

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta
Katedra rozvojových studií

Kateřina Racková

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE
V ROZVOJOVÝCH ZEMÍCH**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Doc. RNDr. Pavel Nováček, CSc.

Olomouc 2011

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracovala samostatně a veškeré použité zdroje jsem uvedla v seznamu literatury.

V Olomouci

Podpis

Ráda bych poděkovala Doc. RNDr. Pavlu Nováčkovi, CSc. za jeho cenné rady a připomínky.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
Přírodovědecká fakulta
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kateřina RACKOVÁ**
Osobní číslo: **R08362**
Studijní program: **B1301 Geografie**
Studijní obor: **Mezinárodní rozvojová studia**
Název tématu: **Možnosti využití jaderné energie v rozvojových zemích**
Zadávací katedra: **Katedra rozvojových studií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je zjistit, zda může být jaderná energie využita v rozvojových zemích, jaké překážky brání jejímu využití a jaký vývoj lze očekávat v nejbližší budoucnosti. Součástí práce bude objasnění výhod, které jaderná energie nabízí, ale také nevýhod, které přináší, a to ve srovnání s jinými energetickými zdroji, především z hlediska environmentálního, možnosti využití pro rozvoj a řešení světové energetické krize.

Osnova

1. Úvod
2. Cíle a metody práce
3. Energetická krize
4. Historie a současnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země
5. Výhody využití jaderné energie ve srovnání s jinými zdroji
6. Nevýhody využití jaderné energie ve srovnání s jinými zdroji
7. Budoucnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země
8. Závěr
9. Případné přílohy
10. Seznam literatury

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **10 - 15 tisíc slov**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury: **viz příloha**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. RNDr. Pavel Nováček, CSc.**
Katedra rozvojových studií

Datum zadání bakalářské práce: **12. května 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2011**

L.S.

Prof. RNDr. Juraj Ševčík, Ph.D.
děkan

Doc. RNDr. Pavel Nováček, CSc.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 12. května 2010

Příloha zadání bakalářské práce

Seznam odborné literatury:

BRENNAN, Scott, WITHGOTT, Jay. Environment : The Science Behind the Stories. [s.l.] : Pearson Education, 2005. 641 s.

KADRNOŽKA, Jaroslav. Globální oteplování země. [s.l.] : VUTIUM, 2008. 467 s.

MURRAY, Raymond L. Nuclear Energy : An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes. 5th edition. [s.l.] : Butterworth Heinemann, 2000. 490 s.

Greenpeace International [online]. 2010 [cit. 2010-05-06]. End the nuclear age. Dostupné z WWW: <<http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/nuclear/tab=4&page=2>>.

International Atomic Energy Agency (IAEA) [online]. Copyright 2003-2009 [cit. 2010-05-06]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Dostupné z WWW: <<http://www.iaea.org/index.html>>.

Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Nuclear Energy Agency [online]. c2010 [cit. 2010-05-06]. OECD Nuclear Energy Agency. Dostupné z WWW: <<http://www.nea.fr/>>.

World Nuclear Association [online]. [2009] [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.world-nuclear.org/>>.

Abstrakt

Masivní expanze jaderné energetiky právě probíhá v Číně a v Indii. V nedávné době začalo o zavedení jaderné energie uvažovat i několik desítek dalších rozvojových zemí, které mají různý potenciál uspět. Cílem této práce je zjistit, jaká budoucnost čeká jadernou energii v rozvojových zemích. Práce nejprve popisuje příčiny nukleární renesance ve světě, tkvící v blížící se energetické krizi. Dále jsou analyzovány nejvýznamnější kontroverzní aspekty jaderné energie, které mohou silně ovlivnit budoucnost jejího využití: environmentální a ekonomické aspekty, udržitelnost, energetická bezpečnost, jaderný odpad, bezpečnost, proliferace a názor veřejnosti. Poté se zabývá historickým vývojem, současným stavem i prognózami rozvoje jaderných programů vybraných rozvojových zemí: Číny, Indie, Jihoafrické republiky a Brazílie. Poslední část je věnována prognózám vývoje jaderné energetiky ve světě, především v zemích, které prozatím jaderné elektrárny nemají, ale zvažují jejich výstavbu. V závěru je zmíněn pravděpodobný technologický vývoj a jeho vliv na rozvojové země.

Klíčová slova: jaderná energie, rozvojové země, energetická krize

Abstract

Currently a massive expansion of nuclear power utilization is under way in China and India. Recently dozens of developing countries have expressed interest in considering the introduction of nuclear power. Those countries have different potential to proceed. The thesis aims to uncover the possible future role of nuclear power in developing countries. This thesis firstly describes the causes of global nuclear renaissance which inhere in the approaching energy crisis. Further the most significant controversial aspects of nuclear energy that have considerable potential to determine the future of nuclear energy in the world, are analysed. Those ones are the environmental and economic aspects, sustainability, energy security, nuclear waste, safety, proliferation and public acceptance. Then the thesis deals with the historical progress, current situation and forecasts of nuclear programmes development of selected countries: China, India, South Africa and Brazil. The last part of the thesis debates future nuclear development in newcomer countries. The thesis concludes with speculation concerning technological innovations and their eventual influence on developing countries.

Keywords: nuclear power, developing countries, energy crisis

Obsah

Seznam grafů a tabulek	10
Seznam použitých zkratk	11
Seznam použitých jednotek	13
1. Úvod	14
2. Metodika a přehled literatury	16
3. Energetická krize	17
3.1 Spotřeba energie.....	17
3.1.1 Získávání a spotřeba energie v historii.....	17
3.1.2 Výroba a spotřeba energie v současnosti	18
3.1.3 Očekávaný vývoj výroby a spotřeby energie v budoucnosti.....	20
3.2 Význam energie	23
3.2.1 Vztah mezi spotřebou energie a ekonomickým růstem.....	23
3.2.2 Vztah energie a ostatních globálních problémů	24
3.3 Energetická krize.....	24
3.3.1 Vztah mezi výrobou elektrické energie a emisemi, vztah mezi emisemi a změnou klimatu	25
3.3.2 Vyčerpatelnost zdrojů	26
3.3.3 Možnosti řešení energetické krize.....	27
4. Nejvýznamnější aspekty využití jaderné energie ve srovnání s jinými zdroji	30
4.1 Environmentální aspekty a škody na zdraví.....	31
4.2 Ekonomické aspekty	33
4.3 Udržitelnost	35
4.4 Energetická bezpečnost.....	37
4.5 Jaderný odpad	38
4.6 Bezpečnost	40
4.7 Proliferace	42
4.8 Názor veřejnosti	44
5. Historie a současnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země.....	45
5.1 Historie jaderné energie	45
5.2 Jaderná energie v současnosti	46
5.2.1 Jaderná energetika ve světě.....	46
5.2.2 Jaderná energetika v rozvojových zemích	47
5.2.2.1 Indie	47

5.2.2.2	Čína	50
5.2.2.3	Jihoafrická republika.....	52
5.2.2.4	Brazílie	53
6.	Budoucnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země	55
6.1	Prognózy využití jaderné energie ve světě.....	55
6.2	Prognózy využití jaderné energie v zemích, které zatím jaderné elektrárny nemají ...	56
6.3	Faktory ovlivňující budoucí využití jaderné energie.....	58
6.4	Předpoklady pro zavedení jaderné energie do nových zemí	59
6.4.1	Legislativa.....	60
6.4.2	Technické a manažerské schopnosti	60
6.4.3	Financování	61
6.4.4	Technologie – elektrická síť a velikost reaktorů	61
6.5	Budoucí vývoj jaderné energie – nové technologie	62
6.5.1	Malé reaktory	62
6.5.2	Jaderná fúze.....	63
6.6	Další možnosti využití jaderné energie	64
6.6.1	Desalinizace	64
6.6.2	Vodíková ekonomika	64
7.	Závěr.....	66
	Seznam literatury:	68
	Přílohy.....	75
	Seznam příloh	76

Seznam grafů a tabulek

Graf 1 Podíl primárních zdrojů na celkové výrobě elektřiny ve skupinách zemí s vysokým, středním a nízkým příjmem a ve světě v roce 2003	20
Graf 2 Vývoj spotřeby primárních zdrojů energie v letech 1990–2035	22
Graf 3 Vývoj podílu primárních zdrojů na výrobě elektrické energie v letech 1990–2035	22
Graf 4 Emise CO ₂ e vybraných energetických zdrojů	32
Graf 5 Celkové náklady na výrobu elektřiny	35
Tabulka 1 Skupiny zemí podle pravděpodobnosti rozvoje jaderné energetiky	57
Tabulka.2 Skupiny zemí podle fáze přípravy rozvoje jaderné energetiky.....	58

Seznam použitých zkratk

CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> – Zachycování a uskladňování oxidu uhličitého
CIA	<i>Central Intelligence Agency</i>
CSP	<i>Concentrated solar power</i> – Koncentrovaná sluneční energie
DOE/EIA	<i>U.S. Department of Energy / Energy Information Administration</i>
GIF	<i>Generation IV International Forum</i>
GNEP	<i>Global Nuclear Energy Partnership</i> – Globální partnerství pro jadernou energii
HDI	<i>Human Development Index</i> – Index lidského rozvoje
HDP	Hrubý domácí produkt
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> – Mezinárodní agentura pro atomovou energii
IMF	<i>International Monetary Fund</i> – Mezinárodní měnový fond
INES	<i>International Nuclear Event Scale</i> – Mezinárodní stupnice jaderných událostí
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> – Mezivládní panel pro změny klimatu
JET	<i>Joint European Torus</i>
ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i>
NPT	<i>Non-Proliferation Treaty</i> – Smlouva o nešíření jaderných zbraní
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i> – Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj
OECD/IEA	<i>OECD International Energy Agency</i> – Mezinárodní agentura pro energii
OECD/NEA	<i>OECD Nuclear Energy Agency</i> – OECD Agentura pro jadernou energii
PV	<i>Photovoltaic</i> – Fotovoltaika
PPP	<i>Purchasing power parity</i> – Parita kupní síly

RMR	Rychle množivý reaktor
UN	<i>United Nations</i> – Organizace spojených národů
UNDP	<i>United Nations Development Programme</i> – Rozvojový program OSN
UNEA	<i>UN-Energy/Africa</i>
UNEP	<i>United Nations Environmental Programme</i> – Program OSN pro životní prostředí
WANO	<i>World Association of Nuclear Operators</i> – Světová asociace provozovatelů jaderných zařízení
WEO	<i>World Energy Outlook</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> – Světová meteorologická organizace
WNA	<i>World Nuclear Association</i> – Světová nukleární asociace

Seznam použitých jednotek

J	Joule
	Jednotka energie
cal	calorie – kalorie
	Jednotka energie, používaná především pro vyjádření energetické hodnoty potravin
toe	ton of oil equivalent – tuna ekvivalentu ropy
	Jednotka spotřeby primární energie
	1 toe = množství energie uvolněné spalováním 1 tuny ropy
	1 toe = 11,63 MWh nebo 42 GJ
W	Watt
	Jednotka výkonu
	1 W = 1 J/s
We	Watt electrical – elektrický výkon
Wt	Watt thermal – tepelný výkon
Wh	Watt hodina
	1 Wh = 3 600 J
m	mili = 10^{-3}
k	kilo = 10^3
M	mega = 10^6
G	giga = 10^9
T	tera = 10^{12}

1. Úvod

Celosvětový populační růst, ekonomický růst v rozvojových zemích¹ a přesun obyvatelstva do měst vedou ke stále se zvyšující spotřebě energie, a to jak primární, tak elektrické. Na straně jedné se s energií v rozvinutých zemích zachází nešetrně, na straně druhé miliardy lidí v rozvojovém světě stále ještě nemají přístup ke komerční energii. Se zvyšující se spotřebou energie prokazatelně roste i životní standard. Z hlediska rozvoje je tedy žádoucí, aby spotřeba energie v rozvojových zemích ještě rostla. Není však pravděpodobné, že by se lidé v rozvinutých zemích dobrovolně rozhodli snížit svoji spotřebu. Je tedy jasné, že stojíme před vážným problémem nekontrolovatelného růstu spotřeby energie. Dnes získáváme většinu primární i elektrické energie z fosilních zdrojů. Tato situace je ovšem dlouhodobě neudržitelná. K vyčerpání ropy a zemního plynu dojde již v tomto století, k vyčerpání uhlí v příštím. A co víc, spalováním fosilních zdrojů lidé do atmosféry vypouštějí nadměrné množství skleníkových plynů, které pravděpodobně způsobují změnu klimatu. Ta se celé naší „vyspělé“ civilizaci může stát osudnou. Nabízí se tak otázka, jaké zdroje energie bude lidstvo moci využít k uspokojení poptávky a zároveň k odvrácení hrozby změny klimatu – obnovitelné zdroje či jadernou energii?

I přestože jsem mnoho let patřila mezi odpůrce jaderné energie, závažnost energetické krize, jíž lidstvo v současnosti čelí, mě donutila znovu začít uvažovat o tomto kontroverzním zdroji. Tato práce se proto snaží nalézt odpověď na otázku, jaká role čeká jadernou energii v blízké budoucnosti, a to zejména v rozvojových zemích, kde je třeba celkovou kapacitu elektráren navyšovat nejvíce. Cílem práce je popsat, v jakých rozvojových zemích je jaderná energie již využívána a zjistit, zda by se tato skupina zemí mohla v budoucnu rozšířit. Lze očekávat, že je-li jaderná energie využívána ve 31 zemích světa, z čehož 13 zemí patří mezi rozvojové a vynořující se ekonomiky, další rozšíření jaderné energetiky je možné. Pravděpodobně však bude nutné splnit určité předpoklady a ne všechny země toho budou schopné.

Na začátku práce jsou nejprve objasněny důvody pro uvažování o jaderné energii. Po popsání neudržitelných vzorců spotřeby primární energie a spotřeby a výroby elektrické

¹ V této práci jsou pojmem rozvojové země označovány ty země, které jsou Mezinárodním měnovým fondem (IMF 2010) ve zprávě *World Economic Outlook 2010* zařazeny do skupiny rozvojových a vynořujících se ekonomik (*developing and emerging economies*).

energie je dále objasněn význam energie pro rozvoj a její přínos pro řešení globálních problémů. Jádrem kapitoly je pak vysvětlení podstaty energetické krize z hledisek klimatické změny a vyčerpatelnosti fosilních zdrojů. Závěrem kapitoly jsou nastíněny možnosti řešení energetické krize.

Následující část práce důkladně a objektivně analyzuje nejvýznamnější kontroverzní aspekty jaderné energie, které zřejmě rozhodnou o jejím budoucím využití. Analyzovány jsou aspekty environmentální, ekonomické, ale také dlouhodobá udržitelnost, energetická bezpečnost, problém jaderného odpadu, bezpečnost elektráren, hrozba proliferace a názor veřejnosti.

Další kapitola je věnována využití jaderné energie v historii i v současnosti. Text se zaměřuje na čtyři vybrané rozvojové země: na Indii, Čínu, Jihoafrickou republiku a Brazílii. Popsány jsou jejich spotřeby energie, energetické mixy a především jaderné programy.

Poslední kapitola se zabývá prognózami vývoje jaderné energetiky ve světě, především v zemích, které o přistoupení k jaderné energetice teprve uvažují. Součástí kapitoly je úvaha nad klíčovými předpoklady, které by zájemci o jadernou energii měli splňovat. Závěrem kapitoly jsou diskutovány inovativní jaderné technologie a jejich vliv na rozvojové země.

2. Metodika a přehled literatury

Základní metodou při zpracování této práce byla rešeršně-kompilační metoda. Po vyhledání relevantních informací následovala jejich analýza a interpretace. Převážná většina použitých zdrojů byla psána v anglickém jazyce. Co se typů zdrojů týče, v práci lze nalézt informace získané z tištěných i elektronických periodik, z tištěných i elektronických knih a informace dostupné z internetových stránek či publikací významných světových organizací.

Za stěžejní považují práce uznávaných jaderných inženýrů Hore-Lacyho a Eerkense, z českých odborníků lze jmenovat Kadrnožku. Stejného významu jsou i díla eminentních environmentalistů – Combyho a Lovelocka. Neméně důležité jsou publikace a internetové stránky organizací věnujících se problematice energie – *OECD International Energy Agency* – a jaderné energie – *World Nuclear Association*, *International Atomic Energy Agency* a *OECD Nuclear Energy Agency*.

3. Energetická krize

Předtím než se začnu zabývat jadernou energií a její možnou budoucností ve světě – především v rozvojových zemích – je nezbytné přiblížit prvotní důvod celosvětově obnovené diskuze o jaderné energii. Tím důvodem je komplexní energetické krize. Tato kapitola se bude zabývat jejími příčinami, které tkví v dlouhodobě neudržitelných vzorcích spotřeby primární energie a výroby a spotřeby elektrické energie. Nejprve zmíním historii spotřeby energie, poté se budu zabývat současnými vzorci i budoucími prognózami. Dále bude objasněn význam energie pro rozvoj i propojenost s ostatními globálními problémy. Jádrem kapitoly bude diskuze o podstatě energetické krize z hledisek změny klimatu a vyčerpatelnosti fosilních zdrojů. Závěrem budu uvažovat o možnostech, jakými lze krizi řešit.

3.1 Spotřeba energie

3.1.1 Získávání a spotřeba energie v historii

Získávání a spotřeba energie se v průběhu lidských dějin měnily. Před milionem let primitivní člověk přijímal energii pouze z potravy. Před sto tisíci let už lidé – lovci – používali dřevo pro vaření. Ve starověku 5000 let před naším letopočtem lidé začali zužitkovávat tažná zvířata. V 17. století většina z 550 milionů obyvatel světa žila na venkově a lidé získávali energii především z lokálních obnovitelných zdrojů – ze dřeva, větru a vody (Eerkens 2010). Expanze měst a průmyslu, podmíněna energií dodávanou z okolí, byla omezena až do doby zintenzivnění zemědělské produkce a nalezení účinnějšího a koncentrovanějšího paliva než je dřevo. Tím zdrojem bylo uhlí. Vynález parního stroje (1770) a jeho využití v železniční i parní dopravě a průmyslové výrobě byly prvním krokem k utvoření masové závislosti na neobnovitelných zdrojích energie. Konec 19. století byl charakterizován sérií objevů a vynálezů v oblasti elektrické energie. Díky elektrifikaci, jež umožnila přenos energie – dále transformované ve světlo, teplo, či hybnou sílu – na delší vzdálenosti, životní standard především v Evropě a USA rostl. Co se zdrojů energie týče, ve druhé polovině 20. století se kromě stále hojně využívaného uhlí rozšířily i ropa, zemní plyn a jaderná energie.

Množství spotřebované energie je do značné míry určováno počtem obyvatel a jejich životním standardem. Je tedy logické, že čím rychleji populace rostla a čím vyšší životní standard měla, tím vyšší byla i spotřeba energie. Podle Goldemberga a Lucona (2010) primitivní člověk před milionem let denně spotřeboval pouze 2000 kcal denně, což zhruba odpovídá toku 100W. Zemědělec před příchodem průmyslové revoluce spotřeboval energie desetkrát více (1000W). V průběhu průmyslové revoluce průměrná spotřeba na osobu a den vzrostla již na 3850 W. Nejrapidnější nárůst nastal s vývojem technologické informační civilizace, kdy spotřeba energie na osobu dosáhla 11 500 W (údaj z roku 1976). Spotřeba energie se zvyšovala zejména v 50. a 60. letech 20. století, kdy byla energie levná v důsledku optimismu způsobeného objevy nových ložisek fosilních zdrojů. V 70. letech přišlo probuzení v podobě ropných šoků a následovala snaha o snížení množství spotřebované energie zvýšením její účinnosti. Zhruba od 90. let se objevuje požadavek trvale udržitelného rozvoje a s tím související změny energetického mixu (Kadrnožka 2008).

3.1.2 Výroba a spotřeba energie v současnosti

Lidé spotřebovávají energii každý den při všech svých činnostech, a to přímo či nepřímo². Celková spotřeba energie i její rozložení mezi jednotlivé sektory je závislé na mnoha faktorech a liší se v čase i prostoru. Spotřeba energie se různí nejen mezi státy, ale i uvnitř jednotlivých zemí, a to v závislosti na příjmu obyvatel, životním stylu a environmentální uvědomělosti.

