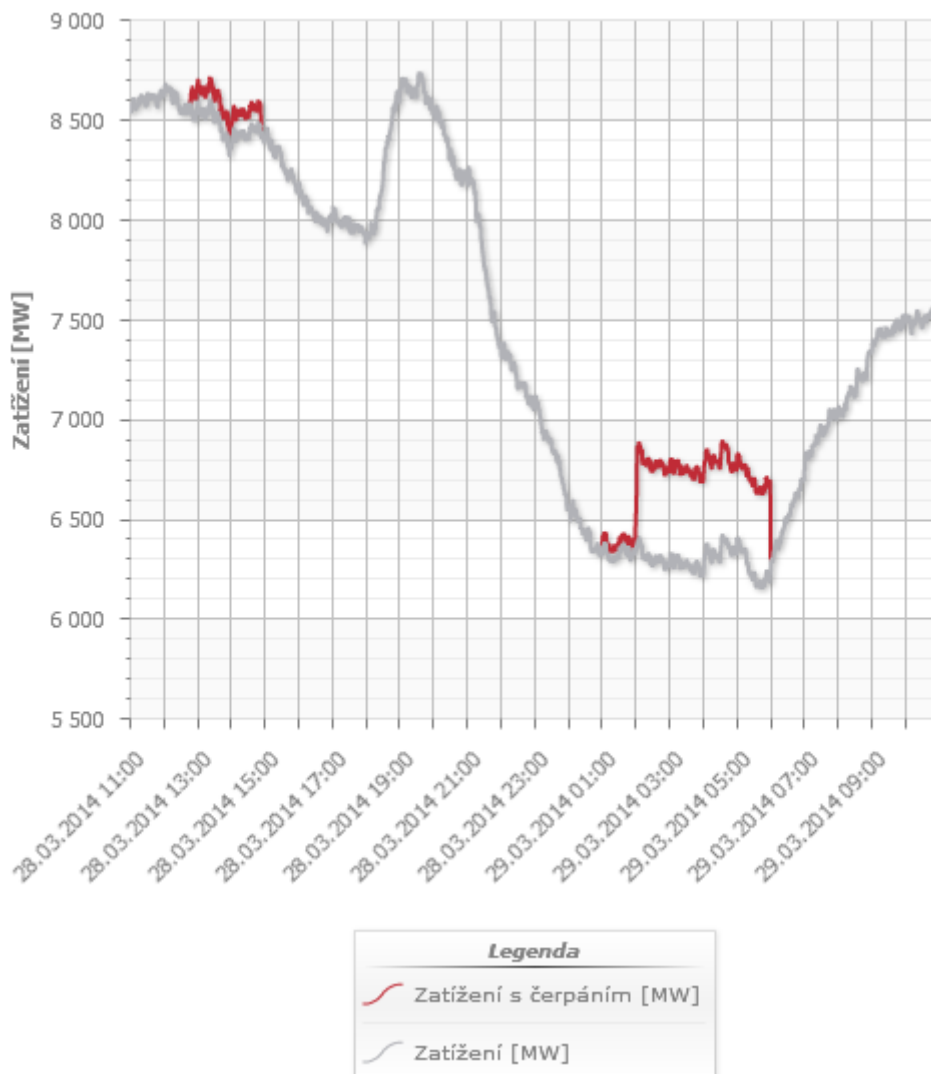
3.4. (Ne)regulovatelnost výkonu jaderné elektrárny

Krátkodobé snížení výkonu reaktoru se dosahuje pomocí regulačních kazet, které při zasunutí do reaktoru sníží počet neutronů v aktivní zóně a zpomalí štěpnou reakci. Stejným mechanismem, ale s větším množstvím kazet, se dosahuje i rychlého odstavení reaktoru, které sice není dokonalé, ale již minutu po odstavení reaktor produkuje pouze kolem 1% tepelného výkonu. Tyto kazety jsou pasivní bezpečnostní prvek. Jsou drženy nad aktivní zónou elektromotory a v případě potřeby, či náhlé ztráty napájení se sesunou do reaktoru samovolně pomocí gravitační síly. Jak postupně jaderné palivo vyhořívá, je potřeba výkon velmi pomalu „zvyšovat“. Toho se dosahuje postupným snižováním koncentrace kyseliny borité v chladící vodě primárního okruhu.

Vidíme tedy, že výkon jaderné elektrárny lze řídit. Tudíž lze provozovat jadernou elektrárnu v režimu proměnného zatížení, jak bylo odzkoušeno i v české jaderné elektrárně v Dukovanech. Tento stav je ale vysoce nežádoucí, protože s sebou přináší hned několik nevýhod. Největší z nich je ekonomická ztráta. Měrné fixní náklady na výrobu elektřiny v jaderné elektrárně jsou poměrně značné, avšak měrné provozní náklady, kam spadá hlavně palivo, jsou spíše nízké. Navíc jaderná elektrárna, postavená, v provozu leckdy už i celkově odepsaná, má jedny z nejnižších výrobních nákladů na jednotku elektrické energie, které by se musely nahradit elektřinou z jiných, mnohdy dražších, zdrojů a tudíž považují za nesmysl jakkoliv snižovat její výkon, obzvláště pokud to nevede k prodloužení kampaně reaktoru. Regulace a zbytečné změny fyzikálních veličin také mohou snížit životnost jednotlivých komponent, což se může projevit jako další náklad na opravu či dokonce může snížit životnost elektrárny jako celku. Toto si samozřejmě uvědomují i vlastníci a provozovatelé jaderných elektráren a je to důvod, proč jaderné elektrárny pracují víceméně nonstop do základního zatížení.

Na následujícím obrázku vidíme, že minimum spotřeby v rámci běžného květnového dne, neklesá pod 6100 MW. V rámci celého roku ovšem hodnota základního zatížení spadá i k 4300 MW. Do této úrovně diagramu tudíž hovoříme o základním zatížení, tedy výkonu, který je potřeba neustále generovat. Přirozeně se ve většině zemí, které disponují jadernými elektrárnami, na pokrytí základního zatížení podílí právě jaderné elektrárny (viz výše). Doplněk do základního zatížení, průměrného zatížení či špičkového zatížení by dle správného fungování trhu měly doplňovat elektrárny postupně dle vzrůstajících cen, za které jsou schopny elektřinu dodávat. Bohužel tento princip je v současné době narušen podporovanými a protlačovanými obnovitelnými zdroji energie (OZE). Výkup elektřiny vyrobené v těchto zdrojích je povinný a tudíž mají významný vliv na nasazování a odstavování ostatních zdrojů do a ze soustavy. Ze

zdrojů, které dříve spadaly do skupiny pokrývající základní zatížení, se stávají zdroje, které se mnohdy musí využívat jen pro špičkové zatížení, a proto část dne buď nevyrábí, nebo vyrábí na snížený výkon. To samozřejmě vede ke snížení zisku pro vlastníka elektrárny. Ne vždy to však vede nutně ke snížení zisku. V poslední době se čím dál častěji vyskytuje na burze elektřina za výrazně zápornou cenu, pocházející většinou z Německa. Pokud je tato cena dostatečně nízká, může se vlastníkovi vyplatit i snížení výkonu jaderné elektrárny.



Obrázek 3-3 Denní diagram zatížení v ČR včetně čerpání [26]

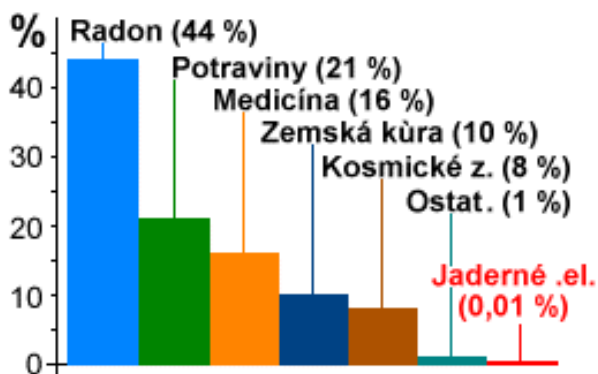
3.5. Bezpečnost

Dle mého názoru je jaderná energetika nadmíru bezpečná a ve srovnání s jinými druhy elektráren, potažmo celým odvětvím průmyslu, se jí velmi křivdí. Jaderná elektrárna během svého provozu nevypouští do ovzduší škodliviny jako CO_2 , NO_x či SO_2 , tudíž nezhoršuje kvalitu

ovzduší, nezpůsobuje kyselý dešť a celkově jsou její dopady na lidstvo jako celek minimální. Emise CO₂ jsou vypouštěny jen při výstavbě a odstavení elektrárny a také při výrobě paliva. Avšak při přepočtu na jednotku vyrobené energie je to zanedbatelné množství.