Celková spotřeba energie činila v roce 2008 12 271 Mtoe. Ve světě však byla rozložena velmi nerovnoměrně. 44 % z celkové spotřeby bylo uskutečněno v zemích OECD a 10 % v Číně, zatímco každý z následujících regionů – Afrika, Latinská Amerika, Blízký Východ a Indie – spotřeboval pouze okolo 5 %. Průměrná spotřeba energie na obyvatele byla 1,8 toe za rok, významně se ale lišila mezi státy. Nejvyšší byla spotřeba na obyvatele v USA, Japonsku, Rusku a Evropské Unii, nejnižší v Africe, Indii a Latinské Americe (OECD/IEA 2010). V rozvojových zemích je tak nízká spotřeba,

² Přímá spotřeba je taková, nad kterou má spotřebitel plnou kontrolu, zejména se tedy jedná o spotřebu domácností (např. osvětlení, vytápění, používání elektrických spotřebičů, osobní automobilová doprava). Spotřebitel ale konzumuje energii i nepřímo, a to ve formě produktů vyrobených v průmyslu či zemědělství (Goldemberg a Lucon 2010).

jelikož 1,4 miliardy lidí nemá přístup ke komerční elektrické energii z důvodů nerozvinuté infrastruktury nebo nedostatečné kupní síly a 2,7 miliardy lidí používá pro vaření biomasu (OECD/IEA 2010). Lidé žijící na venkově upřednostňují dřevo, které je pro ně snadno dostupné a zdarma. Podíl dřeva na spotřebě veškeré energie v rozvojových zemích je zhruba čtvrtinový (Lomborg 2006). Obyvatelé slumů dávají přednost petroleji, LPG a benzínovým či naftovým generátorům pro výrobu elektřiny. Výjimečný není ani ilegální odběr elektrické energie ze sítě (Lucon a Goldemberg 2010).

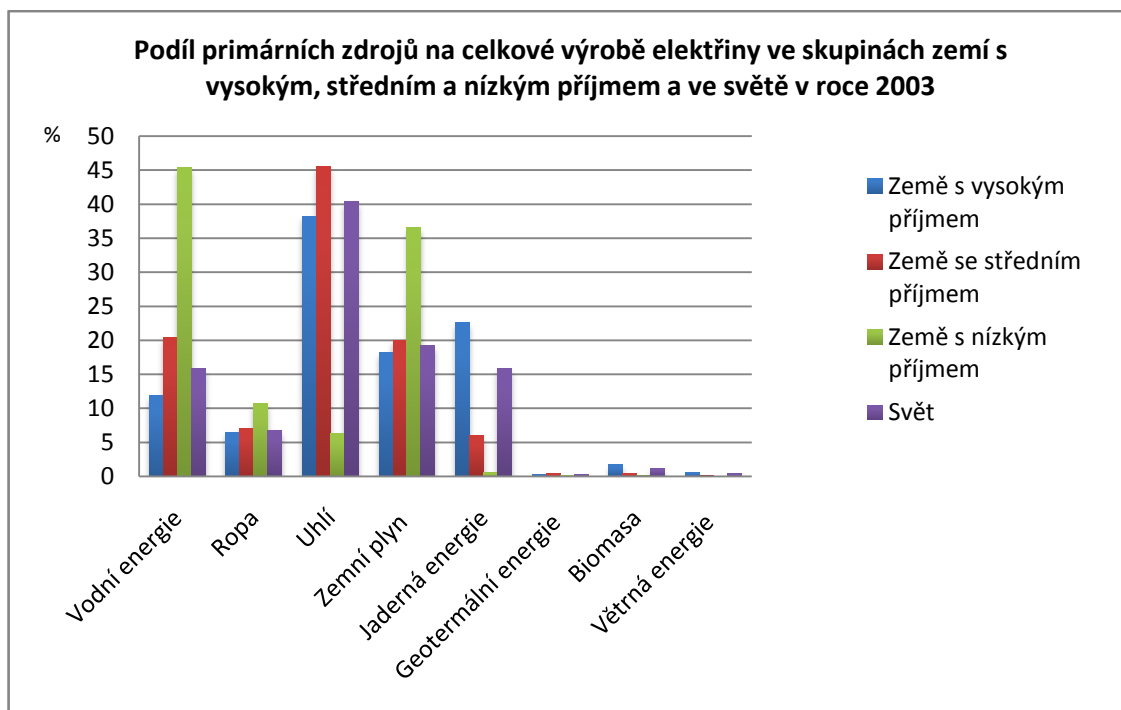
Celosvětově bylo v roce 2008 více než 80 % spotřebované primární energie získáváno z fosilních paliv (viz. Graf 2 na s. 21). Na výrobu elektrické energie bylo ve světě spotřebováno 37 % primárních zdrojů (4605 toe). Doprava spotřebovala 18,5 % primárních zdrojů, průmysl 13,3 %, domácnosti a služby 15,7 %, zemědělství 7,5 % a ostatní 8 %³ (OECD/IEA 2010).

Ve světě bylo v roce 2008 vyrobeno 20 183 TWh elektrické energie. Energetický mix – skladba (podíly) primárních zdrojů použitých pro výrobu elektřiny – je v různých zemích různý. Výběr primárních zdrojů závisí na více faktorech. Hlavními z nich jsou ekonomická rozvinutost země, obdaření přírodními zdroji, možnost transportu zdrojů energie, odlišné výrobní ceny elektřiny pro různé zdroje a dostupnost technologií. Celosvětový energetický mix je znázorněn v Grafu 3.

Zajímavým fenoménem je různorodost energetického mixu v různých příjmových skupinách zemí. V grafu 1 vytvořeném pomocí dat převzatých z tabulky Burkeho (2010) si lze povšimnout specifického vzorce. Data napovídají, že energetický mix se mění s ekonomickým růstem směrem od lokálně dostupných zdrojů jako je vodní energie a biomasa, přes fosilní paliva pro středně rozvinuté země až po čistější formy energie pro nejrozvinutější země světa. Rozvojové země nemají dostatek kapitálu a mnohdy ani přístup k technologiím obnovitelných zdrojů a jaderné energie, tak aby mohly diversifikovat svůj energetický mix, a tak i nadále zůstávají závislé na lokálních a fosilních zdrojích. Problémem současnosti a blízké budoucnosti je fakt, že s rozvojem nízko příjmových zemí roste i spotřeba fosilních paliv a množství skleníkových plynů v atmosféře. Pokud rozvinuté země nechtějí jen přihlížet takovému vývoji, měly by

³ V sektorech dopravy, průmyslu, zemědělství a ostatní nejsou zahrnuty zdroje spotřebované k výrobě elektřiny a tepla, které sektory spotřebovávají. Ty jsou zahrnuty v kategorii výroba elektřiny.

pomoci rozvojovým zemím, které stále více navyšují kapacitu svých elektráren, získat čisté technologie – obnovitelné zdroje a jadernou energii.



Graf 1 Podíl primárních zdrojů na celkové výrobě elektřiny ve skupinách zemí s vysokým, středním a nízkým příjmem a ve světě v roce 2003

Zdroj dat: Burke (2010)

3.1.3 Očekávaný vývoj výroby a spotřeby energie v budoucnosti

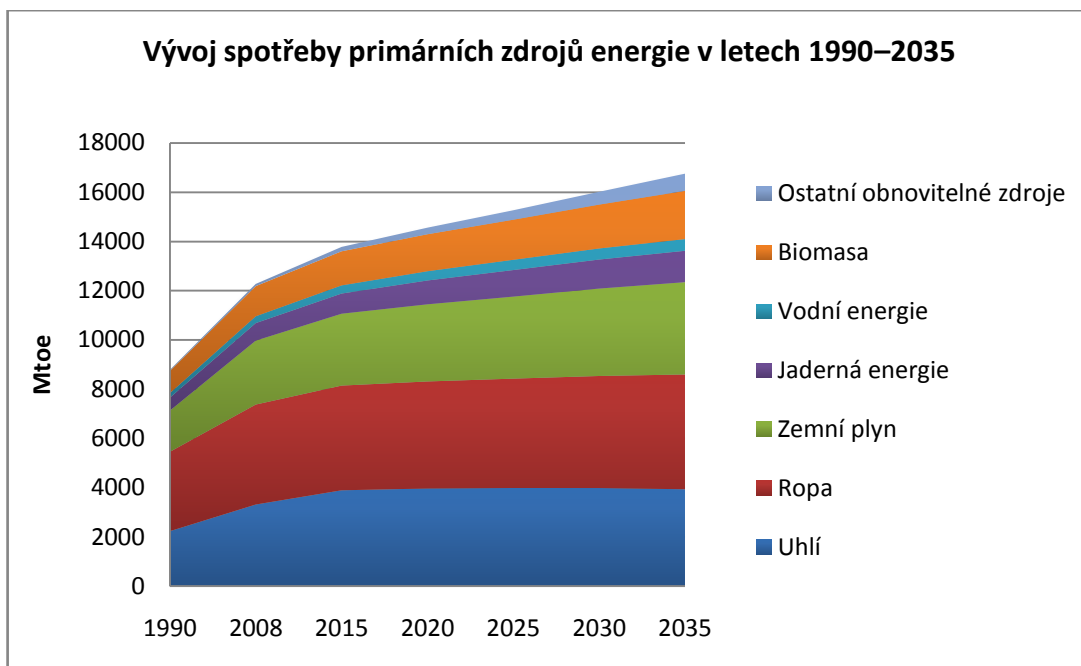
Všeobecným trendem bude v budoucnu zvyšující se spotřeba energie a rostoucí role elektřiny, jelikož právě tato forma energie nabízí všestranné využití, nejen pro osvětlení a pohánění strojů, ale i pro vytápění. Celkové množství spotřebované energie silně závisí na celkovém počtu obyvatel, který se stále zvyšuje. V roce 2010 žilo na Zemi podle odhadů OSN 6,91 miliard lidí. Přestože míra růstu populace se snižuje, v absolutních číslech počet obyvatel stále růst bude. V roce 2030 se na Zemi očekává asi 8 miliard lidí, v roce 2050 okolo 9 miliard (United Nations Population Division 2008). Podle WNA (____) v příštích padesáti letech světová populace spotřebuje větší množství energie než za celou známou historii až doposud. Podle odhadů OECD/IEA (2010) vzroste poptávka po primární energii z 12 271 Mtoe v roce 2008 na zhruba 16 748 Mtoe do roku 2035. Do konce tohoto století by podle Moora (2007) spotřeba

energie mohla vzrůst dvakrát až třikrát. Podle odhadu DOE/EIA (2010) by měl být mezi lety 2007–2035 zaznamenán pouze 14% nárůst poptávky po energii v zemích OECD a 84% ve zbylých zemích. Podíl zemí OECD na poptávce primární energie tak klesne ze 44 % v roce 2008 na 33 % v roce 2035 (OECD/IEA 2010).

Co se výroby elektřiny týče, je očekáván nárůst z 20 183 TWh v roce 2008 na 25 000 TWh v roce 2020 a až 35 000 TWh v roce 2035 (DOE/EIA 2010). S možná až nereálně vysokým odhadem přišel Smalley (2005), který tvrdí, že během našeho života se dočkáme nárůstu populace na 10 miliard lidí. Autor dále varuje, že poptávka po elektřině by mohla vzrůst až na 60 000 TWh, pokud lidé v rozvojových zemích budou požadovat stejný životní standard, jaký mají lidé v zemích rozvinutých v současnosti. Podle publikace IAEA (2006) budou rozvojové země v roce 2030 produkovat více elektřiny než země OECD. Spotřeba na osobu bude ale nadále nevyvážená. Dle projekce by spotřeba elektřiny na osobu v roce 2030 měla být 2300 kWh v rozvojových zemích a 10400 kWh v zemích OECD.

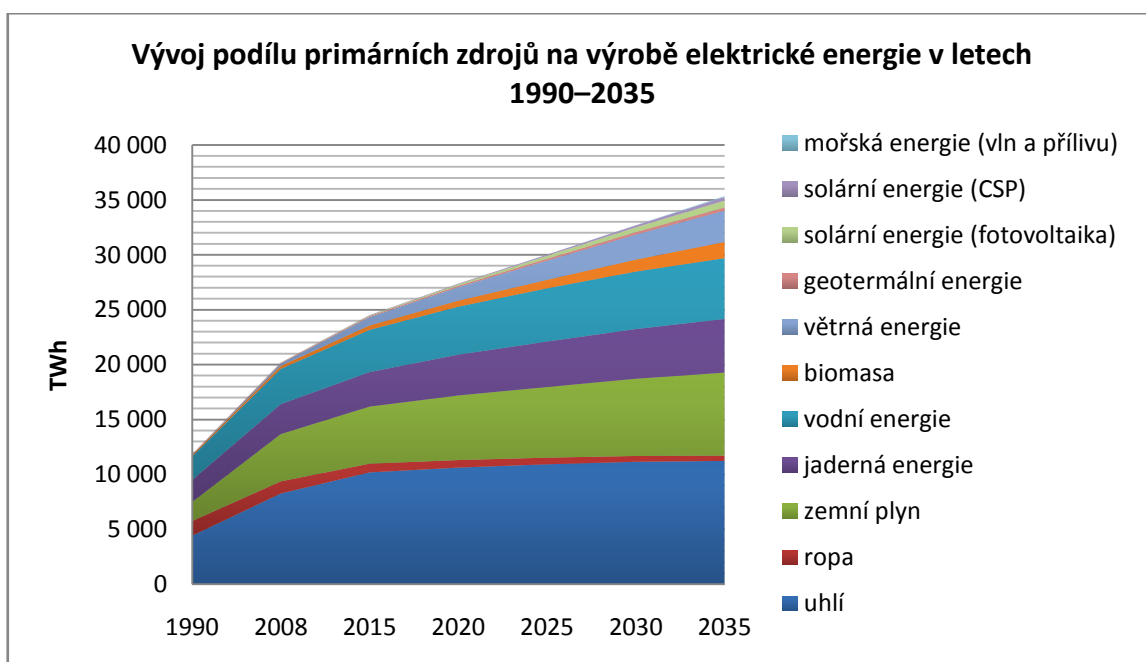
Pro příští desetiletí se očekává, že fosilní paliva budou stále nejvíce spotřebovávaným primárním zdrojem energie a že budou hlavní součástí energetického mixu států. Jejich podíl však klesne, jak si lze všimnout v Grafech 3.2 a 3.3, které znázorňují vývoj objemu i podílů jednotlivých zdrojů na celkové spotřebě primární energie (Graf 3.2) a na výrobě elektrické energie (Graf 3.3) v letech 1990–2035. Oba grafy vychází z *New Policies Scenario*⁴, vytvořeným OECD/IEA ve *World Energy Outlook 2010*.

⁴ New Policies Scenario, volně přeloženo Scénář nových politik, je založen na předpokladu, že země budou alespoň částečně implementovat své současné i předpokládané budoucí závazky snížení emisí skleníkových plynů, aby tak zmírnily změnu klimatu a zajistily pro sebe energetickou bezpečnost.



Graf 2 Vývoj spotřeby primárních zdrojů energie v letech 1990–2035

Zdroj dat: OECD/IEA (2010)



Graf 3 Vývoj podílu primárních zdrojů na výrobě elektrické energie v letech 1990–2035

Zdroj dat: OECD/IEA (2010)

Poznámka: CSP = Concentrated solar power, koncentrovaná sluneční energie (s použitím zrcadel).

3.2 Význam energie

3.2.1 Vztah mezi spotřebou energie a ekonomickým růstem

V nedávné době se mnoho vědců zabývalo otázkou, jaký existuje vztah mezi spotřebou energie a ekonomickým růstem. Výsledky jednotlivých studií se liší. Například Bradshaw (2008) tvrdí, že v počátečních fázích industrializace existuje přímý vztah mezi ekonomickým rozvojem a spotřebou energie. Zkušenost dnes již rozvinutých zemí dokazuje, že s růstem ekonomické aktivity rostla i spotřeba energie. Technologie se ale v průběhu posledních několika desetiletí změnily, zvýšila se energetická účinnost v průmyslu i dopravě a s ekonomickým růstem přišla i obměna skladby ekonomických aktivit vyspělých zemí z těžkého průmyslu, který konzumuje obrovské množství energie, směrem k lehkému průmyslu a službám. Spotřeba energie v post-industriálních společnostech se tudíž nadále s ekonomickým růstem nezvyšovala, dokonce klesala. Historický vývoj dnešních rozvinutých zemí tedy dokazuje, že ekonomický růst v počátečních fázích industrializace sice ke zvýšené spotřebě energie vedl, ale pro dnešní rozvojové země tento vztah ve stejné míře platit nemusí.

Velmi populární jsou také studie, které se snaží zjistit, zda rostoucí spotřeba energie vede k ekonomickému růstu. Jednou ze studií, které zkoumaly tento vztah, je například studie autorů Chontanawata a kol. (2008), kteří prokázali platnost vztahu v 70 % případů pro země OECD ale jen v 46 % z nečlenských zemí. Podle HDI byla kauzalita prokázána v 69 % případů pro země s vysokým HDI ale jen ve 42 % případů pro země se středním HDI a 35 % zemí s nízkým HDI. Příčinnost nebyla prokázána ani v Indii ani v Číně. Takové výsledky naznačují, že redukce spotřeby energie ve snaze zabránit změně klimatu by měla větší dopad na HDP zemí s vyšším HDI než na HDP rozvojových zemí. Lee (2005), který taktéž zkoumal tento jev v 18 vybraných rozvojových zemích v letech 1975–2001, ale prokázal silnou kauzalitu v krátkodobém i dlouhodobém období a došel k závěru, že snížení spotřeby energie v rozvojových zemích by vedlo i ke snížení ekonomického růstu. Vztah opačným směrem nebyl v této studii prokázán (srovnejte s Bradshaw 2008, viz. výše).

3.2.2 Vztah energie a ostatních globálních problémů

Přístup k energii přispívá k uspokojení základních životních potřeb. S rostoucí spotřebou energie na osobu se v zemi zpravidla zlepšují i vzdělání, zdravotní péče a postavení žen (Goldemberg a Lucon 2010). Energie může lidem pomoci zajistit přístup k čisté pitné vodě (např. odsolováním) a k potravě (skrze zvýšenou účinnost zemědělství díky zavlažování a využívání moderních energeticky náročnějších technologií). Dále se díky energii může zlepšit zdravotní stav obyvatel, a to zaprvé v souvislosti s využíváním čisté vody, zadruhé v souvislosti se zprovozněním nových zdravotnických zařízení a zatřetí v souvislosti se snížením znečištění ovzduší v případě využívání čisté energie. Využívání tradičních forem biomasy je totiž spojeno s negativními zdravotními důsledky. Nepříjemná fyzická námaha pro ženy a děti, které sbírají dřevo a problémy způsobené kouřem z jeho spalování v uzavřených prostorech (dýchací problémy, rakovina) vedou k předčasným úmrtím. Nahrazení dřeva moderními formami energie tedy bude mít pozitivní vliv na zdraví žen a dětí v rozvojových zemích (UNDP a WHO 2009). Přístup k moderním formám energie je pozitivní i z mikroekonomického a makroekonomického hlediska. Pokud budou ženy a děti místo sbírání dřeva moci chodit do placené práce či do školy, pozitivně to ovlivní domácnosti i hospodářství státu. Neméně důležitý je i vztah energie a životního prostředí. Jaderná energie a obnovitelné zdroje na rozdíl od fosilních paliv prospívají udržení křehké ekologické rovnováhy na Zemi (UN WEHAB Working Group 2002).

3.3 Energetická krize

Podstata energetické krize tkví v blízké vyčerpatelnosti fosilních zdrojů a ve vypouštění nadměrného množství skleníkových plynů jejich spalováním. Je jasné, že současné vzorce výroby elektrické energie a spotřeby primární i elektrické energie nejsou v souladu s konceptem dlouhodobě udržitelného rozvoje⁵.

⁵ Termín udržitelný rozvoj byl poprvé zmíněn v roce 1987 ve zprávě Světové komise OSN pro životní prostředí a rozvoj *Naše společná budoucnost (Our Common Future)*. Podle definice se jedná o rozvoj, který zajistí naplnění potřeb současné generace, aniž by byla ohrožena možnost příštích generací naplnit jejich potřeby.