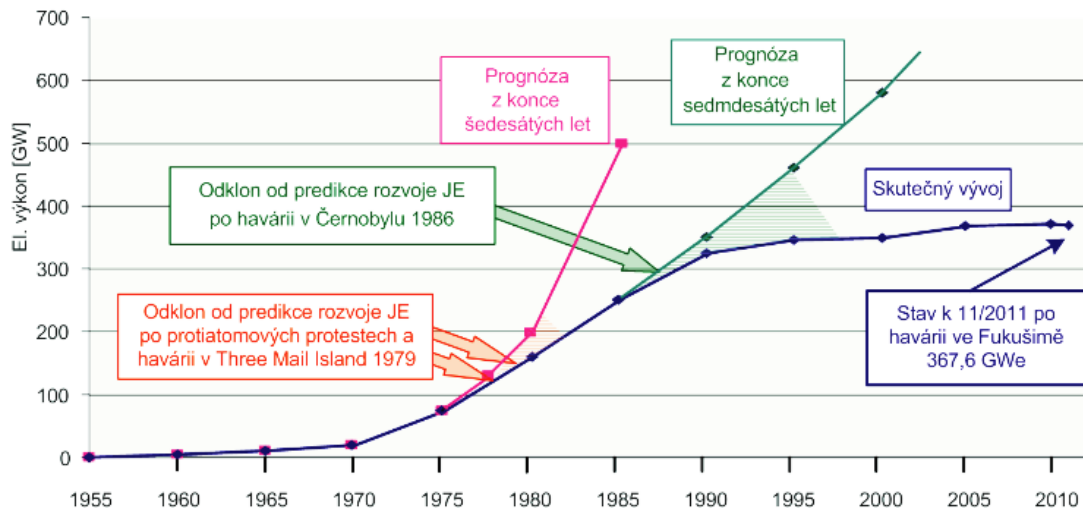
Také plochy zasažené těžbou paliva jsou nesrovnatelně menší než plochy zasažené těžbou fosilních paliv. A jak již jsem zmínil výše, odpadu je také méně, ovšem nakládáním s ním je nákladnější a podléhá většímu dohledu.

Jelikož jsou jaderné elektrárny velmi dobře zabezpečeny proti úniku ionizujícího záření, je dávka, kterou obdrží organismus každého z nás díky jaderným elektrárnám, naprosto zanedbatelná. Nejvyšší přípustný limit ozáření běžného občana České republiky je legislativně nastaven na 5 mSv, přičemž umělé zdroje nám dohromady dají dávku 0,01 mSv. Na našem ozáření se z umělých zdrojů nejvíce podílí medicína: rentgeny, CT vyšetření, diagnostika a léčba nádorových onemocnění. Většina z dávky, kterou člověk za život obdrží, však pochází z přírodních zdrojů. Z kosmického záření, z potravin a vody, ze zemské kůry, z uhlí a ropy, radon z rozpadu uranu a dokonce i z draslíku K⁴⁰, který je obsažen přímo v našem těle.



Obrázek 3-4 Podíl jednotlivých zdrojů na celkové dávce ozáření člověka [18]

Mezi zásadní možnost radičního ohrožení patří bezpochyby jaderná havárie. Dle stupnice MAAE se jaderné havárie klasifikují podle sedmi stupňů. Nejhorší stupeň číslo 7 se jmenuje velmi těžká havárie a k jeho naplnění došlo jen dvakrát v historii lidstva (Černobyl a Fukušima – viz bod 2). Nejvyšší vyhlášený stupeň u nás byl v roce 1977 v elektrárně Jaslovské Bohunice stupeň 4 – havárie bez vážnějšího vlivu na okolí. Samozřejmě, že jaderná havárie má trvalé, především lokální důsledky. Těžké lokální havárie se mohou přihodit i v chemickém průmyslu, např. indický Bhópál (tisíce mrtvých, statisíce s trvale poškozeným zdravím), ale po takovéto havárii se vlna paniky ohledně přehodnocování bezpečnosti závodů, jejich zavírání či další omezení, nezvedne. Osobně si myslím, že to je další důkaz křivdy vůči jaderné energetice. Vliv havárií na výstavbu nových zdrojů je patrný na následujícím obrázku.



Obrázek 3-5 Predikovaný a skutečný instalovaný výkon v provozovaných JE [1]

Samozřejmě je v zájmu všech jaderným haváriím předcházet. Z tohoto důvodu elektrárny disponují mnoha aktivními i pasivními bezpečnostními prvky, jako jsou například dvojitý kontejnment a několikanásobné jištění všech systémů – nejméně trojnásobné. V případě výpadku elektrické energie jsou k dispozici výkonné dieselaagregáty a baterie schopné udržet v provozu čerpadla pro dochlazování reaktoru po dobu několika dní. Avšak jak nám ukázala Fukušima, i toto opatření může selhat. S tím ovšem už počítají reaktory nové generace (jako je AP1000), které dokáží reaktor dochladit pomocí pasivních bezpečnostních prvků, tudíž bez nutnosti dodávky elektrické energie (viz bod 1).

Stát ovšem nenechává jadernou bezpečnost pouze na vlastníciích a provozovateliích jaderných elektráren. V České republice licence pro provoz jaderné elektrárny uděluje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) dle velmi přísných kritérií. Krom udělování licencí provádí SÚJB také časté kontroly a zodpovídá za jadernou bezpečnost České republiky na mezinárodním poli. O použité jaderné palivo se stará, také státní, společnost Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Každý producent radioaktivního odpadu posílá, v závislosti na množství, peníze na jaderný účet, které poté SÚRAO vhodně použije na likvidaci nebezpečných radioaktivních odpadů.

Mezi další bezpečnostní rizika bezpochyby patří možnost zneužití paliva pro jaderné elektrárny teroristy či rizikovými státy například na výrobu atomové bomby. Z tohoto důvodu se pro civilní účely používá nízkoobohacené palivo s podílem U235 pod 5%, které nelze bez dalšího obohacení použít k výrobě atomové bomby. Technologická i energetická obtížnost obohacování v tomto smyslu napomáhá menší zneužitelnosti atomové energie teroristy. Přesto je třeba nepodceňovat, a naopak obzvláště dbát, na bezpečnost při transportu

jaderného paliva. Tento point je zahrnutý i v publikaci A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems Mezinárodního fóra pro generaci IV a patří mezi jednu z priorit pro vývoj nových jaderných reaktorů. Do této chvíle ve světě naštěstí nedošlo k použití jaderné zbraně vyrobené z ukradeného jaderného materiálu teroristy ani rizikovými státy, ikdyž některé z nich pravděpodobně vyvíjí vlastní jaderné zbraně pod záminkou mírového využití jádra. Šíření jaderných zbraní se snaží zabránit několik států i nadnárodních organizací, to ale přímo nesouvisí s jadernými elektrárnami.

Jak jsem již řekl, následky jaderné havárie a provozu jaderných elektráren jsou v celosvětovém měřítku spíše lokální. Alespoň oproti nejrozšířenějším uhelným elektrárnám. Uhelná elektrárna škodí v několika ohledech. Nejprve samotná těžba uhlí – devastuje krajinu a v budoucnu bude muset být vynaložena nemalá finanční suma na rekultivaci bývalých, obzvláště povrchových, dolů. Dále při samotném provozu uhelné elektrárny dochází k exhalaci mnoha více či méně škodlivých plynů, které zhoršují kvalitu ovzduší či přispívají ke skleníkovému efektu, který vede k oteplování planety a tudíž ke zvyšování hladiny oceánů, což přinese v budoucnu nevyčíslitelnou potřebu nákladů na zmírnění následků. Ovšem už i v současné době lidstvo nese následky znečištěného ovzduší. V roce 2012 bylo 12,5% veškerých úmrtí na planetě Zemi způsobeno znečištěným ovzduším [27]. Tudíž znečištěné ovzduší se stalo jedním z velmi vážných problémů lidstva. Samozřejmě si uvědomuji, že toto znečištění nezpůsobují jen uhelné elektrárny, ale například pravidelné smogové problémy ve vybraných oblastech ČR dokazují, že se na něm z velké části podílejí. Ve světle těchto faktů mi například stále nejde do hlavy německý přechod z jaderných elektráren na uhelné.

3.6. Vysoké investiční náklady

Jaderné elektrárny se také značně odlišují vysokými náklady potřebnými na vybudování. Overnight costs nyní ve světě vychází na \$1500-6000/kW. Závisí na mnoha faktorech, které se odvíjí většinou od politicko-geografické situace. Pro Českou republiku tyto náklady vychází přes \$5000/kW. Tyto náklady za poslední dvě dekády vzrostly více než dvojnásobně dle mého názoru hlavně z důvodu zakrnění celého jaderného odvětví, kdy se v západním světě jaderné elektrárny téměř nebudovaly. Tyto náklady jednoznačně převyšují náklady na výstavbu uhelných či plynových elektráren. Ale jakmile je jednou elektrárna postavena, její variabilní náklady jsou (v poměru s uhelnými a plynovými) nízké a elektřina je vyráběna poměrně levně a bylo by nesmyslné funkční elektrárnu trvale či pravidelně bezdůvodně, kvůli regulaci, odstavovat.

4. Tržní uplatnění elektřiny vyráběné v současných jaderných zdrojích, Contract for Difference

V této části se zabývám možnostmi uplatnění elektřiny vyráběné v jaderných zdrojích, které je v současné době lidstvo schopné postavit, na trhu. Pro výpočet výnosnosti investice jsem využil čistou současnou hodnotu (net present value – NPV). Jelikož se v současné situaci jeví investice do nového jaderného zdroje jako nevýhodná, a já záporný výsledek svého výpočtu očekávám, tak se také zabývám možnostmi dlouhodobé podpory takovéto investice pomocí mechanismu Contract for Difference (CfD).

4.1. Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota (net present value – NPV) je jedno z rozhodovacích kritérií při výběru investice. Je to kritérium absolutní s uvažováním časového rozložení hotovostní toků (Cash flow – CF). Vztah pro výpočet NPV je následující:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t * (1 + r)^{-t} , \text{ kde}$$

CF_t ... hotovostní tok v roce t ,

r ... diskont,

T ... doba životnosti investice.

Vidíme tedy, že čistá současná hodnota je součet diskontovaných hotovostních toků v jednotlivých letech. NPV lze také spočítat jako součet hotovostních toků od prvního roku života investice při odečtení velikosti investice:

$$NPV = \sum_{t=1}^T CF_t * (1 + r)^{-t} - I , \text{ kde}$$

I ... počáteční investice v roce $t = 0$.

Kritériální podmínka nám říká, že chceme mít hodnotu NPV co největší. Vybírám-li tedy z několika možných vzájemně se vylučujících investic, tak vyberu tu s nejvyšší čistou současnou hodnotou. Mám-li se rozhodnout, zda uskutečním investici či nikoliv, realizuju ji tehdy, pokud mám nezáporné NPV.

Mezi výhody kritéria NPV patří, že nám z investic správně vybere tu nejvýhodnější a jelikož je absolutní, tak nám i řekne příspěvek k hodnotě firmy. Jako nevýhodu vidím možné zmatení při porovnávání investic s rozdílnou délkou trvání. Tuto nevýhodu nám odstraňuje kritérium RCF, k jehož výpočtu nicméně stejně potřebujeme znát NPV investic.

Já jsem si pro další výpočty zvolil kritérium NPV právě pro jeho výhody a jeho poměrně snadnou spočítatelnost v tabulkových kalkulátorech. Vzhledem k tomu, že v první fázi výpočtu očekávám, že projekt nenaplní očekávání investora, upřednostnil jsem názornější NPV před kritériem IRR. NPV je také kritériem absolutním, což se náramně hodí pro mé další výpočty, hlavně výpočet výše Contract for Difference.

4.2. Contract for Difference

Obecně lze Contract for Difference (CfD) popsat jako dohodu mezi kupujícím a prodávajícím o dorovnání rozdílu mezi současnou hodnotou podkladového aktiva a hodnotou v době uzavření CfD. Znamená tedy, že pokud byla hodnota aktiva v době uzavření CfD nižší než současná hodnota musí rozdíl doplatit prodávající kupujícímu. Při nižší současné hodnotě je tomu přesně naopak. Cílem tohoto mechanismu je přimět investory spekulovat na pohybech cen podkladového aktiva, avšak bez nutnosti toto aktivum vlastnit.

Přeneseme-li tento mechanismus do energetického odvětví, konkrétně tedy jako nástroj pro zajištění dlouhodobé ekonomické návratnosti, může CfD posloužit i jako motivace a popud pro investory, aby investovali do výstavby elektráren s nízkouhlíkatými technologiemi.

V praxi by tedy CfD fungovalo tak, že v případě, kdy by byla tržní cena elektřiny pod nastavenou nákladovou cenou, by byl rozdíl placen zákazníkem (reprezentován státem) výrobcí elektřiny (formou vyrovnávací platby). V opačném případě, kdy by cena elektřiny na burze byla nad požadovanou nákladovou cenou, by rozdíl vyplácel výrobce zákazníkům. Vyrovnávací platby jsou uvažovány za vyrobenou MWh elektřiny. Doba trvání vyrovnávacího režimu by měla být nastavena jako kompromis mezi zájmy investora a zákazníkem. Všeobecně se hovoří o době přibližně 30 let.

Takový to podpůrný nástroj přináší mnoho výhod:

- Tento mechanismus z investora snímá dlouhodobé riziko volatility ceny elektřiny. Bohužel ovšem nesnímá všechna rizika, a to zejména ta politická, která jsou v souvislosti s jadernými elektrárnami k vidění poměrně často a většinou mají také zásadní dopady.

- Contract for Difference může být využit pro všechny nízkouhlíkové zdroje (například i obnovitelné zdroje), pokud by toto bylo nutné k dosažení národních zelených politiky-vytyčených cílů.
- Jelikož eliminuje tržní riziko volatility cen elektřiny na burze, stává se CfD nástrojem motivace pro investory k výstavbě výrobních zdrojů a následné výrobě elektřiny.
- Pokud se správně nastaví výše nákladové ceny, tak bude dlouhodobý vliv na zákazníka finančně neutrální či pozitivní. Samozřejmě je ale nevýhodou, že při záporné rozdílové ceně je cel systém financován zákazníkem.
- Nepopíratelnou výhodou je, že systém CfD minimálně narušuje fungování trhu, jelikož nutí výrobce uplatnit celkovou produkci na trhu za tržní cenu (jelikož vyrovnávací platby jsou uvažovány za vyrobenou MWh, tudíž výše platby je dána vyrobeným objemem). Na druhou stranu ovšem toto zajištění stabilních tržeb na základě CfD může zvýhodňovat výrobce oproti ostatním účastníkům trhu.

Jak jsem již zmínil, pro výpočet tržního uplatnění elektřiny z jaderného zdroje jsem si zvolil metodu NPV a následně bylo potřeba vybrat mechanismus podpory investora. Nabízených mechanismů je několik, jsou to hlavně:

- Garantovaná výkupní cena elektřiny – jedná se o pevně stanovenou výkupní cenu určenou regulátorem mimo trh, tak jak to známe například z nechvalně proslulé podpory OZE v České republice.
- Contract for Difference – jak jsem napsal výše, jde o dorovnání nastavené ceny. Tento mechanismus podpory nízkouhlíkového zdroje elektrické energie funguje ve Velké Británii.
- Dlouhodobá regulace – regulace ceny elektřiny funguje částečně ve Francii a v některých státech USA.
- Financování spotřebiteli – tento mechanismus funguje tak, že vlastníci odebírají většinu vyrobené energie a těží z výhod, které jim to přináší. K vidění u budovaných jednotek EPR.

Já jsem si zvolil mechanismus CfD právě kvůli výše zmíněným výhodám a také proto, že mi přijde z výše vypsanych druhů podpor nejrozumnější a je mi velice sympatická nízká míra zásahu do fungování trhu. Konec konců nejsem sám, komu je tento mechanismus milý a Aktualizovaná státní energetická koncepce (ASEK) navrhuje, aby byl do legislativy tento vyrovnávací mechanismus implementován a pomocí něj došlo k zajištění žádaného

energetického mixu v ČR, který je ASEKem stanoven jako 50 % jaderné zdroje a 19 % obnovitelné zdroje energie.