3.3.1 Vztah mezi výrobou elektrické energie a emisemi, vztah mezi emisemi a změnou klimatu

Za předpokladu, že mají stovky vědců sdružených v IPCC⁶ pravdu, dochází na Zemi ke změně klimatu (zahrnující nárůst globální teploty, tání ledovců a zvyšování hladiny oceánu) pravděpodobně způsobené lidskými aktivitami. Nárůst globální teploty mezi lety 1906–2005 činil 0,74°C a hladina oceánu se v průběhu 20. století zvýšila o 17 cm. Lidé ovlivňují klima především spalováním fosilních zdrojů a tím vypouštěním nadměrného množství skleníkových plynů do atmosféry. Od začátku průmyslové revoluce významně vzrostly koncentrace CO₂⁷ (oxidu uhličitého), N₂O (oxidu dusného) a metanu. Podíl CO₂ na celkových emisích skleníkových plynů tvoří podle IPCC 56,6 %. CO₂ je do atmosféry uvolňován milionkrát rychleji, než byl kdy přírodními procesy z atmosféry odebírán. Tím dochází k narušování přirozené rovnováhy (Janouch 2007). Jen v letech 1970–2004 došlo k nárůstu emisí skleníkových plynů o 70 % (IPCC 2007). V současnosti je podle Sternovy zprávy⁸ úroveň CO₂e⁹ 430 ppm (Stern a kol. 2006). Měřeno dle sektorů, výroba energie je zodpovědná za 25,9 % emisí CO₂e (IPCC 2007). Podle IEA by se emise skleníkových plynů mohly do konce století zdvojnásobit, teplota na Zemi by tak podle IPCC mohla vzrůst o 2–6,1°C a hladina oceánu o 0,4–3,7m. Až třetině druhů rostlin a živočichů by hrozilo vyhynutí. Extrémní úkazy jako bouře, sucha, záplavy a požáry by měly negativní dopady nejen na životní prostředí, ale i na světovou ekonomiku a na produkci jídla a zásobování vodou – hlavní předpoklady lidského přežití. Podle Sterna a kol. (2006) by při takové změně teploty globální ekonomika utrpěla roční ztráty v hodnotě 5–10 % HDP.

⁶ IPCC- Mezivládní panel pro změny klimatu (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) je vědecký orgán, založený v roce 1988 ze společné iniciativy WMO a UNEP s cílem zpracovat a poskytnout světu nejnovější známé vědecky podložené informace o vývoji změny klimatu, včetně jejích environmentálních a socioekonomických dopadů. Poslední, v pořadí již čtvrtá, hodnotící zpráva o změně klimatu byla Panelem vydána v roce 2007 (IPCC 2011).

⁷ CO₂ vydrží v atmosféře zhruba 50–200 let, na rozdíl od metanu, který ač je 24–25x účinnější skleníkový plyn, je ve vzduchu v mnohem menší koncentraci a na kratší dobu (Kadrnožka 2008, Lovelock 2008).

⁸ Sternova zpráva o ekonomice změny klimatu (*The Stern Review on the Economics of Climate Change*) vydaná Sirem Nicholasem Sternem v roce 2006 pro Britskou vládu, diskutuje potenciální vlivy změny klimatu na světovou ekonomiku a doporučuje opatření, která by měla být přijata s cílem prevence či zmírnění negativních dopadů, případně adaptace na změnu klimatu.

⁹ Ekvivalent oxidu uhličitého (CO₂e) znamená přibližně ekvivalentní koncentrace CO₂ odpovídající vypočtenému radiačnímu působení zapříčiněnému antropogenními skleníkovými plyny a aerosoly (IPCC 2007). Koncentrace jsou udávány v jednotkách ppm (*parts per million*) neboli množství částic zkoumaného plynu v milionu částic vzduchu.

Ekonomický růst v rozvojových zemích, hlavně v Číně a Indii, bude pravděpodobně spojen s nárůstem emisí skleníkových plynů. Míra zvyšování emisí bude záležet na národních energetických politikách a mezinárodním úsilí poskytnout rozvojovým zemím technologie obnovitelných zdrojů a jaderné energie. Rozvinuté země, které v minulosti způsobily škodu životnímu prostředí a významně přispěly ke klimatické změně, by podle Dr. Leeny Srivastavy (2009) neměly rozvojové země nutit snižovat emise skleníkových plynů ve stejné míře, jakou ony samy budou snižovat. Snižování emisí by mělo podle ní být závislé na historické odpovědnosti zemí za změnu klimatu. Jen tak bude dosaženo spravedlnosti a rozvojové země budou mít prostor pro vymanění se z chudoby. Toto ale nechtějí rozvinuté země akceptovat, jelikož by to znamenalo znevýhodnění pro jejich průmysl. Smutné je, že po víceméně úspěšném Kyotském protokolu¹⁰ nedávná konference v Kodani¹¹ skončila neúspěchem, tedy nebylo dosaženo žádné závazné mezinárodní dohody. S časem se zvyšuje pravděpodobnost nevratné změny a škody tak vzniklé budou pravděpodobně vyšší než by byly současné náklady na zmírnění změny klimatu. Podle Sterna a kol. (2006) by bylo do poloviny století třeba snížit světové emise CO₂ o 80 %, přičemž v příštích 20 letech by mělo dojít ke stabilizaci a později k poklesu o 1 až 3 % ročně. Stabilizace emisí na 500–550 CO₂e ppm by stála 1 % HDP a ve srovnání s již zmíněnými 10 % HDP za nečinnost se tedy z ekonomického hlediska vyplatí jednat ihned. Stern kromě adaptace, zastavení deforestace a zvýšení účinnosti energie navrhuje i zvýšení využití nefosilních zdrojů tak, aby do roku 2050 tvořily 60 % z produkce elektrické energie a využití v dopravě. Ke splnění takového cíle by mohla významně přispět jaderná energie.

3.3.2 Vyčerpatelnost zdrojů

Změna klimatu není jediným důvodem proč transformovat systémy energie na zemi a opustit fosilní zdroje. I kdyby lidé chtěli, nemohli by fosilní zdroje využívat v dlouhodobém termínu, jelikož jejich zásoby jsou omezené a dochází k rychlému

¹⁰ Kyotský protokol je mezinárodní dohoda přijatá v roce 1997 s cílem stabilizovat koncentrace skleníkových plynů v atmosféře a zabránit tak antropogenní změně klimatu. Protokol ratifikovalo 191 států a vstoupil v platnost v roce 2005.

¹¹ Summit v Kodani uskutečněný v prosinci 2009 skončil zklamáním. Očekávalo se, že na něm budou přijaty konkrétní kroky ke zmírnění změny klimatu po roce 2012, kdy končí Kyotský protokol, ale nestalo se tak. O rok později se podle WikiLeaks ukázalo, že příčinou selhání konference byla tajná dohoda mezi USA a Čínou, které nemají zájem na přijmutí povinných akcí vedoucích ke snížení emisí skleníkových plynů (WikiLeaks Central 2010).

vyčerpávání. Doba, kterou je budeme moci využívat, závisí na rychlosti spotřeby, objeovávání nových ložisek ale i na ceně jejich extrakce, která se u hůře dostupných či méně kvalitních ložisek zvyšuje. Podle odhadů OECD/IEA (2010) jsou rezervy ropy 1,35 bilionu barelů a při současné úrovni produkce tak budou vyčerpány za 46 let, rezervy uhlí čítající bilion tun budou při současné úrovni produkce vyčerpány za 150 let a rezervy zemního plynu za 60 let¹². Samozřejmě na světě existují i lidé, kteří tvrdí, že žádná energetická krize neexistuje. Například Bjorn Lomborg ve své knize *Skeptický Ekolog* (2006, s. 166) uvedl, že: „...na obzoru žádná hluboká energetická krize není. Energie je na světě spousta.“ Lomborg dále publikoval poněkud extrémní odhady, podle nichž máme dostatek ropy na příštích 5000 let. Osobně jsem přesvědčená, že takové zásoby ropy na světě neexistují.

3.3.3 Možnosti řešení energetické krize

V souladu s konceptem udržitelného rozvoje by cílem celého lidstva mělo být vyřešení energetické krize a rozvinutí a implementace ekologicky udržitelných, sociálně spravedlivých a ekonomicky účinných systémů energie ve světě.

Základem pro řešení krize je informovanost obyvatel. Na příkladu elektrické energie si lze všimnout, že lidé neznají odpovědi ani na základní otázky jako například z jakých zdrojů je elektřina vyráběna nebo zda je její výroba škodlivá pro životní prostředí atd. Jediné co spotřebitelé zajímá je cena energie. Ta se zdá spotřebitelům vždy vysoká. Z pohledu budoucnosti by se ale naopak mohla jakákoli cena energie vyráběné z fosilních paliv jevit jako příliš nízká. Populace není dostatečně informována o negativních důsledcích výroby elektrické energie z fosilních paliv. Ve vyspělých zemích se situace pomalu mění. Například v České republice platí od roku 2000 zákon č.458/2000 Sb., o povinnosti energetických společností zveřejňovat informace o podílech jednotlivých zdrojů na celkové výrobě elektřiny a dopadu výroby elektřiny na životní prostředí. Informování veřejnosti je zajisté důležitým krokem ve snaze snížit globální spotřebu energie.

¹² *World Energy Outlook* byl v roce 2009 obviněn britským listem Guardian pro záměrné nadsazování odhadů zásob ropy. OECD/IEA se podvodného jednání měla dopustit na žádost USA, které nechtěly, aby na finančních trzích vznikla panika. I přes tuto kritiku bývá WEO citován jako věrohodný zdroj informací (Macalister 2009).

Další pobídkou ke snížení poptávky po energii by mohlo být zvýšení ceny energie, a to internalizací externích nákladů¹³. Poškození životního prostředí i lidského zdraví způsobené výrobou elektřiny¹⁴ v historii nebylo zahrnuto do ceny energie. Již dnes začíná nabývat na významu názor, že nečinnost politiků v tomto ohledu byla možná osudovou chybou. Snaha o nápravu se v současnosti projevuje hlavně ve vyspělých zemích, které začínají zavádět uhlíkovou daň (*carbon tax*). Ke zvýšení ceny elektřiny by také mohlo přispět zvýšení cen primárních surovin (především uhlí) v důsledku jejich rychlého vyčerpávání. Po zvýšení cen elektřiny by lidé pravděpodobně začali dobrovolně šetřit. Negativní dopad by ale celosvětový nárůst cen elektřiny mohl mít na chudé obyvatele rozvojových zemí, kteří v současnosti teprve získávají přístup k moderním formám energie. Ceny elektřiny by tedy ideálně měly mít takovou výši, aby se jí neplýtvalo, ale aby si ji mohli dovolit i lidé v rozvojových zemích. Osobně si ale nejsem jistá, zda je možné takového výsledku dosáhnout.

Další možností řešení krize je zvýšení účinnosti energie v oblastech přeměny energie z jedné formy na jinou, distribuce i užití koncovým spotřebitelem. Vyšší energetická účinnost dle Meadowsové, Meadowse a Randerse (1995, s. 99) znamená „poskytování stejných konečných energetických služeb (např. osvětlení, vytápění, doprava atd.) s použitím menšího množství energie.“ Je to nejrychlejší a nejlevnější možnost, která nemá žádné negativní dopady na životní prostředí. Zvýšení energetické účinnosti vede k menšímu čerpání zdrojů a menšímu znečištění. Ke snížení spotřeby energie pomocí efektivnějších technologií (např. úsporné žárovky, automobily) navíc může přispět každý jednotlivec. Ani zvýšení účinnosti pomocí vylepšených technologií ale nemá své stinné stránky. Zprvé, množství energie je nutno investovat do vzdělání a výzkumu, vedoucím k vývoji účinnějších technologií. Zadruhé, pokročilejší technologie mohou paradoxně podnítit vyšší spotřebu energie tím, že sníží její cenu (Brown, Cohen a Sweeneyová 2009).

Největší nejistotou ale zároveň i nadějí je víra v „technologický zázrak“. Objevení nových technologií, které budou generovat neomezené množství energie je bezesporu možné. Nikdo však nedokáže zaručit, že se to stane v blízké budoucnosti. Otázkou

¹³ V tomto případě skryté náklady výroby elektřiny, které jinak ponese celá společnost, a to nejen v současnosti.

¹⁴ V minulosti například znečištění ovzduší spalováním uhlí, kyselá deště a následně poškození vegetace. Nově se jedná především o globální změnu klimatu s potencionálními negativními následky, jejichž peněžní hodnotu nelze pro komplexnost celé záležitosti seriózně odhadnout.

k debatě zůstává, zda si lidstvo může dovolit spoléhat se na něco tak nejistého. Například jaderná fúze je nejspíše na dobré cestě ve svém vývoji, ale ani po několika desetiletích se jí nepodařilo přenést z laboratoří do praxe. Existují i pochyby o tom, zda je takový vývoj žádoucí. Nové technologie přinesly bezesporu mnoho dobrého, na druhou stranu nás uvrhly do pastí. S každou novou technologií, s každým novým vynálezem se zvýšil životní standard i počet obyvatel na planetě. Lidé si zvykli na nekonečný ekonomický růst, hnaný neustále se zvyšující spotřebou a výrobou. Rostoucí spotřeba se stala ukazatelem blahobytu a pro mnohé představuje smysl života. Problém ovšem je, že nekonečný ekonomický růst je nemožný v prostředí omezených zdrojů. A není pochyb, že takovým prostředím je i naše planeta. Pokud vytvoříme technologii, která bude schopna generovat neomezené množství energie, mohla by dále růst populace, průmyslová a zemědělská výroba i produkce odpadů. Není tedy vyloučeno, že nová technologie by mohla pro Zemi znamenat zkázu větší než vyčerpání fosilních zdrojů vedoucí k následnému nucenému snížení spotřeby energie a produktů, tím i snížení produkce odpadů. Pravděpodobně by došlo i ke snížení stavu populace a to by paradoxně mohlo znamenat pozitivní vývoj jak pro životní prostředí, tak pro civilizaci. Konzumní společnost by zanikla, lidé by se eventuálně odklonili od materiálních hodnot, prozřeli a začali technologii využívat s rozumem v souladu s konceptem udržitelného rozvoje, ne jako dnes.

Nicméně, tato vzdálená hypotetická budoucnost se současně žijící populace zřejmě netýká. Dnes je potřebné při uvažování o blízké budoucnosti brát v úvahu především současné technologie. Při stávající či rostoucí úrovni spotřeby energie fosilní zdroje vydrží maximálně několik desítek let a vezmeme-li v úvahu emise skleníkových plynů vznikající jejich spalováním, nejrozumnější by bylo eliminovat je ihned. I přesto se v současnosti odehrává opak. Uhlé elektrárny nejenže nejsou rušeny, ale dokonce jsou stavěny nové, zejména v Číně. Emise skleníkových plynů se tedy v příštích letech ještě zvýší a s nimi i ohrožení planety. Je toto nerozumné chování výsledkem neútesné situace, kdy lidstvo vsutku nemá efektivnější zdroje energie nebo jen snahou energetického průmyslu zachovat status quo tak dlouho, jak je to možné, a profitovat ze zbývajících zásob fosilních paliv? Mnozí lidé jsou zmatení. Část vědců doporučuje pouze obnovitelné zdroje, jiní tvrdí, že ty v současnosti nejsou schopny pokrýt celosvětovou spotřebu energie a doporučují proto využít jadernou energii. Je snaha o renesanci jaderné energie jen pošetilostí nebo má tento zdroj skutečně co nabídnout?

4. Nejvýznamnější aspekty využití jaderné energie ve srovnání s jinými zdroji

V předchozí kapitole jsem se věnovala vysvětlení energetické krize. V této kapitole se budu snažit objasnit, zda je jaderná energie vhodnou cestou z krize. Odlišit výhody a nevýhody jaderné energie není tak snadné, jak by se na první pohled mohlo nezasvěceným zdát. Původně jsem zamýšlela jasně rozdělit pozitivní a negativní aspekty jaderné energie do dvou kapitol. Při podrobném zkoumání dané problematiky jsem však zjistila, že jadernou energii nelze vnímat černobíle a práci významně prospěje, pokud se nebudu snažit subjektivně klasifikovat jednotlivé kontroverzní otázky využití jaderné energie jako výhody či nevýhody. Výhody a nevýhody jaderné energie jsou totiž relativní a je nutno je zkoumat ve srovnání s jinými zdroji energie (viz. přehled zdrojů v Příloze č. 1) a v kontextu energetické krize. Z důvodu přehlednosti je také vhodné konfrontovat argumenty zastánců i odpůrců ke konkrétnímu problému na jednom místě. Někteří zastánci jaderné energie ji entusiasticky prosazují a zamlžují její stinné stránky, zatímco extrémističtí ekologové idealisticky a naivně prosazují obnovitelné zdroje energie a atomovou energii zatracují, aniž by měli dostatek relevantních informací o jejich přínosech a rizicích a aniž by reálně zvážili možnosti obnovitelných zdrojů vyřešit energetickou krizi, které lidstvo čelí. Je na každém jednotlivci, aby důkladně zvážil všechny přínosy a hrozby plynoucí z využití jaderné energie a rozhodl se, zda je ochoten tento zdroj akceptovat.

V této kapitole se pokusím objektivně a kriticky analyzovat nejvýznamnější aspekty využití jaderné energie. Cílem této kapitoly je uvažovat nad tím, zda je jaderná energie vhodným (bezpečným, hospodárným, environmentálně šetrným, udržitelným) zdrojem pro budoucnost a zda má smysl zvažovat stavbu nových jaderných elektráren v zemích, kde je již jaderná energie zavedena a rozšíření jaderné energetiky do zemí, které zatím jaderné programy nemají. Většina následujících kontroverzních témat bude analyzována s přihlédnutím k charakteristikám rozvojových zemí.

4.1 Environmentální aspekty a škody na zdraví

Jaderná energie je všeobecně velmi „zeleným“ zdrojem elektřiny. Jediné co lze z hlediska životního prostředí provozu jaderné elektrárny vytknout je tepelné znečištění a velká spotřeba vody výparem. Sovacool a D'Agostino (2010) uvádějí, že jaderná elektrárna spotřebu o čtvrtinu až polovinu více vody než elektrárna tepelná. Za teplých lét tak může hrozit nedostatek vody a nutnost snižovat výkon. Zvýšení teploty je ale jen lokální a nemělo by přispět ke zvyšování globální teploty. Jedná se především o zvýšení teploty řek, jezer či moře v okolí elektrárny v důsledku vypouštění chladicí vody. Teplotní rozdíl činí jen několik stupňů a v oblastech mírného pásu je toto zvýšení menší než teplotní rozdíl mezi létem a zimou, tudíž by podle Combyho (2007) nemělo narušit místní ekosystémy.

Co se týče skleníkových plynů a změny klimatu, při štěpné reakci nevznikají žádné skleníkové plyny. V průběhu palivového cyklu (viz. Příloha č. 3), stavby, provozu i likvidace elektrárny ale emise skleníkových plynů vznikají. Existuje mnoho studií, zabývajících se množstvím emisí jednotlivých zdrojů energie. Za věrohodný zdroj považují Sovacoola (2008), který uvádí, že celkové emise jaderné energie na výrobu 1 kWh elektřiny činí 66 g CO₂e¹⁵. Jak si lze všimnout v Grafu 4, emise fosilních paliv jsou mnohanásobně vyšší a emise obnovitelných zdrojů téměř srovnatelné. Za předpokladů neexistence jaderné energetiky a nahrazení jaderných elektráren uhelnými by emise uhlíku byly podle Lestera a Rosnera (2009) o 9 % ročně vyšší, podle Kadrnožky (2008) dokonce o 14 % vyšší.

Provoz jaderné elektrárny na rozdíl od provozu tepelných elektráren neznečišťuje ovzduší prachem, popelem ani jedovatými a karcinogenními látkami. Radioaktivní emise jsou dokonce nižší než z uhelné elektrárny (Comby 2007). Těžba uhlí a ropy znečišťuje a narušuje životní prostředí i blaho lidí žijících v okolí. Úniky ropy z tankerů či při těžbě jsou toxické pro živé organismy. Při spalování fosilních paliv se do vzduchu uvolňují například oxid uhelnatý (CO)¹⁶, oxid siřičitý (SO₂)¹⁷, oxidy dusíku (NOx)¹⁸

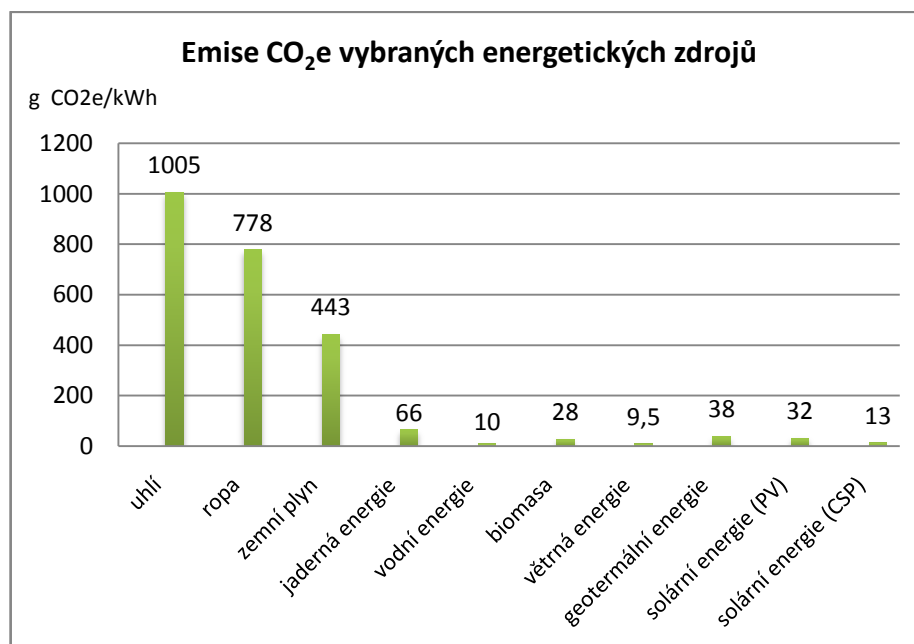
¹⁵ Sovacool zkoumal množství studií, podle kterých emise činily 1,4–288 g CO₂e. Uváděných 66 g CO₂e je střední hodnota.

¹⁶ Oxid uhelnatý (CO) je vysoce toxický plyn, který při vdechnutí většího množství může způsobit smrt.

¹⁷ Oxid siřičitý (SO₂) ve vzduchu vytváří kyselinu sírovou, která je součástí kyselých dešťů. Kyselá dešť narušují vegetaci.

¹⁸ Oxidy dusíku (NOx) jsou hlavní příčinou znečištění ovzduší měst a smogu. Jsou zdraví škodlivé, způsobují zejména dýchací potíže.

a těžké kovy. Jen v Indii mají podle Dr. Leeny Srivastavy (2011) fosilní paliva ročně na svědomí 400 000 předčasných úmrtí způsobených znečištěním vzduchu ve vnitřních prostorech a 50 000 úmrtí způsobených znečištěním vzduchu ve městech¹⁹.



Graf 4 Emise CO₂e vybraných energetických zdrojů

Zdroj dat: Sovacool (2008)

Poznámky: Hodnota pro biomasu, větrnou energii a uhlí jsou vypočítané průměrné hodnoty. V závislosti na konkrétní technologii se hodnoty pro biomasu pohybovaly v rozmezí 14–41 g CO₂e, pro větrnou energii 9–10 CO₂e a pro uhlí 960–1050 CO₂e.

Solar PV = *Photovoltaic*, fotovoltaika (přímý převod sluneční energie na elektřinu bez využití parních turbín);

Solar CSP = Concentrated solar power, koncentrovaná sluneční energie.

Náklady na léčbu pacientů a obnovu ekosystémů však nejsou započítány do ceny fosilních paliv a tím ani do ceny elektrické energie.

Ani obnovitelné zdroje energie však nejsou všelékem. Lidé se nyní stále častěji zajímají o dopady své činnosti ve smyslu klimatické změny způsobené emisemi skleníkových plynů. Zapomínají ale na dopady na biodiverzitu a ekosystémové služby. V rámci udržitelnosti se staví větrné, sluneční, geotermální a vodní elektrárny a pěstuje se biomasa. Obnovitelné zdroje ale nejsou zcela neutrální k biodiverzitě. Například výroba solárních článků může vytvářet toxický odpad, vodní elektrárny mohou narušit říční ekosystémy a větrné mlýny mohou zabíjet ptáky a netopýry. Plodiny pěstované

¹⁹ Znečištění ovzduší ve vnitřních prostorech je způsobené především spalováním biomasy pro vaření a vytápění.

jako biomasa s sebou mohou přinést škůdce a choroby nebo se samy mohou stát invazivním druhem (_____ 2009). Z výše uvedeného vyplývá, že není na místě zatracovat jadernou energii s argumentem, že obnovitelné zdroje na rozdíl od ní přináší zcela čistou energii.

4.2 Ekonomické aspekty

Jaderná energie bývá protijadernými aktivy často označována jako příliš drahá (např. Greenpeace 2009). V následující části textu se budu snažit zjistit, zda je to pravda. Do celkové ceny elektřiny je započítáno několik druhů nákladů.

V případě jaderné energie tvoří největší část nákladů stavba elektrárny. Průměrná doba výstavby v letech 1976–2007 byla 7 let a cena za 1 kWe instalovaného výkonu 1500–8000 dolarů (Sovacool a D`Agostino 2010; Kadrnožka 2008). Cena se v jednotlivých státech a v závislosti na konkrétním konstrukčním typu reaktoru liší (více o typech reaktorů v Příloze č. 4). Při průměrné ceně okolo 2000–4000 dolarů za kWe je cena konvenčního reaktoru o výkonu 1000 MWe asi 2–4 miliardy dolarů. Tuto vysokou částku je nutno investovat dříve než začne být elektrárna výnosná. Konstrukční náklady se elektrárně vrátí až po 10–18 letech provozu. Výše zmíněné skutečnosti a fakt, že při stavbě elektrárny často dochází k neočekávaným zpožděním a navýšení nákladů, jsou hlavními důvody, proč nejsou soukromí investoři ochotni do jaderné energetiky investovat. Provozovateli elektráren jsou většinou státní společnosti. Kromě toho, že se stát dokáže lépe vypořádat s investičními riziky, má i více motivací investovat. V zájmu státu je totiž zajistit energetickou bezpečnost a chránit životní prostředí.

Vysoké kapitálové náklady jsou hlavním důvodem, proč není jaderná energetika rozvíjena v malých rozvojových zemích. Ty mají mnohdy nedostatek financí i na řešení zdánlivě akutnějších problémů než je energetická krize (např. redukce chudoby, vzdělání, boj s AIDS). Je tedy jasné, že země jako například Haiti, které vyjádřilo zájem získat jadernou technologii, ale jehož roční HDP je 6 miliard dolarů (Goldemberg 2009), si nemohou dovolit investovat do výstavby velkých jaderných reaktorů. Pokud by se tak stalo, mohlo by dojít k závažnému zadlužení. Na světě existuje jen jediná země s HDP menším než 50 miliard dolarů, která kdy postavila jaderný reaktor pro výrobu elektřiny. Je jí Pákistán. Ten dále s Čínou, Indií a Jižní Koreou patří mezi

jediné země, kterým se podařilo zavést jadernou energetiku v době, kdy jejich HDP na osobu bylo menší než 5000 dolarů (Jewellová 2010).

Kapitálové náklady jsou sice velmi vysoké, ale náklady na provoz (mzdy, údržba, palivo) jsou naopak velmi nízké. Odhadem tvoří 15–25 % celkových nákladů (Kadmožka 2008). Jelikož paliva je třeba relativně málo (viz. Příloha č. 2) a jeho cena je relativně nízká²⁰, náklady na nákup paliva tvoří jen 3–5 % z celkových nákladů na výrobu elektřiny (Lester a Rosner 2009)

Další složkou nákladů je zacházení s jaderným odpadem, jež tvoří odhadem 10 % z ceny jaderné energie (Evans 2007).

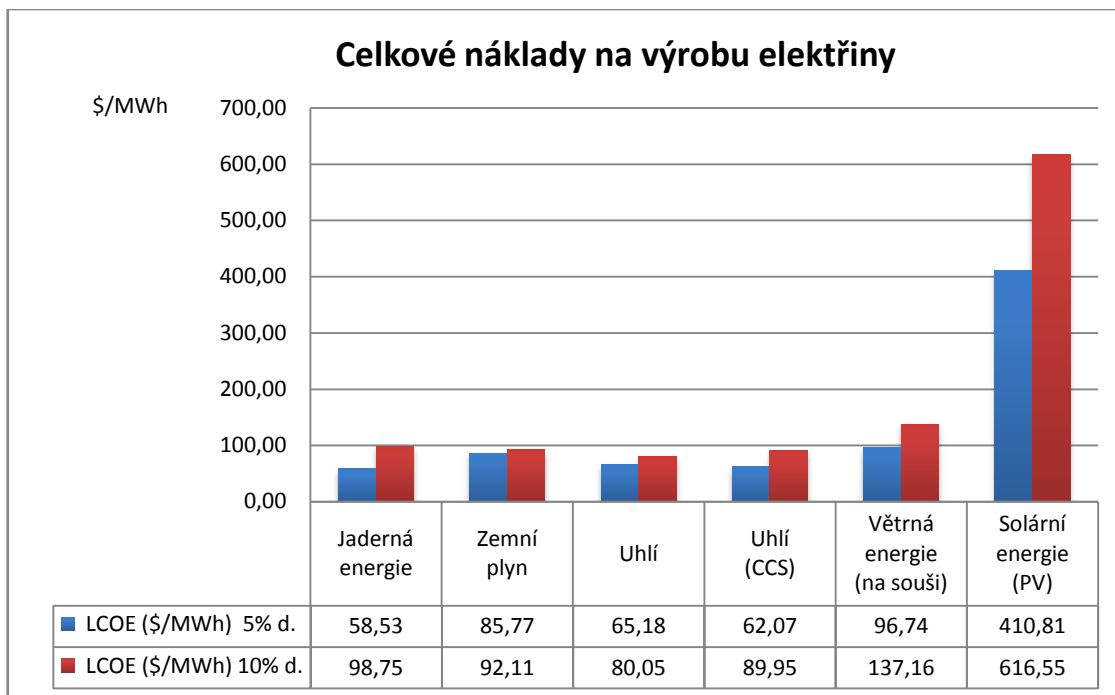
Méně známo ovšem je, že vysoké jsou i náklady na likvidaci elektrárny²¹. Není totiž možné jednoduše elektrárnu opustit. Dle původního odhadu měla být životnost elektrárny přibližně 40 let. Experti při stanovení tohoto odhadu počítali s tím, že reaktor poškozuje radiace z jádra, změny tlaku a teploty, možná i koroze potrubního systému. V praxi se ale ukázalo, že poškození je menší než dle původního odhadu a elektrárna je schopna fungovat déle. Většina elektráren tak zažádá o obnovení licence o dalších 20 let, čímž se její životnost prodlouží na 60 let. Například v USA má prodlouženou životnost více než polovina reaktorů (Adamantiades a Kessides 2009). Prodlužování životnosti snižuje celkové náklady. Nákladům na likvidaci se ale ani tak nelze vyhnout. Odhadem tvoří 5 % z ceny elektřiny a 10–100 % z ceny reaktoru (Hore-Lacy 2006; Scurlock 2007).

Co se týče celkové ceny elektřiny, různé studie uvádějí odlišné výsledky pro jednotlivé zdroje energie. Je téměř nemožné nalézt spolehlivá a komplexní data pro vyhodnocení celkových nákladů jednotlivých energetických zdrojů. Ani nejspolehlivější zdroje jako je například nejnovější publikace OECD/IEA a OECD/NEA (2010) *Projected Costs of Generating Electricity 2010*, nepočítají s náklady na vývoj technologie ani s mnohými škodami, způsobenými životnímu prostředí a lidskému zdraví. Přesto však pro orientaci uvádím v Grafu 5 (s. 35) ceny elektřiny generované z různých zdrojů. Jasně vidíme, že jaderná energie je při diskontní míře 5 % nejlevnějším zdrojem elektřiny

²⁰ Podle OECD/NEA a IAEA (2010) byla v roce 2008 prodejní cena za tunu uranu 69–174 dolarů.

²¹ IAEA povoluje tři způsoby likvidace elektrárny: okamžité rozebrání na části, rozebrání po několika desítkách let (kdy klesne radioaktivita) či zalití betonem, a tím vytvoření pevné struktury, která zůstane na místě (Miller 1992).

a i při diskontní míře 10 % je výrazně levnější než solární a větrná energie a jen mírně dražší než fosilní zdroje. Z ekonomického hlediska tedy nelze než jadernou energii doporučit, a to i pro rozvojové země. Výzvou pro ně však bude sehnat dostatečné množství financí pro uskutečnění počáteční investice.



Graf 5 Celkové náklady na výrobu elektřiny

Zdroj dat: OECD/IEA a OECD/NEA 2010

Poznámky: Uvedené hodnoty jsou vypočteny poměrně složitou metodikou a jsou mediánem nákladů na výrobu elektřiny z dat z 21 zemí a 190 elektráren. IEA/NEA počítají i s technologiemi, které budou komerčně dostupnější v letech 2015–2020. Vypočtené náklady jsou vyjádřeny v hodnotách dolaru v roce 2008. Více o metodice v publikaci.

LCOE = *Levelised Cost of Energy* zahrnují veškeré náklady na výrobu elektřiny po celou dobu životnosti elektrárny (náklady na konstrukci elektrárny, provozní náklady, palivo, emise CO₂, náklady na likvidaci elektrárny);

Solární energie PV = *Photovoltaic*, solární energie fotovoltaika;

Uhlí CCS = systém *Carbon Capture and Storage*, technologie zachycování a ukládání emisí oxidu uhličitého.

4.3 Udržitelnost

Fosilní paliva nemohou zabezpečit výrobu elektřiny déle než několik desítek let, z dlouhodobého hlediska tedy na rozdíl od obnovitelných zdrojů nejsou udržitelné. Obnovitelné zdroje ale nemohou pokrýt celosvětovou poptávku po energii. Otázkou tedy je, zda jaderná energie, která má potenciál uspokojit celosvětovou poptávku, je

udržitelná z hlediska zásob paliva. Klasickým argumentem skeptiků je, že zásoby uranu, nejvýznamnějšího jaderného paliva v současnosti, nejsou neomezené. V současnosti se zásoby uranu, který může být těžen za méně než 80 dolarů za kilogram, odhadují na 4,5 milionu tun, přičemž produkce v roce 2008 se rovnala 43 880 tun. Spotřeba, jejíž hodnota dosahovala v témže roce 59 065 tun, byla dočasně vyšší než produkce (OECD/NEA a IAEA 2010). Rozdíl byl dán získáním části paliva rozebráním jaderných hlavic a přepracováním vyhořelého paliva. Při současné míře čerpání uranu je pro použití v běžných reaktorech s otevřeným palivovým cyklem na světě dostatek paliva zhruba na 75 let. Pokud bychom ovšem uvážili i zdroje těžitelné za 130 dolarů za kilogram, zásoby vzrostou na 5,5 milionu tun, což znamená, že by vystačily na 90 let. S těmito argumenty končí a jadernou energii tak zavrhuje její odpůrci. Nahlédneme-li ale za hranice tohoto omezeného pohledu na zásoby paliva, zjistíme, že vývoj technologie opět nezklamal.

Díky využití již existujících rychle množivých reaktorů (viz. Příloha č. 5) a přepracování paliva by známé zásoby uranu mohly vystačit na několik tisíc let. Například podle Lomborga (2006) dokonce na 14 000 let.

Uran lze také získat z nekonvenčních zdrojů. Novinkou je možnost získávání uranu z mořské vody. Koncentrace uranu v mořské vodě je 3 mg/m³. Podle odhadů je tedy z oceánů možné extrahovat 4 miliardy tun uranu (Adamantiades a Kessides 2009). Takové množství uranu by při současné míře čerpání stačilo na více než 60 000 let. I kdyby se všechny země světa najednou rozhodly vyrábět veškerou energii v jaderných elektrárnách, zásoby by stačily na dobu dostatečně dlouhou k vývoji ještě účinnějších technologií pro výrobu elektrické energie, například jaderné fúze. Japonští vědci intenzivně pracují na snížení nákladů technologie. V současnosti se náklady rovnají 1000 dolarům za kilogram. Není ale vyloučeno, že v blízké budoucnosti by cena mohla klesnout na pouhých 150 dolarů (Lester a Rosner 2009). Důvodem, proč státy v současnosti intenzivně nerecyklují palivo nebo ho nezískávají z mořské vody je fakt, že levného uranu je zatím dostatečné množství.

Nadějným zdrojem je také Thorium (²³³Th), jehož zásoby na Zemi jsou větší než zásoby uranu. Mezi jeho výhodné vlastnosti patří fakt, že při jeho štěpení vzniká méně plutonia, vydrží v reaktoru déle (3–9 let) než klasické uranové palivo a jeho radioaktivita po vyjmutí z reaktoru poklesne na přírodní úroveň již za 100 let. Thorium se zatím ale

jako palivo používá jen v prototypch, na jejichž vývoji pracuje především Indie, která má velké zásoby tohoto prvku (Kadrnožka 2008).

Při akceptování výše uvedených skutečností nelze než pokládat jadernou energii za dlouhodobě udržitelnou technologii.

4.4 Energetická bezpečnost

Snaha o zajištění energetické bezpečnosti a nedostatek alternativ jsou v případě některých států (např. Japonska, Francie) hnací silou pro využívání jaderné energie. Otázkou ale je, zda se lze na uran spoléhat více než na fosilní paliva. Díky svým vlastnostem, především vysoké energetické hustotě, je uran dobře transportovatelný a skladovatelný a i pro roční provoz elektrárny je ho třeba jen nepatrné množství ve srovnání například s uhlím (Adamantiades a Kessides 2009). Stát tak může nakoupit zásoby uranu na mnoho let. Pro vyrobení stejného množství energie jako z jednoho gramu uranu je zapotřebí použít dvě tuny uhlí (Comby 2007). Nevýhodou fosilních paliv dále je, že při zvýšení ceny dochází k nečekaným navýšením cen elektřiny. Ceny fosilních paliv jsou totiž volatilní a proměnlivé náklady u tepelných elektrárn tvoří podstatnou část z celkových nákladů. Pokud by se cena uranu zvýšila dvakrát, cena elektřiny by vzrostla o pouhých 5 %. Pokud by se ale dvakrát zvýšila cena uhlí, cena elektřiny by vzrostla o 35–45 %. Z tohoto důvodu je pro importéry i exportéry fosilních paliv výhodnější přejít na jadernou energii. Importéři ušetří a exportéři vydělají značné částky (IAEA 2006).

Dalším důležitým faktorem je, že dodávka uranu je na rozdíl od přerušovaného zásobení ropou nebo plynem spolehlivá (Lester a Rosner 2009). Přírodní uran však musí být obohacen, aby mohl být použit v reaktorech. Z hlediska energetické soběstačnosti je proto žádoucí, aby země vyrábějící elektřinu z jaderné energie, měla vlastní zařízení k obohacování paliva. Z hlediska proliferace by však bylo bezpečnější, kdyby zařízení na obohacování uranu vlastnily jen rozvinuté země, které prokázaly, že technologii nezneužijí. Zařízení na obohacování uranu vlastní narůstající počet států, dokonce už i Čína, Indie a Brazílie.

Dalším sporným bodem je skutečnost, že na světě existuje jen několik významných dodavatelů²² technologie, ať již co se týče reaktorů, paliva či odpadu. Rozvojové země by se tak mohly stát závislé na dodavatelích z vyspělých zemí (Greenpeace 2009). Otázkou je, zda je toto opravdu aktuální problém. Daleko ve vývoji technologie jsou už i Indie a Čína, které co nevidět jistě navážou spolupráci s jinými rozvojovými zeměmi, kterým by mohly dodávat technologii v případě, že rozvinuté státy nebudou ochotné s nimi jednat z důvodu obav o zneužití jaderné technologie k vojenským účelům.

4.5 Jaderný odpad

Více či méně radioaktivní odpad ve všech skupenstvích vzniká v průběhu celého jaderného cyklu, od těžby a zpracování uranu, přes provoz, až po likvidaci elektrárny. Odpad má různý stupeň nebezpečnosti. Některé prvky mají kratší poločas rozpadu²³, jiné vydrží radioaktivní i 100 000 let, což je doba delší než existence našeho druhu. Odpady se slabou či střední radioaktivitou tvoří 97 % celkového objemu jaderného odpadu a obsahují jen 5 % z celkové radioaktivity²⁴ (Hore-Lacy 2006).