4.3. Vstupní data a předpoklady pro výpočet NPV a CfD

Pro výpočet čisté současné hodnoty investice do nového jaderného zdroje dle výše popsaných metod je samozřejmě zapotřebí mnoho vstupních hodnot. Některé z nich se dají dohledat ve volně dostupných zdrojích, jiné se nechají odhadnout z trendu posledních let a některé musím já jako autor práce určit sám. Samozřejmě určovat, jakou velikost bude mít konkrétní hodnota například za 50 let, je úkol velmi nesnadný. Jelikož se tyto hodnoty mohou velmi lišit v závislosti na zemi, v které investici zvažujeme, určil jsem si jako lokalitu pro naši investici Českou republiku.

4.3.1. Inflace

Inflace je jedna ze vstupních veličin, jejíž míra se každoročně mění¹ a určovat její výši na dobu 60 let je úkol obtížný. Jako základ pro stanovení inflace jsem vzal průměr inflace za posledních 15 let, tedy po skončení divokých 90. let v naší zemi. Touto hodnotou jsem dospěl k průměrné roční míře inflace na hodnotě 2,5%. Budu tedy předpokládat, že míra inflace bude po celou dobu života investice konstantní a rovna právě této hodnotě. Všechny finanční hodnoty použité k následným výpočtům jsem každoročně navyšoval právě o inflaci. [28]

4.3.2. Diskont

Nominální diskont jsem stanovil na hodnotu 8%. Vycházel jsem z toho, že v České republice se budou postupně uzavírat uhelné elektrárny i jaderná elektrárna Dukovany a tudíž s prodejem vyrobené elektřiny na trhu patrně problém nebude. S čím ovšem problém bude, jsou politické a regulatorní zásahy do odvětví energetiky, jak ze strany vlády, tak ze strany Evropské unie, a tudíž naprostá nestabilita a nejistota ceny elektřiny na burze. Zároveň jsem přihlédl k situaci v České republice a usoudil, že jako investor či zřizovatel nového jaderného zdroje by patrně figuroval stát. V případě podpory by stát figuroval i jako garant.

4.3.3. Výkon

Výkon jaderné elektrárny uvažované v naší investici jsem stanovil na 2000 MW. Přesněji tedy dva bloky po 1000 MW. Počet bloků rozhoduje o ceně investice i například o osobních nákladech. Také je rozdíl, jestli stavíme elektrárnu takřkajíc na zelené louce nebo ji přistavujeme k již fungující jaderné elektrárně s alespoň částečně vybudovanou infrastrukturou, kterou využijeme při přístavbě. Zde jsem si zvolil elektrárnu na zelené louce.

¹ Z dlouhodobého hlediska dokonce ve velmi širokém rozsahu.

4.3.4. Cena projektu

Dle studie OECD vychází cena nového jaderného zdroje v České republice na 200 miliard korun českých. [3] Já jsem ovšem pesimista a nevěřím v hladký a bezproblémový průběh připraveného stavebního projektu, obzvláště u tak složité stavby jako je jaderná elektrárna. Pro podporu mého tvrzení se můžeme podívat na průběh současně stavěných jaderných elektráren ve Finsku a Francii či obecně na průběh velkých stavebních projektů v České republice (dálnice, tunel Blanka,...). Ke všemu sám zadavatel ČEZ i média hovoří o ceně 200 – 300 miliard korun a to ještě u přístavby k fungující JE. Z těchto důvodů jsem si zvolil cenu v polovině tohoto rozpětí a tudíž 250 miliard českých korun.

4.3.5. O&M

O&M z anglického Operation and maintenance, čili provoz a údržba. Opět dle studie OECD z roku 2010 vychází provoz a údržba jaderné elektrárny v České republice na 251,6 české koruny na vyrobenou megawatthodinu elektrické energie při životnosti elektrárny 60 let. [3]

4.3.6. Doba využití

Dobu využití maximálního výkonu jsem stanovil na základě údajů z provozu českých jaderných elektráren v posledních letech na 7500 hodin za rok. Takovouto hodnotu předpokládá i studie OECD. Přestože se doba využití maximálního výkonu u českých jaderných elektráren dlouhodobě zlepšuje, předpokládám, že se nemůže zvyšovat do nekonečna a s přihlédnutím k dlouhodobosti investice a možné nepředvídatelné komplikaci při budoucím provozu elektrárny mi tato hodnota přijde jako zdravý kompromis. Také počítám s předpokladem, že se elektrárna nebude regulovat a kdykoliv to bude technicky možné, pojede na svůj plný výkon. [18] [3]

4.3.7. Cena paliva

Cena za palivo je počítána za celý palivový cyklus. Počínaje vytěžením uranové rudy, přes zpracování, obohacení a zpracování do formy palivových kazet vhodných pro jadernou elektrárnu. Po vyhoření paliva uvažuji, že palivo již nebude přepracováno a znovu použito, a tudíž jsou zahrnuty i náklady na uskladnění použitého paliva až do doby předání SÚRAO. Cena za tento palivový cyklus je 159,3 Kč na vyrobenou MWh. [3]

4.3.8. Odvod na jaderný účet

Jediný provozovatel jaderných elektráren v České republice společnost ČEZ odvádí za každou vyrobenou MWh v jaderné elektrárně 50 korun na tzv. jaderný účet. Správcem tohoto účtu je státní společnost SÚRAO (Správa úložišť radioaktivních odpadů), která následně peníze využije

na finální přepracování a uložení stále vysoce aktivního, a tudíž nebezpečného, vyhořelého paliva nejspíše v hlubinném úložišti. [18] [30]

4.3.9. Cena elektřiny na burze

Cena elektřiny na burze je také jedna z veličin, která se velmi těžko predikuje na 60 let dopředu. Tuto situaci ještě ke všemu výrazně zhoršují politická rozhodnutí naší vlády i rozhodnutí přicházející z Bruselu. Rozhodl jsem se tedy zvolit aktuální cenu za baseloadovou elektřinu na Pražské energetické burze. Cenu za baseload elektřinu proto, protože počítám s tím, že elektrárna bude pracovat do základního zatížení, jak by to u jaderných zdrojů mělo být, ale nemusí (viz. výše). Tato cena se nyní pohybuje okolo 33 euro za MWh. Zvolil jsem tedy jako vstupní hodnotu přesně 33 €. [31]

4.3.10. Výše a doba trvání CfD

Výše nastavení potencionálního Contract for Difference je samozřejmě předmětem mého výpočtu. Tuto hodnotu zjišťuji tak, že uvažuji přesné naplnění očekávání investora, a tudíž čistou současnou hodnotu rovnu nule. Dle aktuální situace v Evropě, zahraničních zkušeností a všemožným odhadům odborníků a médií očekávám výslednou částku mezi 50 a 110 € za MWh vyrobené elektrické energie v současném roce. Také počítám s inflační doložkou a výslednou hodnotu každoročně navyšuji o inflaci.

Doba trvání Contract for Difference bohužel není známa. Jisté je, že CfD nebude nastaven na celou životnost elektrárny, ale pouze na její část. V kuloárech se obecně hovoří o délce okolo poloviny z očekávané a projektované životnosti. Zvolil jsem tedy podporu na délku 30 let.

4.3.11. Náklady na likvidaci

Náklady na likvidaci po skončení provozu jaderné elektrárny jsem po skloubení hodnot z různorodých zdrojů nastavil na výši 60 Kč za vyrobenou MWh. Tuto hodnotu také každoročně navyšuji o inflaci. Při vhodném úročení průběžně spořených peněz např. státními dluhopisy se současná hodnota celkové naspořené částky pohybuje okolo 10% z celkové ceny projektu.

4.3.12. Osobní náklady

V dvoublokové jaderné elektrárně o výkonu 2x1000 MW najde zaměstnání okolo 2000 zaměstnanců včetně najatých externistů. Průměrné měsíční náklady na jednoho zaměstnance jsem stanovil na hodnotu 70 000 Kč. [18]

4.3.13. Ostatní

Také bylo potřeba zvolit několik neméně důležitých vstupních údajů pro výpočet Contract for Difference a zejména čisté současné hodnoty. Prvním z těchto parametrů je životnost. Jak jsem

již zmínil v kapitole 1, u současných realizovatelných reaktorů se obvykle počítá s životností 60 let, toto platí pro reaktory z třetí i čtvrté generace.