Vyhořelé jaderné palivo je vysoce radioaktivním odpadem a je nutno ho několik let kontrolovat a chladit vodou v bazénech přímo v budově reaktoru. Poté je přemístěno do suchých či mokrých meziskladů, které se ve většině případů nacházejí v areálu elektrárny a mají životnost zhruba 40–60 let. Pro další nakládání s vyhořelým palivem zatím neexistuje konsensus. To však neznamená, že problém je neřešitelný. Odkládání trvalého uskladnění vysoce radioaktivního vyhořelého paliva není výsledkem neschopnosti států nalézt vhodnou lokalitu či neochoty investovat do výstavby drahých úložišť. „Neřešení“ problému se zdá být promyšleným krokem. Zprvce radioaktivita i vývin tepla exponenciálně klesají a v meziskladech se tak rozpadnou izotopy s krátkým poločasem rozpadu. Po 10 letech je původní úroveň tepla materiálu snížena

²² Trh s reaktory ovládají zejména francouzská AREVA, americký General Electric a japonská Toshiba Corporation. AREVA, aktivně podporovaná francouzskou vládou, je největším stavitelem reaktorů na světě. Z jejích partnerů v rozvojových zemích lze jmenovat například Čínu, Vietnam, Jihoafrickou republiku a země Blízkého Východu (Goldemberg 2009; El-Genk 2008). Kromě již zmíněných jsou dalšími významnými hráči Rusko, Jižní Korea a Kanada. Všechny zmíněné rozvinuté státy vyjádřily ochotu spolupracovat s rozvojovými zeměmi na zavedení jaderné energie.

²³ Čas potřebný k tomu, aby se radioaktivita snížila na polovinu.

²⁴ Mezi slabě radioaktivní odpady z jaderných elektráren patří například kontaminované oblečení a mezi středně radioaktivní některé součásti reaktoru po likvidaci (Scurlock 2007).

na pouhých 10 % a radioaktivita na 20 %. Zadržet, je chybou zbavovat se vyhořelého jaderného paliva, jelikož obsahuje asi 1% štěpitelného ^{235}U , 1 % štěpitelného ^{239}Pu a 95 % ^{238}U , který lze použít jako palivo v RMR (viz. Příloha č. 5) (Kadmožka 2008; Arm 2010). Po přepracování vyhořelého paliva zůstanou asi 3 % původního objemu zachovány. Tyto 3 % lze v současnosti oprávněně nazývat odpadem. Pokud nebude nalezena technologie, pomocí které dokážeme změnit odpad na bezpečné neradioaktivní izotopy, časem budou muset být zmíněná 3 % původního objemu vyhořelého paliva uložena do hlubinného úložiště (Evans 2007). V současnosti je přepracování realizováno pouze ve Francii, Velké Británii, Německu, Švýcarsku, Japonsku, Číně a Indii. Přepracováváno je však pouhých 15 % paliva, jelikož skladování je prozatím levnější a proto si jej zvolily například USA, Kanada, Finsko a Švédsko (Hore-Lacy 2006; Sovacool a D'Agostino 2010; Comby 2009).

Podle Millera (1992) mezi existující návrhy, jak se zbavit vysoce radioaktivního odpadu, patří například uložení odpadu na podmořském dně, vystřelení raketou do vesmíru, vhození do subdukčních oceánských zón či pohřbení pod ledem. Žádná z možností ale není bez rizik, některé jsou příliš nákladné či zakázané. Existují důkazy o tom, že některé státy (např. bývalý Sovětský svaz) se odpadu zbavovaly vhozením do oceánů, řek či jezer (Sovacool a D'Agostino 2010). Takové chování je ale nepřijatelné, jelikož vážně ohrožuje živé organismy. Nejbezpečnější možností řešení je tak nejspíše vybudování trvalých hlubinných úložišť. Pokud je odpad více než 10 metrů pod zemí, záření nepronikne na povrch. Nejznámější úložiště se staví ve Finsku (Onkalo) a v USA v Nevadské poušti (Yucca Mountain). Hlubinná úložiště musí být vybudována ve stabilních, pro vodu nepropustných horninách a musí být schopna existovat až 100 000 let bez lidského dozoru. Vzhledem k malým objemům odpadu bude ale podle Kadmožky (2008) a Combyho (2007) dostatečné vybudovat na kontinentu jen několik úložišť, společných pro více států. Comby (2007, s. 104) upozorňuje, že: „Násobení počtu takových úložišť není technicky, ekologicky ani ekonomicky zdůvodnitelné.“

Podle Lovelocka (2008, s. 112) je jaderný odpad „neopodstatněná noční můra,“ která „představuje jen malé nebezpečí.“ I fosilní zdroje produkují odpad – emise skleníkových plynů a látky znečišťující ovzduší. 12 000 tun odpadu, které produkuje globální flotila jaderných elektráren a které mohou být bezpečně izolovány od okolí

a monitorovány, se zdají být bezpečnější než 8,5 miliardy tun uhlíkových emisí, produkovaných tepelnými elektrárnami (Adamantiades a Kessides 2009). Na druhou stranu obnovitelné zdroje energie neprodukuje žádný radioaktivní odpad nebo odpad ohrožující celou planetu.

Uvážíme-li, jaké problémy mají s jaderným odpadem rozvinuté země, je téměř nemožné představit si, jak by s ním nakládaly rozvojové země. V zemích s vysokou korupcí nebo v zemích, které odmítají řádně spolupracovat s IAEA – která zajišťuje kontrolu jaderných programů v jednotlivých zemích – existuje vážná hrozba zneužití materiálu pro vojenské účely. Jedinou přijatelnou možností pro takové země se zdá být dovážet palivo a odvážet vyhořelé palivo zpět do rozvinutých zemí. Taková by dle smlouvy měla být praxe Íránu, který spolupracuje s Ruskem. Tímto způsobem se ale může prohloubit závislost rozvojových zemí na rozvinutých.

4.6 Bezpečnost

Bezpečnost jaderné energie je velmi kontroverzním tématem. Zatímco někteří jaderní experti argumentují tím, že při dodržení všech přísně stanovených bezpečnostních předpisů je riziko závažné havárie s rozšířením radioaktivity do okolí téměř nulové, příklady z praxe ukazují, že nebezpečí nelze eliminovat. Navzdory faktu, že provoz jaderné elektrárny je mnohonásobně jištěn automatickými systémy²⁵, na jejichž fungování dohlíží zkušený odborně vyškolený personál i IAEA, některé nehody a havárie²⁶ se nedají ani předvídat ani očekávat. Může totiž dojít k selhání lidského faktoru, přírodní katastrofě či kombinaci. Nehody nižších stupňů se v jaderných elektrárnách odehrávají každý rok. Podle Sovacoola a D`Agostina (2010) se od roku 1947 do roku 2008 v jaderných elektrárnách odehrálo 76 nehod a celkové škody přesáhly 19 miliard dolarů. K nebezpečné havárii však dojde pouze tehdy, uniknou-

²⁵ Jedním ze systémů je například automatické vypnutí reaktoru v případě, že příliš vzroste teplota (Eerkens 2010).

²⁶ Sedmi bodová Mezinárodní stupnice jaderných událostí (INES – *International Nuclear Event Scale*), vytvořená v roce 1990 organizacemi IAEA a NEA, klasifikuje vážnost nehod a havárií. Stupně 1–3 jsou hodnoceny jako nehody a stupně 4–7 jako havárie.

li radioaktivní materiály do okolí. K úniku umělé radioaktivity do okolí ale může dojít jen v případě roztavení jádra a selhání kontejnmentu²⁷.

V celé historii jaderné energetiky došlo jen ke třem závažným haváriím: ve Three Mile Island v USA v roce 1979, v ukrajinském Černobylu v roce 1986 a v japonské Fukushima Daiichi v roce 2011 (více informací o haváriích včetně jejich příčin a důsledků v Příloze č. 8). Při nehodách v žádném případě nezemřely tisíce lidí²⁸, jak se veřejnost mylně domnívá a ani následky pro životní prostředí nebyly tak závažné (viz. Příloha č. 7 o radioaktivitě), jako jsou například škody způsobené spalováním fosilních paliv. Společnost je často strašena snímky zmutovaných zvířat, zdevastované krajiny a „zaručenými“ zprávami o tisících mrtvých či rakovinou nemocných. Mnohdy je veřejnost zmatena a domnívá se, že v jaderné elektrárně dokonce hrozí riziko jaderného výbuchu, jaký proběhl v Hirošimě a Nagasaki. To je však technicky nemožné, jelikož v elektrárně nemohou za žádných okolností být splněny podmínky nutné k atomové explozi. Ve srovnání se škodami způsobenými spalováním fosilních zdrojů se mi jaderná energie jeví být téměř neškodná. Problémem je, že nehody v jaderných elektrárnách jsou příliš viditelné a medializované a vzbuzují tak mezi lidmi strach.

Závěrem k bezpečnosti jaderné energie lze poznamenat, že každá technologie má svá rizika a je jen na občanech a politicích, aby zvážili, zda jsou ochotni daná rizika podstoupit. Já osobně se domnívám, že pokud budou dodrženy všechny bezpečnostní předpisy, elektrárna bude postavena na bezpečném místě – nikoliv jako Fukushima v zemětřesné oblasti (viz. Příloha č. 8) – a v provozu budou pouze moderní typy reaktorů – nikoliv nebezpečné reaktory černobylského typu (viz. Příloha č. 8) – nemáme se čeho obávat.

²⁷ Kontejnment je systém ochrany reaktoru, který zabraňuje nekontrolovanému úniku radioaktivity do okolí a chrání reaktor před vnějšími zásahy. Skládá se ze třech bariér. První z nich je uzavření paliva v trubkách a uzavření trubek v kovovém obalu. Celý reaktor i s primárním okruhem je chráněn asi 20 cm silným ocelovým pláštěm a asi metr silnou železobetonovou konstrukcí (Comby 2007).

²⁸ Prokazatelných úmrtí je ve skutečnosti pouze 56 v důsledku havárie v Černobylu.

4.7 Proliferace

Problémem jaderné technologie je, že může být využita jak k mírovým účelům, tak k výrobě smrtících zbraní. V dnešní době, kdy je terorismus běžným prostředkem k dosahování cílů, je hrozba použití jaderných zbraní snad ještě vážnější než v období studené války, kdy k této technologii mělo přístup jen několik států. Účinnost atomové bomby se v historii zvyšovala. Dnes je bomba opatřena několika individuálně naváděnými hlavicemi, z nichž každá má sílu megatuny, tedy 66 krát větší sílu než bomby v Hirošimě a Nagasaki (Lovelock 2008). Pozitivní skutečností ovšem je, že sestrojít atomovou bombu není snadné. K její konstrukci je třeba poměrně velké množství vysoce obohaceného radioaktivního materiálu a technici, kteří znají postup. Jak již bylo řečeno, palivo v jaderných elektrárnách je obohaceno na pouhých 3–5 %, pro výrobu zbraně je ale třeba obohatit ^{235}U nejméně na 90 % a získat ho v množství okolo 10 kg. Pro sestrojení atomové bomby je možné použít i 5 kg ^{239}Pu . Vzhledem ke skutečnosti že tisíci megawattový jaderný reaktor ročně produkuje ve vyhořelém palivu 200 kg ^{239}Pu (Adamantiades a Kessides 2009), jež lze chemicky oddělit, je jasné, že stojíme před závažnou hrozbou. Na druhou stranu doposud všechny státy, které vlastní jaderné zbraně, získaly materiál pro jejich výrobu jinak než z civilních reaktorů. Dále se vynořuje otázka, zda není pro teroristy jednodušší použít konvenční a chemické zbraně či rozšířit radioaktivitu jinými způsoby, například použitím tzv. „špinavé“ bomby²⁹. K zamoření malého území stačí dokonce i rozprášit radioaktivní materiál z vrchu vysoké budovy či přimíchat ho do zásob pitné vody (Evans 2007).

Na obhajobu expanze jaderné technologie je třeba podotknout, že riziko proliferace již existuje a bude existovat vždy bez ohledu na to, zda bude jaderná energetika expandovat či ne. Toto riziko by ale podle mého názoru nemělo zabránit rozvojovým zemím v rozvoji jaderného programu pro mírové účely. V Jihoafrické republice, Brazílii a Argentině dokonce rozvoj jaderné energetiky vedl k zastavení vojenského programu (Moore 2007). Odsuzují pokryteckou snahu USA a dalších mocných zemí, které vlastní jaderné zbraně, zakazovat Íránu či KLDK jejich jaderný program, zvláště v době, kdy každá náhrada fosilních paliv může světu pomoci v boji s klimatickou změnou. K řešení problému proliferace by mohla pomoci větší kontrola a prohloubení mezinárodní spolupráce. Někteří vizionáři navrhují vytvoření jedné mezinárodní agentury, která

²⁹ „Špinavá“ bomba vznikne přidáním radioaktivního materiálu do konvenční bomby. Při použití nedojde k atomovému výbuchu.

by spravovala obchod s jaderným i vyhořelým palivem, čímž by se významně redukovalo nebezpečí zneužití.

První snahou USA kontrolovat jaderné programy jiných zemí byla iniciativa presidenta Eisenhowera *Atomy pro mír (Atoms for Peace)* z roku 1953. USA věděly, že rozšíření jaderné technologie je nevyhnutelné, a proto raději samy nabídky rozvojovým zemím reaktory pro mírové (medicínské, výzkumné) účely, aby tak mohly kontrolovat obohacování uranu ve světě. I přesto se USA nepodařilo zabránit vývoji jaderných zbraní v jiných státech. V roce 1970 vstoupila v platnost Smlouva o nešíření jaderných zbraní (*Non-Proliferation Treaty*, dále jen NPT), jež dělila státy na ty, které již atomové zbraně vlastnily a ty, které ne. Obě strany se zavázaly nešířit a nepřijímat jaderné zbraně. Státy, jež jaderné zbraně vlastnily (USA, VB, Francie, Čína, SSSR) se zavázaly jednat o odzbrojení a státy, které je nevlastnily, přislíbily je nevyvíjet. Dohoda také vyzývá signatáře, aby používali jadernou technologii pro mírové účely a předávali si zařízení, materiál i informace. Na dodržení dohody dohlíží IAEA. Smlouvu doposud podepsalo 187 států. Ne všechny státy světa ale přistoupily k NPT a ne všichni signatáři ji dodržují. Nedodržování NPT je očividné například na případu Indie. Indie byla jedním ze států, které NPT odmítly podepsat, aby mohly vyvinout vlastní jaderné zbraně. To se Indii podařilo. Dnes spolupracuje s USA a Ruskem, které jí poskytují jadernou technologii, čímž jasně porušují NPT. Ospravedlňují to však tím, že Indie prokázala, že jaderné zbraně nešíří do jiných států.

Dnes vlastní jaderné zbraně 9 zemí (USA, Rusko, Francie, Velká Británie, Čína, Indie, Pákistán, Izrael a Severní Korea). Dohody o jaderném odzbrojení doposud nebyly příliš úspěšné, na světě stále existuje okolo 23 000 jaderných zbraní (Eerkens 2010). Jaderné zbraně podle mého názoru poškozují využití jaderné energie pro mírové účely a státy by se měly zasadit o jejich bezpodmínečnou likvidaci. Osobně sice věřím, že nikdo zdravého rozumu není tak hloupý, aby jaderné zbraně použil, jelikož každému musí být jasné, že by tím riskoval i vlastní život, spoléhat však na tuto úvahu bezvýhradně je nebezpečné. Lidé, kterým na životě nezáleží, by totiž s klidem jaderné hlavice proti ostatním namířit mohli.

4.8 Názor veřejnosti

Mínění veřejnosti je pro jakékoli důležité politické rozhodnutí klíčové. Chápu obavy veřejnosti z jaderných zbraní. Neštěstím však je, že veřejnost se mnohdy ostře staví i proti jaderné energetice. Důvodem pro takový odpor je podle Lovelocka (2008) fakt, že zelená lobby a ropné a uhelné společnosti jsou na rozdíl od jaderného průmyslu velké. Výsledkem je, že veřejnost je nedostatečně informována o složitých odborných záležitostech, o skutečných přínosech a hrozbách jaderné energie. Namísto toho je zahlcena nevědeckými informacemi pocházejícími od protijaderných aktivistů, kteří zveličují a zkreslují fakta. Strach z jaderné války a totálního vyhlazení je silný a mylné přesvědčení, že jaderný reaktor je totéž co atomová bomba, brání stavbě nových elektráren. V nedávné době ale na podporu jaderné energie vystoupili někteří přední environmentalisté světa³⁰, což může znamenat předzvěst skutečné nukleární renesance. Například podle Patricka Moora, jednoho ze zakladatelů Greenpeace (který je později opustil), je jaderná energie jediným zdrojem, který neohrožuje klima a je zároveň schopen uspokojit celosvětovou poptávku po energii. Nemohu než souhlasit s jeho výrokem (Moore 2007, s. 25): „Greenpeace dnes tvrdí, že můžeme postupně vyřadit elektrárny na fosilní paliva a jaderné elektrárny a nestavět už vodní elektrárny. Prý nám stačí jen více šetřit energií, mít více větrných elektráren a zavádět používání slunečních panelů. To je krásný sen a upřímně si přeji, aby byl pravdivý, ale není.“ Hlavním problémem obnovitelných zdrojů podle Moora je, že jejich koncentrace je nízká a vyrábí elektřinu jen po určitou dobu. Moore doporučuje neotálet a začít stavět nové reaktory. Velké osobnosti, jakým Moore bezesporu je, silně ovlivňují mínění veřejnosti i politiků.

³⁰ Nejvýznamnějším sdružením, podporujícím jadernou energii je mezinárodní asociace Environmentalisté pro jadernou energii. Ta sdružuje přes 8000 členů z 50 zemí. Jejimi členy jsou například James Lovelock (autor teorie Gaia), Patrick Moore (zakladatel Greenpeace) a Bruno Comby (inženýr jaderné techniky, vědec, ekolog, autor knihy Environmentalisté pro jadernou energii).

5. Historie a současnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země

5.1 Historie jaderné energie

Stručný popis vývoje jaderné energie nelze začít jinak než objevy na poli radioaktivity uskutečněnými Henri Becquerelem na konci 19. Století a rodinou Curie v první polovině 20. století. Významnými vědci v oboru dále byli Hahn, Meitnerová a Frish, kteří v Německu v roce 1939 prokázali možnost štěpné reakce. Poprvé kontrolovanou řetězovou reakci uskutečnil v roce 1942 italský vědec Enrico Fermi, pracující v USA pro vládní program Manhattan s cílem sestrojení atomové bomby. Jaderná technologie byla totiž původně vyvinuta k vojenským účelům. Její drtivá síla byla prokázána svržením atomových bomb na Hirošimu a Nagasaki v roce 1945. Důvodem, proč byla technologie současně rozvíjena i pro výrobu elektřiny, byla snaha ukázat veřejnosti i pozitivní aspekty jaderné energie. Lákavá byla pro jaderné mocnosti (USA, VB, SSSR a Francii) i možnost dalšího využití štěpného materiálu, produkovaného v armádních jaderných programech (Hammond 1997).

Co se reaktorů týče, první experimentální reaktor v USA vyrobil elektřinu v roce 1951. První komerční reaktor – Calder Hall ve Velké Británii – byl připojený k národní rozvodné síti v roce 1956. S rozvojem jaderné energetiky se brzy objevila potřeba mezinárodní spolupráce. Roli koordinátora a strážce bezpečnosti získala po svém založení v roce 1957 Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA – *International Atomic Energy Agency*)³¹. V 60. až 80. letech byla jaderná energetika propagována jako čistá, levná a hojná alternativa k fosilním zdrojům, zvláště v kontextu ropných šoků v 70. letech. Ve stejné době supervelmoci soupeřily o výsadní postavení ve světě a jako prostředek k demonstraci své síly používali testy jaderných bomb³²(Lovelock 2008). Ty ovšem byly jedním z faktorů, které odradily veřejnost od podpory masivního rozvoje jaderné energetiky. Dalšími faktory byly vysoké kapitálové náklady, náklady na likvidaci vysloužilé elektrárny, nejistota, jak nakládat

³¹ Členy IAEA je dnes 126 států. Mezi hlavní úkoly IAEA patří mezinárodní spolupráce v oblastech provozu reaktorů, palivového cyklu, nakládání s radioaktivním odpadem a ochrany před radiací.