S délkou výstavby počítám poněkud optimisticky 5 let. O takovéto délce hovoří i politici a někteří odborníci na energetiku. Otázkou ovšem zůstává, jestli se stavba, jak již bývá v ČR, zvykem neprotáhne klidně i na dvojnásobek. V tomto ohledu věřím dodavateli, že se pokusí předvést co nejlepší výkon.

A nakonec, avšak ne nejméně důležité, jsem mnohdy kvůli údajům od zahraničních institucí a firem potřeboval správně určit kurzy měn. Ve studii OECD byly veškerá čísla v dolarech, ale také byl přiložen dobový kurzovní lístek. Vstupní kurz dolaru je tedy 17,07 CZK/USD. A dále potřebuji pro výpočet kurz eura, protože na evropských energetických trzích se obchoduje v eurech. Zde je vývoj také velmi nejistý, zvolil jsem tedy aktuální hodnotu 27,5 CZK/EUR.

Tabulka 4-1 Vstupní data pro výpočet NPV a CfD při CfD = ceně elektřiny na burze

vstupy:	hodnota:
inflace	2,5%
diskont	8%
výkon (MW)	2 000
cena projektu 2014 (CZK)	250 000 000 000
O&M (CZK/MWh)	251,6
doba využití (hod/rok)	7 500
cena paliva (CZK/MWh)	159,3
odvod na jaderný účet (CZK/MWh)	50
cena elektřiny na burze 2014 (EUR/MWh)	33
výše CfD (EUR)	---
doba CfD (roky)	30
kurz CZK ku EUR	27,5
náklady na likvidaci (CZK/MWh)	60
počet zaměstnanců	2 000
prům. osobní náklady na 1 zaměstnance (Kč)	70 000

4.4. NPV nového jaderného zdroje na území ČR

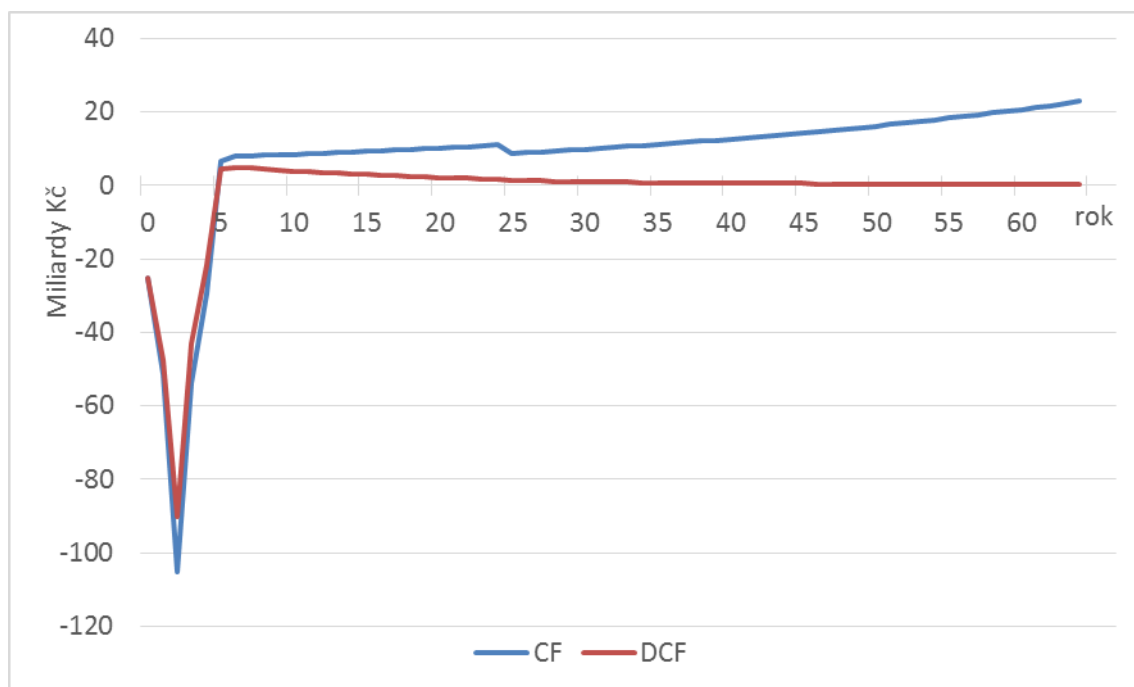
V tabulkovém editoru jsem provedl rozsáhlý výpočet čisté současné hodnoty pro potencionální nově budovaný zdroj na území České republiky dle vstupních parametrů zmíněných v kapitole 4.3.

4.4.1. Postup výpočtu

Postup výpočtu byl následující. Kapitálové výdaje jsem nerovnoměrně rozložil do délky výstavby, se kterou počítám pět let, tak, že postupně v jednotlivých letech počítám s výdaji ve výši 10%, 20%, 40%, 20% a 10% z celkových kapitálových výdajů. Během výstavby jsem také již počítal s osobními náklady a to ve výši 10% budoucích osobních nákladů po dobu prvních čtyřech let a ve výši 100% pro rok pátý.

Dále jsem také dopočítal daň z příjmu a tržby z trhu. Neuvažoval jsem žádné formy podpory, žádné daňové úlevy a ani vliv způsobu financování, tudíž žádné úroky a úmory.

Ze všech těchto hodnot jsem spočítal roční cash flow (CF) jaderné elektrárny, počínaje zahájením výstavby až po ukončení provozu elektrárny, tedy 65 hodnot pro jednotlivé roky.



Obrázek 4-1 Průběh CF a DCF během výstavby a života JE

A z těchto hodnot jsem podle vztahu pro výpočet čisté současné hodnoty vypočítal NPV. Průběh CF a diskontovaného CF (DCF) vidíme na grafu.

4.4.2. Výsledné NPV a zhodnocení výsledku

Na základě výše zmíněného postupu vyšlo výsledné NPV samozřejmě záporně a to bezmála mínus 143 miliard Kč, přesně tedy - 142 848 690 056 Kč.

$$NPV = -142\,848\,690\,056\text{ Kč}$$

Že je výsledná hodnota záporná pravděpodobně nikoho nepřekvapuje. Překvapivé se může zdát, jak moc záporná je, poněvadž dosahuje 57% hodnoty investice. Takováto čísla reflektují, v jakém stavu se nachází celý trh s elektřinou. Také z nich lze jednoznačně vyvodit, že investovat prostředky do vybudování nového jaderného zdroje na území České republiky se v současné době prostě nevyplatí. Změnit to mohou víceméně 3 faktory. Prvním z nich je zlevnění celého projektu na přibližně 79 miliard Kč, což je požadavek vsutku nesmyslný. Dalším faktorem může být zemětřesení na burzách a nárůst ceny silové elektřiny na téměř dvojnásobek na přibližně 69€ za MWh. A poslední možností by byla jakákoliv garance ceny elektřiny, garantována patrně státem nebo Evropskou unií. Jak víme, od dubna 2014 nepřichází v úvahu žádná státní garance cen elektřiny v České republice. Otázkou zůstává, jak dlouho tento stav setrvá, protože přes zavírání elektráren a budoucí nedostatky uhlí se jednou musíme překlenout a nový jaderný zdroj s největší pravděpodobností potřebný bude bez ohledu na cenu. V takovém případě se může český stát dostat pod tlak a je možné, že na rychlosplácaném projektu proděláme ještě více. Garance ze strany Evropské unie je záležitost čistě snová a v nejbližších desetiletích jednoznačně nedosažitelná.