³² Testování jaderných zbraní bylo intenzivní zejména v 60. letech, kdy výbuchy uvolnily do atmosféry mnohem větší množství radiace (zejména cesium 137, stroncium 90 a plutonium) než Černobylská katastrofa o 20 let později. Důsledky nejsou podrobně prozkoumány, avšak neexistují důkazy, že by radiace negativně ovlivnila délku života lidí. Testování bylo ukončeno až v roce 1992 (Lovelock 2008).

s radioaktivním odpadem a nehody v jaderných elektrárnách *Three Mile Island* v USA v roce 1979 a v ukrajinském Černobyli v roce 1986. V 90. letech byla diskuze o jaderné energii obnovena v důsledku narůstajících obav o změnu klimatu a vyčerpatelnost konvenčních zdrojů. Ve snaze podpořit renesanci jaderné energie vzniklo z iniciativy Bushovy administrativy v roce 2006 v USA Globální partnerství pro jadernou energii (*Global Nuclear Energy Partnership – GNEP*)³³.

5.2 Jaderná energie v současnosti

5.2.1 Jaderná energetika ve světě

Ačkoli kapacita jaderných elektráren vzrostla z méně než 1 % v roce 1960 na asi 16 % v roce 1986, od té doby se podíl jaderné energie na výrobě elektřiny téměř nezměnil. To znamená, že výroba elektřiny v jaderných elektrárnách rostla podobným tempem jako výroba elektřiny z jiných zdrojů. Během posledních 25 let došlo k navýšení celkového výkonu jaderných elektráren spíše v důsledku zvýšené účinnosti než stavby nových elektráren (Adamantiades a Kessides 2009). Jaderné elektrárny vyrobily v roce 2009 2560 TWh elektřiny, 14 % z celkové výroby elektřiny a 6 % z celkového využití energie z primárních zdrojů. Ve 31 zemích světa³⁴ je nyní 440 funkčních reaktorů s celkovým čistým výkonem 375 410 MWe³⁵. Ve 13 zemích světa je v současnosti ve výstavbě 61 reaktorů s celkovým instalovaným výkonem 64 074 MWE, ve 27 zemích se plánuje výstavba 158 reaktorů s celkovým instalovaným výkonem 176 767 MWe a 37 zemí zvažuje výstavbu dalších 326 reaktorů s celkovým instalovaným výkonem 370 995 MWe (viz. Příloha č. 6).

³³ Cílem GNEPu je podpořit rozšíření jaderné energie pro mírové účely po celém světě a zabránit zneužití pro vojenské účely. Dalším cílem je zajistit, aby se recyklace paliva stala běžným postupem a množství odpadů tak bylo minimalizováno.

³⁴ Uznáme-li Taiwan (Čínskou republiku) jako samostatný stát.

³⁵ Čistý výkon je asi o 10–15 % nižší než instalovaný výkon, v závislosti na výkonostním faktoru reaktoru, který v současnosti dosahuje hodnoty 85–90 % (Eerkens 2010).

5.2.2 Jaderná energetika v rozvojových zemích

Jaderná energetika je v současnosti vzhledem ke kapitálové a technologické náročnosti rozvíjena převážně ve vyspělých zemích světa, především v Evropě a v Severní Americe, či ve velkých rozvojových zemích. V současnosti vyrábějí jaderné elektrárny elektřinu jen v několika rozvojových a vynořujících se ekonomikách: v Argentině, Arménii, Bulharsku, Brazílii, Číně, Indii, Maďarsku, Mexiku, Pákistánu, Jihoafrické republice, Litvě, Rumunsku a Ukrajině. V následujícím textu budou popsány jaderné programy několika vybraných zemí: Indie, Číny, Jihoafrické republiky a Brazílie. Tyto země celosvětového významu byly vybrány, jelikož na svých kontinentech mají nejrozvinutější jaderné programy a svým pokrokem v oblasti jaderné energetiky mohou jít směle příkladem ostatním státům.

5.2.2.1 Indie

Indie je se svými 1,189 mld. obyvateli druhou největší rozvojovou zemí světa. V roce 2010 dosáhlo reálné HDP Indie 1,43 bln. dolarů a HDP na osobu dle PPP 4 300 dolarů (CIA 2011a). Podle HDI 0,519 se Indie řadí na 119. místo mezi země se středním indexem lidského rozvoje (UNDP 2010). Roční míra ekonomického růstu je v Indii vysoká a v posledních letech se pohybuje okolo 8–9 % (CIA 2011a).

Taková míra ekonomického růstu je nutně spojena i se zvyšující se poptávkou po energii. V roce 1980 činila spotřeba elektrické energie na osobu pouhých 142 kWh. Do roku 1990 se zvýšila na 275 kWh/os. Na začátku nového tisíciletí dosáhla hodnoty 402 kWh/os. a v roce 2006 502 kWh/os. (UN Statistics Division 2011). Spotřeba je tak nízká z důvodu, že mnoho venkovských oblastí stále není elektrifikováno. V roce 2005 nemělo v Indii přístup k elektřině 412 milionů obyvatel a na biomasu pro vaření spoléhalo 668 milionů lidí (OECD/IEA 2006). Aby obyvatelé Indie měli stejný životní standard jako obyvatelé Japonska či Spojených států, musela by podle Dr. Chibamarama (2009) spotřeba energie na osobu vzrůst osmkrát. K tomu dojde do roku 2050, kdy je předpokládán nárůst spotřeby elektrické energie na osobu na 5 000–6 000 kWh (WNA 2011a).

I přestože má Indie jednu z nejnižších spotřeb energie na osobu a výkon indických elektráren vzrostl z 1350 MWe v roce 1947 na 177 300 MWe v roce 2008, nabídka nepokryje poptávku, a to průměrně o 11,7 %, ve špičce až o čtvrtinu (Mallah 2010). Celkové množství vyrobené elektřiny se v roce 2008 rovnalo 830 TWh elektřiny, ale v důsledku obrovských ztrát přenosem a distribucí³⁶ se k zákazníkům dostalo jen 591 TWh (WNA 2011a). V budoucnu by se měl problém ještě zhoršit. Podle Mallaha (2010) by do roku 2045 poptávka po elektřině mohla vzrůst až na 5081 TWh, nabídka však jen na 1561 TWh³⁷.

Jelikož má Indie zásoby uhlí přibližně na 230 let (Kinshore 2007), je logické, že většina elektrické energie (68 %) je vyrobena v uhelných elektrárnách. Dalším významným zdrojem je vodní energie, která generuje zhruba 14 % elektřiny a plyn, který zajišťuje 8 %. V roce 2009 jaderná energie vyrobila 14,8 TWh, což představovalo jen 2,2 % z celkové výroby elektřiny (WNA 2011a).

S ohledem na změnu klimatu a celosvětové úsilí snížit emise skleníkových plynů je ale důležité, aby Indie při zvyšování produkce energie přestala spoléhat na fosilní paliva. Obnovitelné zdroje energie budou pravděpodobně schopny zajistit navýšení výkonu elektráren maximálně o 183 GWe (Kinshore 2007). V roce 2050 ale bude třeba až 1094 GWe celkového elektrického výkonu. K němu by mohla významně přispět právě jaderná energie. V jaderných reaktorech by v té době mohla být vyrobena dokonce čtvrtina elektřiny. Je těžké si takové množství představit, uvážíme-li, že celkový výkon všech indických reaktorů byl v roce 2009 pouhých 4 385 MWe. Kapacita jaderných elektráren se však bude zvyšovat pomalu, ale jistě, nikoliv skokově. Do roku 2020 by měl výkon jaderných reaktorů dosáhnout 20 GWe, do roku 2032 63 GWe (WNA 2011a) a do roku 2045 220 GWe (Mallah 2010).

Co se týče jaderného programu v Indii, první výzkumný reaktor byl uveden do provozu v roce 1956 a první komerční reaktor v roce 1969 (WNA 2011a). V současnosti je v Indii v provozu 20 reaktorů, 5 se jich staví, 18 je plánovaných a 40 navržených (viz. Příloha č. 6). Indie vlastní spíše malé a střední reaktory (o čistém výkonu 90–490

³⁶ Téměř 30% ztráty v Indii jsou vysoce nad průměrem zemí OECD, kde ztráty činí jen přibližně 7 %. Další zemí, kde dochází ke značným ztrátám, je Brazílie. V roce 2004 se přenosem a distribucí ztratilo 17 % elektřiny. Ke ztrátám elektrické energie dochází v důsledku dlouhých vzdáleností přenosu, starých a špatně udržovaných systémů a krádeží (OECD/IEA 2006).

³⁷ Počítáno podle scénáře obvyklého provozu (*business as usual*).

MWe), jelikož až doposud měla jen menší separované sítě. V současnosti je ale integruje a proto si může dovolit stavět i větší reaktory (o čistém výkonu 470–917 MWe) a využívat tak jejich výnosů z rozsahu (IAEA 2000; Sokolov a McDonald 2005). Provozovatelem elektráren je státní společnost *Nuclear Power Corporation of India Limited*.

Vzhledem k tomu, že Indie odmítla podepsat Smlouvu o nešíření jaderných zbraní (dále jen NPT) a vyvinula jaderné zbraně, bylo na ni (jako na ostatní nečleny NPT) uvaleno obchodní embargo. Díky tomu, že nemohla kupovat jaderný materiál a reaktory v zahraničí, vyvinula vlastní jaderný program, který je v současnosti na vysoké úrovni. Indie je soběstačná v průběhu celého palivového cyklu. Vlastní zařízení na zpracování uranové rudy, zařízení na obohacování uranu i výrobu paliva a dokonce i zařízení na přepracování vyhořelého paliva³⁸. Kromě vývoje a stavby vlastních konstrukčních typů reaktorů ale Indie nově spolupracuje například s USA, Ruskem a Francií (Kovan 2011). I přestože Indie nepodepsala a ani nepodepíše NPT³⁹, ukázala se být spolehlivým nešířitelem jaderných zbraní, a proto s ní v roce 2008 IAEA a Skupina 45 dodavatelů jaderné technologie (*Nuclear Suppliers Group*) uzavřely individuální dohody a udělily výjimku z vyloučení z obchodu.

Indie má jen malé zásoby uranu, ale dostatečné zásoby thoria⁴⁰. Je tedy žádoucí, aby země přešla z konvenčních typů reaktorů na rychle množivé reaktory a později i na reaktory, jež jako palivo využívají thorium. Díky svému výzkumu v těchto oblastech by se Indie mohla stát světovým lídrem zmíněných technologií. V roce 2004 začala společnost *Bharatiya Nabhikiya Vidyut Nigam Limited* stavět první komerční indický rychle množivý reaktor. RMR o čistém výkonu 470 MWe by měl být dostavěn koncem roku 2011 (IAEA 2000). Šest dalších RMR stejného typu je schváleno ke stavbě, z čehož čtyři by měly být uvedeny do provozu do roku 2020.

³⁸ Podle dohody mezi Indií a USA z roku 2010 bude dokonce v indickém zařízení na přepracování vyhořelého paliva zpracováváno i vyhořelé palivo z USA (WNA 2011a).

³⁹ Podepsat NPT je pro Indii politicky nepřijatelné.

⁴⁰ Zabezpečené rezervy thoria dosahují v Indii 319 000 tun, tedy 13 % celosvětových zásob (WNA 2011a).

5.2.2.2 Čína

Čína je v současnosti největší rozvojovou zemí světa⁴¹. V roce 2010 její počet obyvatel dosáhl 1,336 mld. Reálné HDP této druhé největší ekonomiky světa bylo v roce 2010 5,745 bln. dolarů a HDP na osobu (PPP) 7 400 dolarů. (CIA 2011b). Svým HDI 0,663 se Čína řadí na 89. místo na světě do skupiny zemí se středním lidským rozvojem (UNDP 2010). Díky vysokému počtu obyvatel a rychlému ekonomickému rozvoji s roční mírou růstu 10,3 % (2010) se v této zemi rapidně zvyšuje poptávka po energii. Spotřeba elektřiny na osobu se v období let 1980–2000 každé desetiletí zvýšila v průměru dvakrát. V roce 1980 byla její hodnota pouhých 281 kWh/os., v roce 1990 už 511 kWh/os., v roce 2000 993 kWh/os. a v minulé dekádě se růst ještě zrychlil, takže ke zdvojnásobení došlo přibližně po 5 letech. V roce 2006 spotřeba na osobu činila 2040 kWh (UN Statistics Division 2011).

V roce 2010 byl celkový výkon všech čínských elektráren 962 GWe, ale do roku 2020 by měl vzrůst až na 1600 GWe. V Číně, která je již nyní největším konzumentem energie na světě, bylo v roce 2009 vyrobeno 3 643 TWh elektřiny. 15 % elektrické energie je sice vyrobeno v hydroelektrárnách, ale celých 80 % pochází z uhelných elektráren, což má za následek silné znečištění ovzduší a závislost na dovozu uhlí (WNA 2011b). Kromě toho, že současný čínský energetický mix je neudržitelný, je také mezinárodně kritizovaný. Čína je totiž státem s největším množstvím vypouštěných skleníkových plynů na světě⁴². Z výše uvedených důvodů by bylo vhodné, aby Čína více rozrůžnila svůj energetický mix, tak aby v něm hlavní úlohu měly obnovitelné zdroje energie a jaderná energie. Ve skutečnosti přesně o to se Čína v posledních letech snaží. V zemi jsou uskutečňovány masivní investice do výstavby slunečních, větrných a jaderných elektráren.

V současnosti Čína v jaderných elektrárnách vyrábí 65,7 TWh elektrické energie, což jsou pouhá 2 % z celkové výroby elektřiny. Představitelé státu jsou si vědomi nutnosti zvýšit tento podíl, takže v zemi dochází k rapidnímu rozšíření jaderné energetiky. Tato expanze má potenciál stát se největší a nejvýznamnější expanzí jaderné energetiky

⁴¹ Někteří experti mohou namítat, že řadit Čínu mezi rozvojové země již není díky jejímu obrovskému rozvoji vhodné. Čína sama se však stále rozvojovou zemí nazývá.

⁴² V roce 2006 dosahovaly čínské emise oxidu uhličitého 6,2 mld. tun a Čína tak předstihla i USA, jejichž emise byly 5,9 mld. tun. V roce 2030 se očekává prohloubení propasti mezi těmito státy. Zatímco USA by měly vypouštět 7,7 mld. tun CO₂, u Číny se předpokládá až 11,7 mld. tun (WNA 2011b).

v historii. V současnosti je v zemi 13 funkčních reaktorů o celkovém výkonu 10 234 MWe. 27 reaktorů se staví, dalších 50 je plánovaných a 110 navržených (viz. Příloha č. 6). Podle vládního plánu Čína hodlá do roku 2020 postavit jaderné elektrárny o celkovém výkonu 80–90 GWe, do roku 2030 o výkonu 200–250 GWe a do roku 2050 dokonce o výkonu 400 GWe (WNA 2010; Kovan 2011). Předpokládá se, že Čína bude vlastnit jedny z největších jaderných elektráren na světě (Kadrnožka 2008). Od roku 2020 by měly mezi nově konstruovanými reaktory převládat RMR, jejichž celkový výkon by měl do roku 2050 vzrůst na 200 GWe a do roku 2100 až na 1400 GWe (WNA 2011b)

Po nedávných událostech v Japonské Fukushima se však objevily zprávy, že Čínská vláda hodlá pozastavit expanzi jaderné energetiky do doby, než budou prověřeny bezpečnostní opatření jednotlivých reaktorů. Čínský jaderný průmysl tvrdí, že bezpečnostní systémy jsou v Čínských reaktorech nadprůměrně účinné. Následkem Fukushimašské havárie se ale začalo debatovat i o ostatních negativách jaderné energie. Konkrétně v Číně problém představuje vysoká spotřeba vody jaderných elektráren. V zemi jsou totiž častá sucha a energetický sektor o vodu soupeří se zemědělstvím, které je nezbytně důležité pro zajištění potravinové bezpečnosti. Ani přes zmíněné sporné otázky se ale zastavení agresivní expanze neočekává (Green-Weiskelová 2011). Již nyní proběhla úspěšná bezpečnostní prověrka několika desítek reaktorů, včetně těch ve výstavbě.

Většina Čínských reaktorů jsou velké reaktory s čistým výkonem 1 000 MWe a více (IAEA 2000). Čína nejdříve přijímala technologie z Kanady, Francie a Ruska, v současnosti již vyvíjí a staví vlastní designy reaktorů, včetně RMR (Kovan 2011). V zemi je zatím v provozu pouze jeden malý experimentální RMR o tepelném výkonu 65 MWt a elektrickém výkonu 20 MWe. K síti bude připojen koncem tohoto roku. První komerční RMR o výkonu 1000 MWe chce vláda spustit v roce 2022 (WNA 2011c).

Co se palivového cyklu týče, Čína sice těží uran a vlastní zařízení na jeho zpracování, obohacení, výrobu paliva i přepracování paliva, ale není kompletně soběstačná. Domácí těžba uranu pokryje poptávku jen z poloviny, takže země bude muset s importem pokračovat, ale alespoň v ostatních zmíněných oblastech by se ráda stala soběstačnou v příštích několika letech. Co se týče uskladnění vysoce radioaktivního odpadu, lokalita

pro hlubinné úložiště by měla být vybrána do roku 2020 a úložiště by mělo začít fungovat okolo roku 2050 (WNA 2011c).

5.2.2.3 Jihoafrická republika

Jihoafrická republika je nejbohatší africkou zemí, její reálné roční HDP v roce 2010 dosáhlo 354 mld. dolarů. V JAR žilo 49 milionů obyvatel a HDP na osobu (PPP) činilo 10 700 dolarů (CIA 2011c). Podle HDI 0,597 JAR patřila mezi země se středním lidským rozvojem (UNDP 2010).

Ve srovnání s ostatními vybranými zeměmi (Čínou, Indií, Argentinou a Brazílií) má JAR poměrně vysokou spotřebu energie na osobu. Již v roce 1980 dosahovala spotřeba elektřiny na osobu hodnoty 3600 kWh. Mezi lety 1990–2000 se pohybovala okolo 4400 kWh/os. a do roku 2006 vzrostla na 4800 kWh/os. (UN Statistics Division 2011). JAR má kvalitní elektrickou síť, propojenou s ostatními zeměmi. Hlavním výrobcem i distributorem elektřiny je státní společnost *Eskom*, která ročně vyrobí 95 % elektřiny spotřebované v JAR a 45 % elektřiny spotřebované na celém kontinentu. Elektrárny *Eskomu* v roce 2008 vyrobily 230 TWh elektřiny (z celkových 239 TWh vyrobených v JAR), přičemž přibližně 93 % bylo vyrobeno v tepelných elektrárnách, 5 % v jaderných reaktorech a zbytek z obnovitelných zdrojů (IAEA 2009a).

Jihoafrická republika je v současnosti jedinou zemí na kontinentu, která vlastní jadernou elektrárnu. Její první reaktor Koeberg 1 s výkonem 900 MWe byl uveden do provozu v roce 1984 a její druhý reaktor Koeberg 2 s tímž výkonem v roce 1985 (Kovan 2011). Oba reaktory vyrobily v roce 2008 12,7 TWh elektřiny. Jelikož se v minulých letech poptávka po elektřině nebezpečně přiblížila nabídce, JAR plánuje stavět další elektrárny. Nedávno vláda vytvořila strategický energetický plán pro období let 2010–2030. Při přípravě plánu JAR uvážila kromě ekonomické stránky i otázky změny klimatu a energetické bezpečnosti. Podle plánu se země chystá navýšit kapacitu elektráren o 52 GWe do roku 2030. V roce 2030 by 48 % elektřiny mělo být vyráběno v uhelných elektrárnách, 11 % ze zemního plynu, 6,5 % v hydroelektrárnách, 14,5 % z ostatních obnovitelných zdrojů a 13,5 % v jaderných elektrárnách. Ke zvýšení podílu jaderných elektráren v energetickém mixu JAR by mělo dojít v důsledku stavby šesti

nových reaktorů o celkovém výkonu 9600 MWe. Jakého typu reaktory budou a kdo bude dodavatelem, je v současnosti nejisté (WNA 2011d).

Země má dostatek uranu pro vlastní potřebu, v roce 2008 vytěžila 565 tun uranu (OECD/NEA a IAEA 2010) a spotřebovala jich jen 321 (viz. Příloha č. 6). Obohacování a výrobu paliva pro *Eskom* zajišťují jiné státy, například Rusko. V rámci energetické soběstačnosti však země uvažuje o rozvoji všech zařízení nutných ke zpracování uranové rudy na palivo. Co se vyhořelého paliva týče, prozatím je skladováno v elektrárně Koeberg. V blízké budoucnosti by ale mělo být posíláno na přepracování do zahraničí (WNA 2011d).