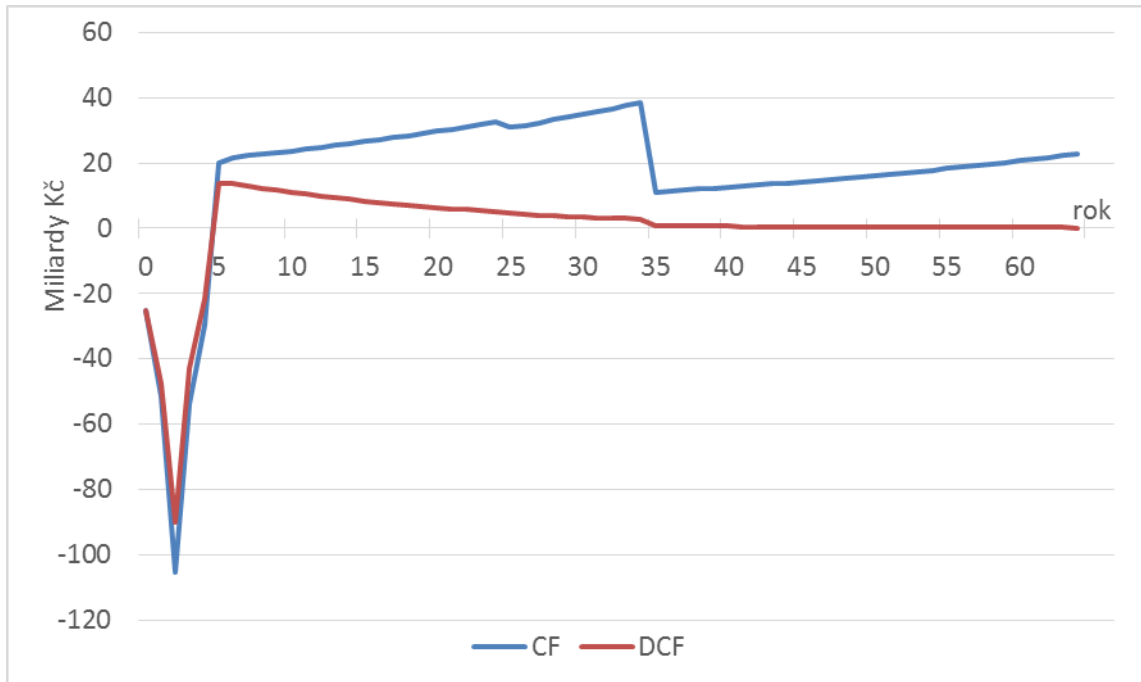
4.5. Contract for Difference pro nový jaderný zdroj na území ČR

Jelikož již jistě vím, že stavba nového jaderného zdroje se na našem území nemůže vyplatit, rozhodl jsem se spočítat potřebnou výši garantované výkupní ceny, při které by se racionálně uvažující investor mohl rozhodnout pro stavbu jaderné elektrárny. Jak jsem již zmínil výše, jako mechanismus financování bych použil Contract for Difference. Vycházím tedy z úvahy, že aby se investorovi jeho záměr vyplatil, musí se naplnit jeho očekávání. Očekávání investora se naplní ve chvíli, kdy bude čistá současná hodnota nezáporná, a tudíž alespoň rovna nule. Tato podmínka je splněna, při diskontu 8%, při minimální výši nastavení Contract for Difference na hodnotu 68,72 €/MWh. Vidíme, že tato hodnota je stále nižší než třetinová oproti garantované odkupní ceně v roce 2012 pro obnovitelné zdroje energie. Nabíze se tedy snadná otázka. Proč jsme místo všech pro Českou republiku nepříliš vhodných solárních panelů a větrných turbín nepostavili nový nízkoemisní stabilní zdroj?

$$CfD = 68,72\text{ €/MWh}$$

Mnou vypočtená hodnota tedy spadá do předem vytyčeného intervalu v kapitole 4.3.

Na následujícím grafu průběhu hotovostních toků při projektu jaderné elektrárny s podpurným mechanismem CfD je výrazně vidět především konec státní garance po uplynutí délky kontraktu.



Obrázek 4-2 Průběh CF a DCF během výstavby a života JE s podporou mechanismem CfD

5. Závěr

Je nezpochybnitelné, že svět se při současných technologiích v budoucnu bez jaderné energetiky neobejde a tudíž je potřeba se tomuto tématu aktivně věnovat. Toto se děje, neustále se vytváří nové a nové projekty jaderných reaktorů III. a III.+ generace. Avšak pro budoucnost celého odvětví je lepší spojit síly a postupovat ve vývoji společně. Proto, jak jsem popsal v kapitole 1, shledávám výhodou, že mezinárodní fórum GIF vytyčilo šest reaktorů, na nichž se bude do budoucna pracovat a které se stanou stěžejními v celém tomto odvětví. Tento krok nejen urychlí celkový rozvoj a vývoj, ale také jistě přinese nemalé ekonomické úspory.

Avšak není možné hledět jenom do budoucna. Je také potřeba dívat se na současnost a učit se z chyb minulých, jako byla například havárie v japonské jaderné elektrárně Fukušima I., která vyústila v rozsáhlé testování evropských jaderných elektráren. Jak jsem popsal v kapitole 2, naštěstí se ukázalo, že všech 145 testovaných reaktorů je z bezpečnostního hlediska na nadstandardní úrovni i ve světovém měřítku a pouze bylo doporučeno provedení kroků vedoucích k ještě větší bezpečnosti a robustnosti elektráren. Náklady na splnění těchto kroků jsou vyčísleny na asi 25 miliard eur, za což by se daly postavit dvě úplně nové jaderné elektrárny. Většina z kroků již byla provedena. Tuto částku také navyšuje fakt, že se nehledí na pravděpodobnost udání příčiny, tudíž že například české jaderné elektrárny musí být chráněny i proti povodni.

Specifika výroby elektřiny v současných jaderných zdrojích mají velký vliv na provoz jaderné elektrárny, bezpečnost a také na její znázornění v očích veřejnosti, tudíž i politiků. Tyto vlivy, které jsem popsal v kapitole 3, jsou zásadní, ale racionální člověk, který by věnoval trochu času přečtení faktů o jaderných elektrárnách, si nemůže přát jejich uzavření či bezjadernou udržitelnou budoucnost pro lidstvo.

Bohužel musím zkonstatovat, že přes všemožné tržní deformace způsobující velice nízkou cenu silové elektřiny na burze v kombinaci s velice nákladnou výstavbou a současných technologiích se realizace projektu na výstavbu nové jaderné elektrárny na území České republiky nevyplatí. Jak jsem dle kapitoly 4 spočítal, čistá současná hodnota takového projektu vychází téměř na - 143 miliard Kč. Je tedy zřejmé, že takovouto investici bez státních nebo jiných garancí nikdo neuskuteční.

Jedna z možných forem podpory byla možnost užití mechanismu Contract for Difference. Pro naplnění ekonomických očekávání investora by musel být mechanismus nastaven na dobu trvání 30 let při výši kontraktu 68,8 €/MWh. Věřím, že na tuto formu podpory v České

republiky jednou dojde, nejen pro mnohé výhody popsané v kapitole 4, ale také protože věřím, že budoucí uzavírání elektráren a nedostatek uhlí se vláda rozhodne překlenout právě výstavbou nového jaderného zdroje. Jen doufám, že se s výstavbou nezačne, až když bude energetická krize na spadnutí a projekt na dostavbu Temelína se nezmění na jeden nejmenovaný pražský tunel.

Seznam použité literatury

- [1] Jaroslav Doležal, Jiří Šťastný, Jan Špetlík, Stanislav Bouček, Zbyněk Brettschneider: Jaderné a klasické elektrárny
- [2] Tomáš Burcl – Podnikohospodářská fakulta VŠE: Analýza vlivů dostavby JETE a jejich zhodnocení ve vazbě na cenu energie a trh v Evropě a České republice
- [3] International Energy Agency, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development: Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition (anglicky)
- [4] Patočka Jakub, Citibank: Jaderná energetika nemá ekonomickou perspektivu [online]. Deník Referendum, 15. 02. 2010
- [5] Stephen M. Goldberg and Robert Rosner: Nuclear reactors: Generation to Generation (anglicky)
- [6] Jan Forsythe: 3 R's of Nuclear Power: Reading, Recycling, Reprocessing, str. 126 (anglicky)
- [7] David Hinds and Chris Maslak, Next-generation nuclear energy: The ESBWR (anglicky)
- [8] Tomáš Bílý - Katedra jaderných reaktorů FJFI ČVUT v Praze: Jaderné reaktory blízke i vzdálené budoucnosti
- [9] Stanislav Bouček, Robert Vesecký - FEL ČVUT v Praze: Priority jaderné energetiky z hlediska vývoje reaktorů
- [10] Vladimír Wagner - ÚJF AVČR Řež a FJFI ČVUT v Praze: Reaktory IV generace aneb jak by mohla jaderná energetika vypadat zhruba za dvacet až čtyřicet let
- [11] Vladimír Wagner - ÚJF AVČR Řež a FJFI ČVUT v Praze: Japonsko: přírodní katastrofa zasáhla čtyři jaderné elektrárny
- [12] Robert Vesecký - FEL ČVUT v Praze: Jaderné reaktory IV generace
- [13] AP1000 Nuclear Power Plant - Global Experience and UK Prospects" (presentation), Westinghouse UK , vydáno 14. května 2011 (anglicky)
- [14] Areva Brochure EPR 2005 (anglicky)
- [15] SÚJB: Národní zpráva „Zátěžové zkoušky“ JE Dukovany a JE Temelín Česká republika Hodnocení bezpečnosti a bezpečnostních rezerv ve světle havárie JE Fukushima
- [16] ČEZ a.s. - Závěrečná zpráva zt EDU
- [17] ČEZ a.s. - Závěrečná zpráva zt ETE
- [18] <<http://www.cez.cz>> Skupina ČEZ
- [19] <<http://www.magnoxsites.co.uk>> Nuclear Decommissioning Authority (anglicky)

[20] <<http://www.power-technology.com>> News, views and contacts from the global Power industry (anglicky)

[21] <<http://decarbonisesa.com/>> Decarbonise South Australia (anglicky)

[22] <<http://proatom.luksoft.cz>> Proatom web

[23] <<http://www.stresstest.cz>> Co Vás zajímá o zátěžových testech jaderných elektráren

[24] <<http://www.aktivnizona.cz>> On-line magazín zpravodaje Jaderné elektrárny Dukovany

[25] <<http://www.iaea.org>> International Atomic Energy Agency

[26] <<http://www.ceps.cz>> Česká přenosová soustava

[27] <<http://www.who.int>> Světová zdravotnická organizace

[28] <<http://www.czso.cz>> Český statistický úřad

[30] <<http://www.surao.cz>> Správa úložišť radioaktivních odpadů

[31] <<http://www.pxe.cz>> Power Exchange Central Europe

[32] <<http://www.hellfirez.de>> Erzeugung von elektrischer Energie allgemein und anhand verschiedener Beispiele

[33] <<http://radiovody.wz.cz>> Stránka o radioaktivních vodách

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1-1 Vývoj jaderných reaktorů (upraveno) [18]	10
Obrázek 1-2 Schéma elektrárny s reaktorem ABWR (upraveno) [22]	13
Obrázek 1-3 Schéma elektrárny s reaktorem CANDU [18]	14
Obrázek 1-4 Schéma elektrárny s reaktorem VVER [22]	15
Obrázek 1-5 Schéma elektrárny s reaktorem EPR (upraveno) [14]	17
Obrázek 1-6 Modul mPower [21]	20
Obrázek 2-1 Zasažené jaderné elektrárny [11]	24
Obrázek 2-2 Kontejnment Mark 1 používaný v JE Fukušima I [11]	26
Obrázek 3-1 JE s tlakovodním reaktorem [32]	30
Obrázek 3-2 Palivový cyklus JE (upraveno) [33]	32
Obrázek 3-3 Denní diagram zatížení v ČR včetně čerpání [26]	34
Obrázek 3-4 Podíl jednotlivých zdrojů na celkové dávce ozáření člověka [18]	35
Obrázek 3-5 Predikovaný a skutečný instalovaný výkon v provozovaných JE [1]	36
Obrázek 4-1 Průběh CF a DCF během výstavby a života JE	45
Obrázek 4-2 Průběh CF a DCF během výstavby a života JE s podporou mechanismem CfD	47

Seznam tabulek

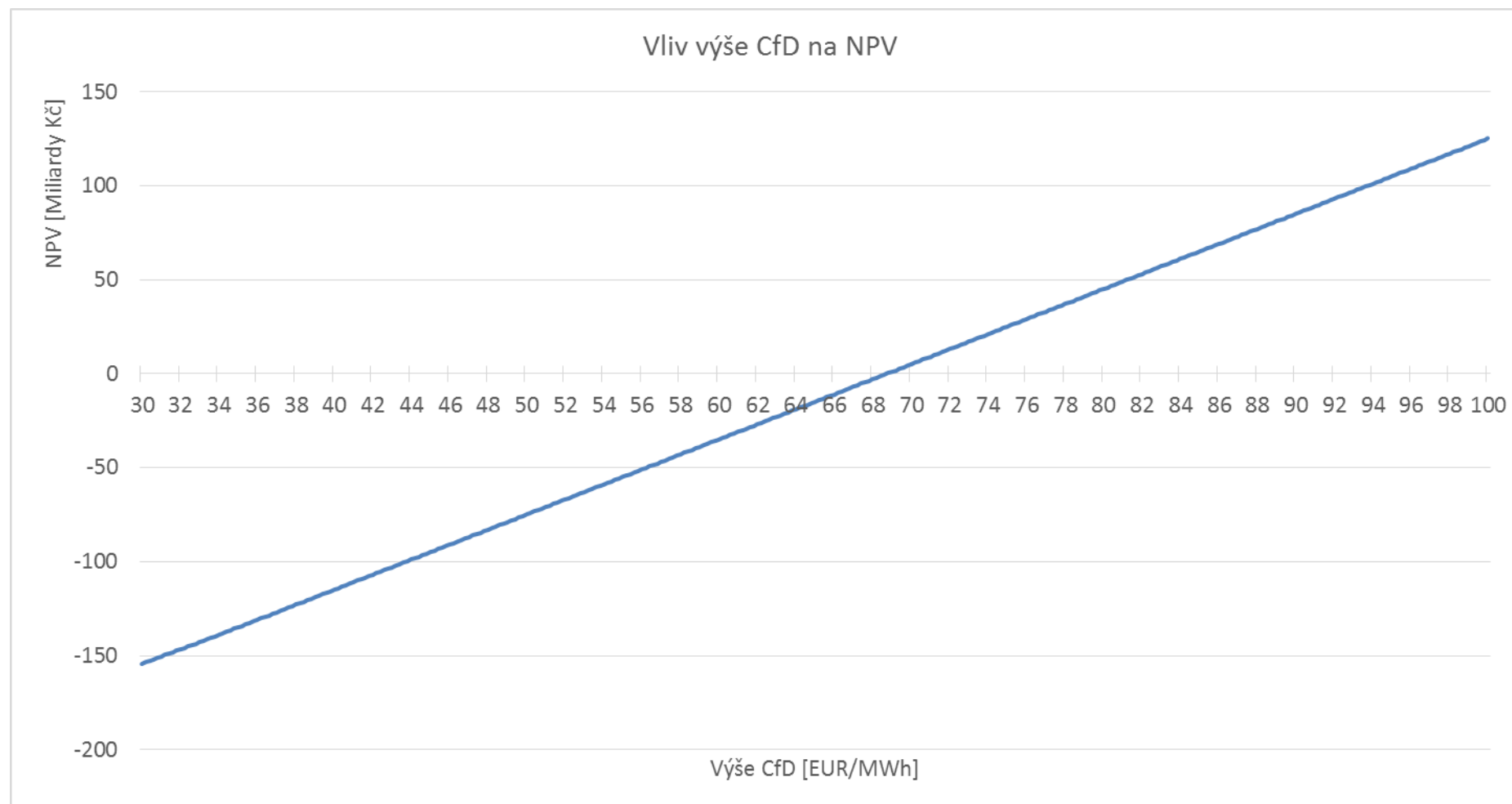
Tabulka 1-1 Vybrané parametry šesti základních typů reaktorů generace IV [12]	23
Tabulka 2-1 Ukázka výsledků statisticky vypočtených extrémních klimatických jevů v oblasti JE Dukovany ze Závěrečné zprávy z jaderné elektrárny Dukovany [16]	29
Tabulka 2-2 Ukázka nálezu bezpečnostních rezerv ze Závěrečné zprávy z jaderné elektrárny Temelín [17]	29
Tabulka 4-1 Vstupní data pro výpočet NPV a CfD při CfD = ceně elektřiny na burze	44