Zajímavé jsou počiny JAR na poli výzkumu a vývoje. V letech 1993–2010 země pracovala na vývoji vlastního typu malého reaktoru čtvrté generace *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR), který měl být využit pro kogeneraci elektřiny a tepla. Pro nedostatek financí a zájemců o koupi ale vláda projekt zastavila (Kovan 2011; WNA 2011d).

5.2.2.4 Brazílie

Brazílie je se svými 203 miliony obyvateli 5. největší zemí světa. Reálné roční HDP této země bylo v roce 2010 2,024 bln. dolarů a roční míra ekonomického růstu činila 7,5 %. HDP na osobu (PPP) dosáhlo 10 900 dolarů (CIA 2011d). Podle HDI 0,699 se Brazílie řadila mezi země s vysokým lidským rozvojem (UNDP 2010).

Jako v každé rozvojové zemi s rychlým ekonomickým růstem, i v Brazílii roste poptávka po energii. V roce 1980 byla hodnota spotřeby elektřiny na osobu 1000 kWh, o 10 let později už 1500 kWh a v roce 2007 až 2200 kWh (UN Statistics Division 2011). Brazílie – největší konzument energie v Latinské Americe – v roce 2007 vyrobila 445 TWh elektrické energie, ale 39 TWh byla navíc nucena importovat. Podle OECD/IEA (2006) by výroba elektrické energie v Brazílii měla vzrůst na 731 TWh v roce 2030. Brazílie je výjimečná svým energetickým mixem. V roce 2007 celých 84 % vyrobené elektrické energie pocházelo z hydroelektráren, pouhých 8,5 % z tepelných elektráren, 3,5 % z biomasy a 3 % z jaderných elektráren (WNA 2011e). Dva brazilské

reaktory o celkovém elektrickém výkonu 1901 MWe v roce 2009 vyrobily 12,2 TWh elektřiny.

Již v 70. letech Brazílie uzavřela dohodu o stavbě jaderných reaktorů s Německem. Kvůli finančním problémům se ale stavba reaktorů musela o několik let odložit a v 80. letech reorganizovat. První jaderný reaktor – Angra 1 s výkonem 626 MWe byl v Brazílii uveden do provozu v roce 1985. Reaktor Angra 2 s výkonem 1270 MWe byl k síti připojen v roce 2000 (Kovan 2011; WNA 2011e). Ačkoli Brazílie dále plánuje stavět hydroelektrárny, potenciál vodní energie je v této obrovské zemi limitovaný a rostoucí poptávku po elektřině bude třeba zajistit i z jiných zdrojů. Proto v roce 2008 Brazílská státní společnost *Electrobras Electronuclear S.A.* (provozovatel reaktorů) uzavřela dohodu s francouzskou AREVOU, která se zavázala dokončit reaktor Angra 3 o hrubém výkonu 1405 MWe. Práce na reaktoru sice započaly již v roce 1984, ale pro nedostatek prostředků byly přerušeny. Znovu obnoveny byly až v roce 2010 s tím, že reaktor by měl být dokončen do roku 2015. Další 4 reaktory o celkovém výkonu 4000 MWe jsou zatím ve fázi návrhu a počítá se s tím, že jejich dodavatelem bude taktéž AREVA (WNA 2011e).

Pro Brazílii by rozšíření jaderného programu mohlo být zajímavé už z důvodu, že vlastní 278 000 tun uranu⁴³, tedy 5 % z celosvětových zásob (OECD/NEA a IAEA 2010). Veškerý uran je vyhrazen pro domácí použití. Až donedávna byl ale na obohacení posílán do zahraničí. Po mnohaletém výzkumu Brazílie v roce 2006 oficiálně otevřela komerční zařízení na obohacování uranu v Resende. Toto zařízení by v budoucnu mělo obohacovat uran pro celou Latinskou Ameriku, například pro Venezuelu a Chile, které vyjádřily zájem o stavbu nových reaktorů (Kovan 2011). Vyhořelé palivo je v současnosti skladováno v lokalitě elektrárny Angra. Před dokončením reaktoru Angra 3 by ale Brazílie měla přijmout rozhodnutí o dalším nakládání s vysoce radioaktivním odpadem (WNA 2011e).

Co se výzkumu a vývoje týče, Brazílie vyvíjí vlastní typ malého reaktoru pro námořní použití a participuje na několika mezinárodních dohodách o spolupráci na výzkumu (např. GIF) (WNA 2011e).

⁴³ Těžitelných za méně než 130 dolarů za kg.

6. Budoucnost využití jaderné energie ve světě se zaměřením na rozvojové země

V této kapitole se budu kromě uvedení prognóz využití jaderné energie ve světě zamýšlet především nad tím, ve kterých nových zemích by mohla být jaderná energie využita, jaké předpoklady by měly takové země splňovat, jaké faktory ovlivní jejich rozhodování a případně jakým překážkám čelí. Na závěr kapitoly představím, pro jaké další účely by jaderná energie mohla být v blízké i vzdálené budoucnosti využita a jaké nové technologie jsou perspektivní z hlediska řešení energetické krize.

6.1 Prognózy využití jaderné energie ve světě

Dle projekcí IAEA (2010a) by celková kapacita jaderné energie měla do roku 2030 vzrůst na 511 GWe podle nízkého odhadu a 807 GWe podle vysokého. Podle DOE/EIA (2010) by jaderné elektrárny v roce 2030 ve světě měly vyrobit 3 800 TWh elektřiny. 61 reaktorů je právě ve výstavbě, 158 se jich plánuje pro příštích 10 let a dalších 326 reaktorů, které jsou prozatím ve fázi návrhu, by mohlo být postaveno v časovém horizontu 15 let (viz. Příloha č. 6).

Nukleární energie zůstane technologií rozvinutých a velkých rozvojových zemí. Růst kapacity se očekává především v důsledku výstavby nových reaktorů v zemích, kde je již technologie zavedena. Nicméně do roku 2030 IAEA očekává i rozšíření technologie do přibližně 20 nových zemí. Největší expanze jaderné energie se očekává v Asii, a to v Japonsku, Jižní Koreji, Číně a Indii. V Japonsku a Jižní Koreji, kde energetická bezpečnost je prioritou, mezi důvody zvýšení kapacity patří skutečnosti, že alternativy jsou vzácné a drahé. V Číně a v Indii by k významnému rozšíření jaderné energetiky mělo dojít v důsledku zvýšené spotřeby energie. V některých zemích Evropy je podle McDonalda (2008) také očekávána expanze jaderné energie, a to v důsledku obav o změnu klimatu. V Evropě ale nepanuje konsenzus o nutnosti jaderné energie, a tak zatímco Rusko, Francie, Finsko, Bulharsko a Ukrajina plánují expanzi a Litva a Turecko plánují zavést jaderné programy, Dánsko, Irsko a Rakousko řekly jaderné energii jasné „NE“ a v Německu a Belgii také panují protinukleární nálady. Co

se Ameriky týče, v USA, Kanadě, Mexiku, Brazílii i Argentině pravděpodobně dojde ke stavbě nových reaktorů. V Africe se očekává jen mírný nárůst kapacity.

6.2 Prognózy využití jaderné energie v zemích, které zatím jaderné elektrárny nemají

Podle Goldemberga (2009) v roce 2009 IAEA evidovala přibližně 50 nových zemí⁴⁴, většinou rozvojových, které projevíly zájem o využití jaderné energie pro výrobu elektřiny. Tyto země tvoří nesourodou skupinu a mají různou výši HDP. Goldemberg analyzoval možnosti daných zemí uspět v postavení prvních reaktorů a dospěl k závěru, že je vysoce nepravděpodobné, že by všech 50 zemí uspělo v zavedení jaderné energetiky. Největšími překážkami jsou podle autora nekompatibilní rozvodná síť a nedostatek financí. Goldemberg tvrdí, že pro stavbu jaderných elektráren je třeba mít roční HDP nejméně 50 miliard dolarů a elektrickou síť s kapacitou minimálně 10 GW. Jen 16 z 50 zmíněných zemí splňuje tato kritéria (tučně zvýrazněny v poznámce č. 44). To však neznamená, že země, jež kritéria nesplňují, jsou automaticky vyloučeny. Například vláda Vietnamu, který Goldembergova kritéria nesplňuje, v roce 2010 schválila plán na výstavbu reaktorů s celkovým elektrickým výkonem 156 GWe do roku 2030. Vietnam jedná s Ruskem a první 2 reaktory by měl postavit do roku 2020. S Japonskem jedná o dalších projektech a nevyklučuje ani spolupráci s Jižní Koreou, Kanadou, Čínou, Francií a USA (Kovan 2011).

V roce 2010 se téže problematice věnovala Jewellová, která zkoumala schopnosti a motivace 52⁴⁵ zemí ke stavbě prvního reaktoru a srovnávala je s daty ze zemí, které nukleární programy mají. Autorka vycházela z následujících předpokladů. Co se finančních předpokladů týče, Jewellová počítala s tím, že aby země mohla vybudovat

⁴⁴ Mezi země na seznamu patřily **Alžírsko**, Bahrajn, Bangladéš, **Bělorusko**, Bolívie, **Chile**, Chorvatsko, Dominikánská republika, **Egypt**, Salvador, Estonsko, Gruzie, Ghana, **Řecko**, Haiti, **Indonésie**, Izrael, Jamajka, Jordánsko, **Kazachstán**, **Keňa**, Kuvajt, Lotyšsko, Libye, **Malajsie**, Mongolsko, Maroko, Myanmar, Namibie, Nigérie, Omán, Peru, **Filipíny**, **Polsko**, Katar, **Saúdská Arábie**, Senegal, Singapur, Srí Lanka, Súdán, Sýrie, Tanzanie, **Thajsko**, Tunisko, **Turecko**, **Spojené Arabské Emiráty**, Uruguay, **Venezuela**, Vietnam a Jemen. Autor seznam získal v roce 2008 osobní korespondencí s Rognerem, pracovníkem IAEA (Goldemberg 2009).

⁴⁵ Na seznamu Jewellové, která rovněž vychází z Rognerových informací, tentokrát prezentovaných v roce 2009 v Číně, se ve srovnání s Goldembergovým seznamem navíc objevují Eritrea, Uganda, Ekvádor, Kuba, Paraguay, Itálie, Portugalsko a Albánie a chybí Bolívie, Salvador, Haiti, Izrael, Omán a Srí Lanka (Jewellová 2010).

reaktor o velikosti 1000 MWe, měla by mít při ceně 4000 dolarů/kWe k dispozici minimálně 4 miliardy dolarů. Technickým požadavkem je velikost sítě nad 10 GW, jelikož jeden reaktor by neměl představovat více než 5–10 % kapacity sítě. V zemi by dále nemělo chybět institucionální zajištění a politická stabilita. A konečně, země by měla být silně motivována rostoucí poptávkou po elektřině a snahou zajistit energetickou bezpečnost. Autorka měřila splnění těchto předpokladů různými indikátory a rozdělila země do 4 skupin podle pravděpodobnosti, s jakou se jim podaří uspět v rozvoji jaderné energetiky na země, kde je rozvoj jaderné energetiky vysoce pravděpodobný, nejistý, možný jen za silné mezinárodní spolupráce a nepravděpodobný. Seznam jednotlivých zemí, zařazených do skupin, lze nalézt v Tabulce 1.

Tabulka 1 Skupiny zemí podle pravděpodobnosti rozvoje jaderné energetiky

Skupina	Charakteristika skupiny	Seznam zemí
Rozvoj jaderné energetiky vysoce pravděpodobný	Splněny technické i finanční předpoklady Politicky stabilní země Nízké riziko proliferace	Kuvajt, Spojené Arabské Emiráty, Malajsie, Chile, Saúdská Arábie, Řecko, Portugalsko, Singapur, Polsko, Itálie
Rozvoj jaderné energetiky nejistý	Splněny podmínky i motivace Politicky nestabilní země Hrozí zneužití technologie	Indonésie, Turecko, Bangladéš, Egypt, Thajsko, Nigérie, Filipíny, Venezuela, Peru, Alžírsko
Rozvoj jaderné energetiky možný jen za silné mezinárodní spolupráce	Při regionální spolupráci splněny technické i finanční podmínky Relativně politicky stabilní země	Sýrie, Vietnam, Bělorusko, Libye, Bahrajn, Katar, Kazachstán, Jordánsko, Dominikánská Republika, Maroko, Chorvatsko, Lotyšsko, Estonsko, Uruguay
Rozvoj jaderné energetiky nepravděpodobný	Nesplňují finanční podmínky Nesplňují technické podmínky Nízké motivace Politicky nestabilní země	Namibie, Keňa, Myanmar, Súdán, Tunisko, Senegal, Jemen, Ekvádor, Ghana, Gruzie, Uganda, Tanzanie, Albánie, Paraguay, Mongolsko

Zdroj dat: Jewellová (2010)

Počet zemí, které mají zájem o využití jaderné energie pro výrobu elektřiny, se pravděpodobně stále zvyšuje. Podle zprávy *International Status and Prospects of Nuclear Power* (IAEA 2010b) již 65 zemí uvažuje o jaderné energii jako o součásti

jejich budoucího energetického mixu. IAEA neuvádí konkrétní seznam zemí, ale dělí je do několika skupin, které jsou uvedeny v Tabulce 2. Podle organizace by první jaderný reaktor mohlo v roce 2030 spustit 10–25 z nich. Není ale vyloučeno, že toto číslo ještě vzroste nebo naopak klesne. Doba mezi rozhodnutím země vybudovat první reaktor a jeho zprovozněním často dosahuje 10–15 let, proto je v současnosti těžké odhadovat, kolika zemím se to podaří.

Tabulka.2 Skupiny zemí podle fáze přípravy rozvoje jaderné energetiky

31	Země, které zatím neplánují stavbu reaktoru, ale mají zájem o záležitosti, týkající se jaderného programu.
14	Země, které uvažují o stavbě prvního reaktoru a pravděpodobně a plán se jim pravděpodobně podaří uskutečnit.
7	Země, které se aktivně připravují na zavedení jaderného programu, ještě však nepřijaly konečné rozhodnutí.
10	Země, které se již rozhodly postavit první reaktor a připravují potřebnou infrastrukturu.
2	Země, které si již objednaly reaktor.
1	Země, které staví první reaktor.

Zdroj dat: (IAEA 2010b, s. 11). Přeloženo, upraveno.

6.3 Faktory ovlivňující budoucí využití jaderné energie

Budoucí využití jaderné energie bude podle Murraye (2000) ovlivněno mnoha faktory. Mezi ně patří například čas nezbytný pro vývoj a zdokonalení nekonvenčních energetických technologií, spotřeba primární a elektrické energie jednotlivých států daná stavem národní ekonomiky a průmyslového rozvoje, zásoby a ceny fosilních paliv, potenciál pro využití obnovitelných zdrojů a cena elektřiny z nich vyrobené. Velmi důležitými činiteli, které mohou rozhodnout o stavbě jaderné elektrárny, jsou reakce mezinárodního společenství a postoj veřejnosti.

Mezi významné faktory patří i motivace. V rozvinutých a stále častěji i v rozvojových zemích, se jednou z hlavních motivací pro úvahy o stavbě nových reaktorů stává změna klimatu. Existují ale i jiné možnosti, jak omezit vypouštění skleníkových plynů.

Pro rozvojové země je v současnosti levnější investovat do CCS technologie⁴⁶ či stavby vodních elektráren⁴⁷. Nejpodstatnější důvody pro stavbu jaderných elektráren v rozvojových zemích jsou snaha pokrýt narůstající poptávku po energii a snaha zajistit energetickou bezpečnost diversifikací energetického mixu. Některé rozvojové země také mohou vidět jadernou technologii jako „vstupní pas do prvního světa“ (Goldemberg 2009, s. 71).

Pro konečné rozhodnutí o konstrukci jaderné elektrárny bude – kromě pečlivého zvážení všech kontroverzních aspektů jaderné energie, analyzovaných ve čtvrté kapitole – fundamentální zejména druh, dostupnost a cena jaderné technologie a splnění předpokladů pro stavbu a provoz jaderného zařízení.

6.4 Předpoklady pro zavedení jaderné energie do nových zemí

Není v možnostech této práce analyzovat konkrétní podmínky, které by země usilující o zavedení jaderného programu měly splnit. Proces introdukce jaderné energie je složitý, stejně jako pozdější udržování jaderné energetiky v chodu. Jen stručně zmíním nejdůležitější předpoklady implementace jaderné technologie pro výrobu elektřiny. První podmínkou je existence kompatibilní (nefragmentované, stabilní) rozvodné sítě. Dále by státy předem měly pečlivě vybrat vhodnou a bezpečnou lokaci pro elektrárnu, sehnat dostatečné množství financí pro konstrukci elektrárny, počítat s finančním rizikem v důsledku zpoždění při výstavbě elektrárny, zajistit si dodávku jaderného paliva, naplánovat strategie zacházení s radioaktivním odpadem, zvážit bezpečnost elektráren, přijmout opatření k omezení rizik proliferace, zajistit právní i průmyslovou infrastrukturu, zajistit podporu veřejnosti a vypořádat se s opozicí v okolních státech (IAEA 2009b). Státy dále musí přijmout řadu mezinárodních dohod týkajících se mírového využití jaderné energie. Při bližším pohledu na jednotlivé kroky, které je nezbytné učinit, se může zdát, že zavedení jaderné energie do nejméně vyspělých zemí světa je téměř nemožné. Podle Squassoni (2009) měly již v minulosti některé země zájem o stavbu jaderných reaktorů, ale musely od návrhů především z důvodu

⁴⁶Technologie zachytávání a skladování uhlíku, anglicky *Carbon Capture and Storage*.

⁴⁷V rozvojových zemích je využita pouze třetina hydroelektrického potenciálu, v Subsaharské Africe ještě méně (Goldemberg 2009).

nedostatku financí upustit. Nejvýznamnější předpoklady využití jaderné energie jsou popsány níže.

6.4.1 Legislativa

Co se legislativy týče, v mnoha zemích již existují zákony týkající se mírového využití jaderné energie, jelikož i když země doposud nemají jaderné reaktory pro výrobu elektrické energie, některé vlastní výzkumné jaderné reaktory nebo používají jadernou technologii v lékařství či průmyslu. Stávající legislativu je třeba doplnit o oblasti týkající se udělování licencí pro jaderné reaktory, konání inspekcí, posílení radiační kontroly, vypracování plánů pro případ pohotovosti atd. (IAEA 2006).

6.4.2 Technické a manažerské schopnosti

Čím více má země zkušeností s jadernou technologií, ať již průmyslovou, výzkumnou či lékařskou, tím lepší má pozici pro zavedení jaderné energetiky. Jaderná energetika je vysoce rozvinuté odvětví, vyžadující odborný a zkušený personál. Pokud ho ale země v počátcích nemá, dá se tento problém snadno řešit. Spolupráci totiž nabízí nejen dodavatel technologie, ale i mezinárodní organizace jako například IAEA a WANO⁴⁸. IAEA poskytuje zemi asistenci s plánováním i rozvojem infrastruktury, včetně pomoci s vytvořením legislativního rámce pro jadernou energetiku a operátorovi elektrárny nabízí technickou spolupráci. WANO zajišťuje výměnu zkušeností a odborných znalostí mezi operátory jaderných elektráren v různých zemích. Dále zprostředkovává technickou podporu a programy na profesionální a technický rozvoj. Další možností pro rozvojové země je vytvořit dohody o regionální spolupráci.

Celosvětovým problémem však začíná být nedostatek jaderných inženýrů. Mnoho současných expertů se přibližuje k důchodovému věku a jen malý počet studentů se zabývá jadernou energií. To může ohrozit výzkum a vývoj jaderné technologie i provoz jaderných zařízení. Vážnější nedostatek expertů je v rozvojových zemích.

⁴⁸ Světová asociace provozovatelů jaderných zařízení (*World Association of Nuclear Operators*) je mezinárodní organizací založenou v roce 1989. Jejími členy je 115 provozovatelů jaderných reaktorů v 34 zemích. WANO také spolupracuje s výrobcí a prodejci reaktorů.

Například JAR má k dispozici 3500 jaderných odborníků ale odhaduje, že dalších několik set jich bude potřebovat v příštích letech (Freemanová 2006). Pozornost vlád se tedy v poslední době soustředí k univerzitám a výzkumu

6.4.3 Financování

Problémy s financováním byly částečně popsány v části ekonomické aspekty využití jaderné energie v kapitole 4. Jelikož je to však největší výzva pro rozvojové země, zmíním několik možností řešení. Předně by bylo pro malé země výhodnější stavět malé a střední reaktory, které nejsou tak nákladné, jako velké reaktory a postačující pro ně je síť s menší kapacitou. Důvodem, proč jsou na trhu nabízeny především velké jaderné reaktory (o výkonu nad 1000 MWe) jsou výnosy z rozsahu (*economies of scale*). Pro země, které chtějí této výhody využít, existuje několik možností řešení problému. Konstrukční náklady lze snížit zaměstnáním zpravidla levnější místní pracovní síly a použitím materiálů vyráběných místním průmyslem. Místní materiály jsou levnější a země ušetří za dopravu. Těmito způsoby však pravděpodobně nelze náklady snížit významně. Rozumnější možností tak bude regionální spolupráce. Několik sousedních zemí může sdílet náklady na projekt, čímž se sníží rizika pro jednotlivé země a státy zároveň budou moci využívat výnosů z rozsahu (UNEA 2009).

6.4.4 Technologie – elektrická síť a velikost reaktorů

Nejefektivněji může být jaderná energie využita v městských oblastech, kde je vysoká koncentrace poptávky po elektřině a energeticky vysoce náročná průmyslová odvětví. Města a průmysl vyžadují trvalé zásobení elektřinou a i pro rozvojové státy se tam vyplatí postavit kvalitní elektrickou síť. Konvenční nukleární reaktory stejně jako tepelné elektrárny vyžadují dobrou rozvodnou síť (Lester a Rosner 2009). V rozvojových zemích, kde stále velká část populace žije na venkově, je všeobecně nedostatečně rozvinutá infrastruktura. To se týká i energetické rozvodné sítě. Pro venkovské oblasti rozvojových zemí, zejména v subsaharské Africe je vhodnější použít decentralizované obnovitelné zdroje energie, například solární energii. Vysokonapětní přenos energie je podle Greenpeace (2009) v řídké osídlených oblastech s nízkou spotřebou energie drahý a zbytečný. Možnosti uplatnění pro jadernou energii

v takových oblastech nabízí snad jen nové malé typy reaktorů, které jsou víceméně stále ve vývoji.

Pro hustěji osídlené oblasti by jaderná energie mohla být vhodným zdrojem. Je ale třeba vybudovat stabilní elektrickou síť s dostatečnou kapacitou. Výpadky elektřiny způsobené přerušáním provozu velkých jaderných reaktorů mohou totiž síť s nedostatečnou kapacitou destabilizovat. V méně kvalitní síti zase dochází ke ztrátám přenosem v důsledku technických problémů a krádeží (Greenpeace 2009).

6.5 Budoucí vývoj jaderné energie – nové technologie

Co se technologických inovací týče, od roku 2030 by měly být komerčně dostupné RMR a do roku 2050 či do konce století se pro zajištění celosvětové poptávky po energii počítá s kombinací hydroelektráren a RMR či jaderné fúze. Pravděpodobně také dojde k přechodu světa z karbonové ekonomiky na vodíkovou. Jako zdroj energie v odlehlých oblastech s nízkou spotřebou energie a pro domácnosti v rozvinutých zemích budou použity obnovitelné zdroje energie či malé jaderné reaktory.

6.5.1 Malé reaktory

Na trhu v současnosti převládají velké reaktory o výkonu nad 1000 MWe. Jako alternativu lze ale pořídit i střední reaktory o výkonu 300–700 MWe či malé reaktory do výkonu 300 MWe. Střední a malé reaktory mají několik výhod, které je předurčují pro použití v odlehlých oblastech rozvinutých i rozvojových zemí. Mezi hlavní výhody patří kratší konstrukční čas, nižší konstrukční náklady, vyšší bezpečnost a multifunkčnost některých typů. Několik států (například Indie, Rusko a Japonsko) se intenzivně věnuje vývoji malých reaktorů, které vyrábí elektřinu a teplo, které dále bude využito pro ohřev vody či vytápění. Reaktory malé a střední velikosti jsou dále vhodné k desalinizaci vody. K tomuto účelu jsou používány například v Japonsku, Kazachstánu, Indii, Jižní Koreji, Pákistánu a Číně (IAEA 2006).

Mezi nadějně typy reaktorů bezesporu patří velmi malé reaktory, které jsou v současnosti vyvíjeny především v Rusku, USA, Japonsku, Jižní Koreji a Číně.

Reaktory jsou různého typu i výkonu. Jedním z nich je například 4S (Super bezpečný malý a jednoduchý, anglicky *Super-Safe, Small&Simple*) reaktor japonské firmy Toshiba. Reaktor je továrně naplněn a palivo v něm vydrží 30 let. Dodavatel si vyhořelé palivo po zmíněné době vyzvedne. Výkon reaktoru je 10 MWe, přičemž konstrukční náklady na kWh činí 2500 dolarů. Cena reaktoru je tedy 25 milionů dolarů a cena elektřiny 5–7 centů za kWh (Hore-Lacy 2006). Velmi malé reaktory jsou vhodné zejména pro odlehlé oblasti a myslím, že v blízké budoucnosti by mohly být zakoupeny i některými rozvojovými zeměmi. Ideálně by mohly být uplatněny v menších městech o několika tisících residentů.

6.5.2 Jaderná fúze

Mnoho vědců i politiků vkládá naděje do uskutečnění a komerčního využití jaderné fúze, jakožto ideálního zdroje energie. Zavedení jaderné fúze do praxe by vyřešilo veškeré problémy s energií, jakým lidstvo v současnosti čelí, neboť taková energie by byla čistá, udržitelná a bez vzniku radioaktivního odpadu. Jaderná fúze funguje na principu slučování jader lehkých prvků např. vodíku a jeho izotopů – deuteria a tritia. Stejná reakce probíhá ve hvězdách. Při slučování prvků dochází ke vzniku mnohem většího množství energie než při jaderném štěpení. Na Zemi navíc existují téměř neomezené zásoby paliva – mořské vody. Obsah deuteria v mořské vodě je asi 0,017 % a z 1 kg lze vyrobit 24–93 GWh elektrické energie. Problémem však je, že pro nastartování termojaderné syntézy je třeba simulovat extrémní podmínky, které panují například v jádru Slunce. Je třeba vyrobit plazma a zahřát ho na 150 milionů stupňů. Reakci se zatím podařilo udržet jen několik sekund, ale už to je úspěchem. Dnes se na světě nachází asi 100 experimentálních tokamaků, z nichž 20 je velkých. Nejznámější jsou projekty JET⁴⁹ a ITER⁵⁰. Významným krokem byla v roce 2005 dohoda USA, EU, Ruska, Japonska, Číny a Jižní Koreji o stavbě společného reaktoru ve francouzském Cadarche. Státy plánují investovat do spuštění, naplánovaného na rok 2015, a následného 20letého provozu zařízení 10 miliard EUR (Kadrnožka 2008). Díky tomu kolik prostředků je investováno do vývoje fúze a kolik špičkových vědců

⁴⁹ JET (*Joint European Torus*) je projektem EU, zahájeným v roce 1983. V rámci projektu byl poblíž Oxfordu postaven největší tokamak na světě.

⁵⁰ ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) je supravodivý tokamak postavený blízko Ženevy.

se výzkumem této technologie zabývá, osobně věřím, že jadernou fúzi se ještě za mého života podaří rozvinout až ke komerčnímu využití. Jaderná fúze by jednou mohla konečně zajistit přístup k elektřině pro všechny obyvatele této planety. Jak jsem popsala v úvodní kapitole, přístup k energii vede ke zlepšení životního standardu. Fúze, RMR i malé jaderné reaktory by tedy v průběhu tohoto století mohly významně přispět k vymýcení chudoby.

6.6 Další možnosti využití jaderné energie

Kromě výroby elektrické energie lze tepla z reaktorů v jaderných elektrárnách využít pro odsolování mořské vody a pro vodíkovou ekonomiku.

6.6.1 Desalinizace

Nedostatek čisté pitné vody je vážnou hrozbou rozvoje a stability státu. Asi pětina populace nemá přístup k čisté pitné vodě a kombinace rostoucí populace a změny klimatu situaci ještě zhoršují. Proto využití jaderné energie pro odsolování mořské a brakické vody může nejen pozitivně ovlivnit rozvoj, ale potenciálně může zabránit i konfliktům o vodu. Na světě existuje přes 15 000 odsolovacích zařízení, z nichž většina využívá energie fosilních paliv. To by se ale v budoucnu mohlo změnit. Již nyní jsou k tomuto účelu jaderné reaktory využívány a dokonce jsou cenově kompetitivní. V budoucnu by malé reaktory s dvojnásobným účelem výroby elektřiny a desalinizace mohly být používány ve větší míře (El-Genk 2008; WNA 2011f).

6.6.2 Vodíková ekonomika

Mnoho vědců vidí budoucnost v kombinaci jaderné energie a vodíkového hospodářství. Navrhovaný systém by byl čistý, bezpečný a efektivní. Vodík by se v budoucnosti mohl stát významnou náhradou za fosilní paliva a mohl by být použit v dopravě, pro vytápění i ohřev vody. Vodík je levný a vysoce účinný zdroj energie. Je vynikajícím palivem, jelikož produktem jeho spalování je jen voda a vynikajícím nosičem energie, jelikož

může být snadno akumulován. Ačkoli je vodík na Zemi nejrozšířenějším prvkem a nachází se ve vodě, ledu, organických i anorganických sloučeninách, nelze ho těžít. Vodík tedy musíme vyrábět, a to buď elektrolýzou nebo vysokoteplotním rozkladem vody (Hore-Lacy 2006; European Commission 2006). Jen jaderná energie má dostatečnou kapacitu vyrábět vodík v množství potřebném pro nahrazení fosilních paliv.

V dopravě by elektřina vyráběná v jaderných elektrárnách mohla posloužit jako „palivo“ do elektromobilů nebo pro výrobu vodíku⁵¹. Vodík mohl být použit buď v kapalném skupenství přímo do spalovacích motorů dopravních prostředků či ve formě palivových článků. Výhodou je, že paliva (mořské vody) by byl dostatek na celou předpokládanou existenci lidstva (Lovelock 2008). Před jejím rozšířením je však třeba doladit jisté nedostatky. V současnosti je zacházení s vodíkem a jeho skladování drahé, jelikož vodík tvoří se vzduchem výbušnou směs a jeho malé molekuly snadno pronikají i malými netěsnostmi. Bude také potřeba vybudovat rozsáhlou potrubní síť pro přepravu vodíku (European Commission 2006). Zavádění technologie do praxe můžeme očekávat nejdříve za 20 let, do té doby budou fosilní zdroje mít stále hlavní roli v zásobování světa energií (Hore-Lacy 2006).

Jaderná energie a vodíkové hospodářství mají z technologického hlediska potenciál zajistit přístup k čisté energii v dostatečném množství pro všechny obyvatele planety v horizontu několika desítek let. Tím mohou vyřešit problém změny klimatu, a přispět i k řešení mnoha jiných globálních výzev. Jaká ovšem bude reálná situace za několik desítek let, to lze stěží předvídat. Rozšíření zmíněného systému totiž nezávisí pouze na technologii. K vybudování potřebné infrastruktury i koupi nových zařízení (včetně dopravních prostředků) bude třeba investovat nemalé množství financí, kterých je v rozvojových zemích nedostatek. Rozšíření systému tak bude pravděpodobně nejprve uskutečněno v rozvinutých zemích. Pokud od nich rozvojové země neobdrží v rámci solidarity a globálního zájmu na zastavení změny klimatu a znečišťování životního prostředí dostatečnou finanční a jinou asistenci, žádoucí změny lze očekávat později. Není ani vyloučeno, že až příliš pozdě.

⁵¹ Elektromobily i palivové články již existují. Technologie pouze potřebuje být zdokonalena. Hlavními problémy jsou krátká dojezdová vzdálenost a velká hmotnost baterií.

7. Závěr

Tato práce se snažila nalézt odpověď na otázku, jaká budoucnost čeká jadernou energii ve světě, především v rozvojových zemích.

Z kapitoly popisující energetickou krizi jasně vyplynulo, že motivace pro zavedení jaderné energie jsou velmi silné. Spotřeba primární i elektrické energie roste, a to zejména v rozvojových zemích. Význam energie pro rozvoj, zvyšování životního standardu a snižování chudoby je zřejmý. Co se týče změny klimatu, je vysoce pravděpodobné, že je způsobena nadměrným vypouštěním skleníkových plynů ze spalování fosilních zdrojů. Tyto zdroje jsou navíc vyčerpatelné v příštích několika desítkách let, proto je jasné, že kromě zvyšování energetické účinnosti bude třeba krizi řešit i nahrazením fosilních paliv obnovitelnými zdroji energie a jadernou energií.

V kapitole analyzující kontroverzní aspekty jaderné energie bylo dokázáno, že tento zdroj má velmi mnoho přínosů. Nejvýznamnějšími z nich jsou skutečnosti, že jaderná energie je „zeleným“ zdrojem, neznečišťujícím životní prostředí, je ekonomicky konkurenceschopná a dlouhodobě udržitelná. Navíc přispívá ke zvýšení energetické bezpečnosti. Problémy jsou však kromě negativního postoje veřejnosti i riziko jaderné havárie a hrozba proliferace. Jaderný odpad je asi nejkontroverznějším tématem, jelikož i v případě využití rychle množivých reaktorů a přepracování paliva, část vysoce radioaktivního odpadu vždy zůstane zachována a bude muset být po tisíciletí uložena na Zemi.

Jak jsem správně předpokládala, rozšíření jaderné energie je v blízké budoucnosti velmi pravděpodobné. K největší expanzi dochází v Číně a v Indii, jejichž mnohamilionová města a probíhající elektrifikace venkova rapidně zvyšují spotřebu energie. Tyto velké země zjistily, že jaderná energie je nutností. Jelikož mají Čína a Indie dostatek financí a expertů, nejenže staví nové reaktory ve spolupráci s dodavateli z vyspělých zemí, ale dokonce i úspěšně rozvíjí vlastní programy výzkumu a vývoje. V Brazílii a v Jihoafrické republice se sice také očekává nárůst celkové kapacity jaderných elektráren, nikoliv však tak agresivní, jako v Indii a v Číně.

Největší expanze v dějinách jaderné energetiky se odehraje v blízké budoucnosti v Asii. V ostatních částech světa se tak významné navýšení celkových kapacit jaderných

elektráren neočekává. Potenciál zavést jadernou energii v příštích 20 letech má však asi 20 zemí z více než 60, které vyjádřily zájem o tom uvažovat. Celkově lze říci, že jaderná energie je vhodná především pro oblasti, kde je vysoká a koncentrovaná spotřeba energie a pro země s dostatkem financí, kvalitní infrastrukturou (hlavně stabilní elektrickou sítí s dostatečnou kapacitou) a silnou motivací v podobě rychle rostoucí spotřeby energie. Největší překážkou, které země usilující o stavbu jaderných elektráren čelí, je zejména nedostatek financí. Ačkoli celkově je cena elektřiny vyráběné v jaderných elektrárnách srovnatelná s cenou elektřiny vyráběné v tepelných elektrárnách a mnohem nižší než cena elektřiny z obnovitelných zdrojů, obrovskou kapitálovou investicí je třeba uskutečnit ještě před tím, než začne být elektrárna výnosná. Ani tento problém však není neřešitelný. Země si může pořídit menší levnější reaktor nebo spolupracovat se sousedními zeměmi. Co se týče oblastí, kde jaderná energie budoucnost nemá, jedná se především o odlehlé venkovské oblasti nízkopříjmových rozvojových zemí. Pro odlehlé oblasti je jaderná energie vhodná jen ve formě malých reaktorů, ale i ty budou pravděpodobně pro některé rozvojové země příliš drahé. Pro srovnání možností využití obnovitelných zdrojů a malých jaderných reaktorů ve zmíněných oblastech bude třeba počkat, zda se velmi malé reaktory rozšíří a poté zkoumat, který ze zdrojů bude vhodnější.

Ve vzdálenější budoucnosti lze očekávat přechod z karbonového věku na vodíkový věk. Kombinace rychle množivých reaktorů či jaderné fúze s použitím vodíku v dopravě by znamenala úplné vyřešení energetické krize. K celosvětovému rozšíření ale asi dojde jen tehdy, obdrží-li rozvojové země podporu od rozvinutých států.

Závěrem lze poznamenat, že žádný seriózní vědec netvrdí, že je jaderné štěpení panaceou. Osobně jsem však přesvědčená, že ve srovnání s fosilními zdroji je jaderná energie „menší zlo“ a pro zajištění rostoucí poptávky po energii v rozvojových zemích, zejména v Číně a v Indii, je nutností. Pokud se ovšem v blízké budoucnosti změní situace a obnovitelné zdroje budou schopny pokrýt celosvětovou poptávku po energii nebo bude nalezena nová efektivnější bezpečnější a dlouhodobě udržitelná technologie pro výrobu elektřiny, pak zmizí i důvod pro využívání jaderného štěpení.

Seznam literatury:

_____ (2009). The dilemma. *World Conservation: The Magazine of the International Union for Conservation of Nature*, **39** (2) October 2009, 32.

ADAMANTIADIS, A. a KESSIDES, I. (2009). Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. *Energy policy*, **37** (2009), 5149–5166.

ARM, Stuart T. (2010). Nuclear Energy: A Vital Component of Our Energy Future. *Chemical Engineering Progress*, July 2010, **106** (7), 28, 30, 32, 34.

BRADSHAW, Michael (2008). Resources and Development. V knize: DANIELS, Peter, BRADSHAW, Michael, SHAW, Denis a SIDAWAY, James (editoři). *An Introduction to Human Geography: Issues for the 21st Century*. Třetí edice, Harlow, Pearson Education.

BROWN, Mark T., COHEN, Matthew J., SWEENEYOVÁ Sharlynn (2009). Predicting national sustainability: The convergence of energetic, economic and environmental realities. *Ecological Modelling*, **220** (2009), 3424–3438.

BURKE, Paul J. (2010). Income, resources, and electricity mix. *Energy Economics*, **32** (2010), 616–626.

CIA (2011a). *The World Factbook :South Asia :: India*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/in.html>

CIA (2011b). *The World Factbook: East & Southeast Asia :: China*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ch.html>

CIA (2011c). *The World Factbook: Africa :: South Africa*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/sf.html>

CIA (2011d). *The World Factbook: South America :: Brazil*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/br.html>

- COMBY, Bruno (2007). *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.
- DOE/EIA (2010). *International Energy Outlook 2010*. Washington, DOE/EIA.
- EERKENS, Jeff W. (2010). *The Nuclear Imperative: A Critical Look at the Approaching Energy Crisis (More Physics for Presidents)*. Druhá edice, Springer.
- EL-GENK, Mohamed (2008). On the introduction of nuclear power in Middle East countries: Promise, strategies, vision and challenges. *Energy Conversion and Management*, 49 (2008), 2618–2628.
- EVANS, Robert L. (2007). *Fuelling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy*. Cambridge, Cambridge University Press.
- EUROPEAN COMMISSION (2006). *World Energy Technology Outlook 2050 – WETO H₂*. Brussels, European Commission: Directorate-General for Research.
- FREEMANOVÁ, Marsha (2006). A Renaissance in Nuclear Power Is Under Way Around the World. *Executive Intelligence Review*, **33** (8), 19–21.
- GOLDEMBERG, José (2009). Nuclear Energy in Developing Countries. *Daedalus*, fall 2009, **138** (4), 71–80.
- GOLDEMBERG, José a LUCON, Oswaldo (2010). *Energy, environment and development*. London, Earthscan.
- GREENPEACE (2009). *Nuclear Power: an obstacle to rapid development*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese:
<http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/nuclear-power-an-obstacle-to/>
- GREEN-WEISKELOVÁ, Lucia (2011). China Rethinks Nuclear Power. [online]. *The Nation*, 21 April. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese:
<http://www.thenation.com/article/160095/china-rethinks-nuclear-power?page=full>
- HAMMOND, Geoffrey Paul (1997). Nuclear energy into the 21st century. V knize: SOARES, O. D. D. a kol. (editoři). *