Seznam příloh

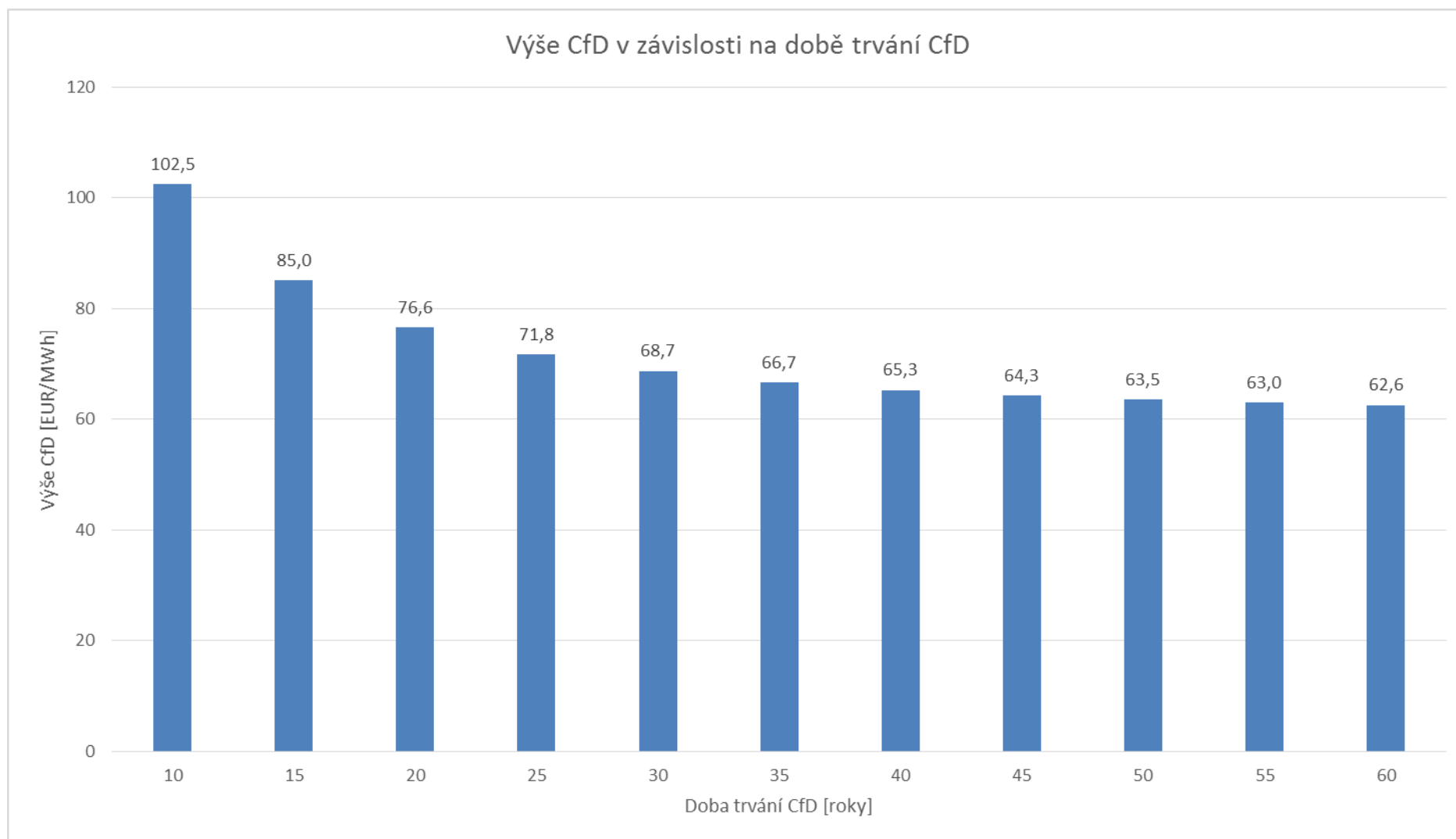
Příloha 1 Citlivostní analýza závislosti NPV na výši CfD	53
Příloha 2 Citlivostní analýza výše CfD při různé délce kontraktu a požadavku NPV = 0	54
Příloha 3 Citlivostní analýza NPV projektu pro různý nominální diskont	55
Příloha 4 Citlivostní analýza výše CfD v závislosti na diskontu při podmínce NPV = 0	56
Příloha 5 CD obsahující modelaci výpočtu v tabulkovém kalkulátoru	

Přílohy

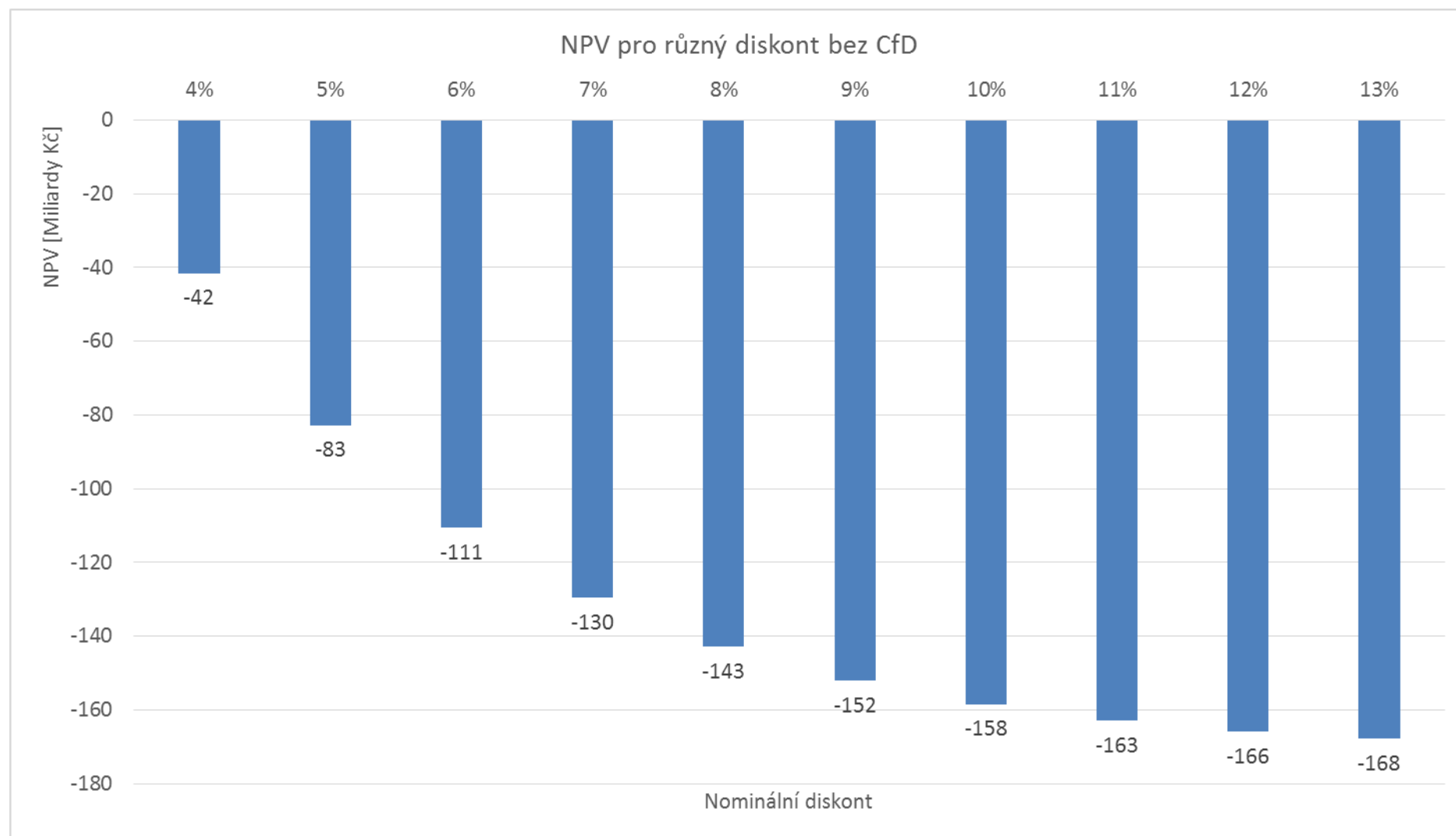
Příloha 1 Citlivostní analýza závislosti NPV na výši CfD



Příloha 2 Citlivostní analýza výše CfD při různé délce kontraktu a požadavku NPV = 0



Příloha 3 Citlivostní analýza NPV projektu pro různý nominální diskont



Příloha 4 Citlivostní analýza výše CfD v závislosti na diskontu při podmínce NPV = 0

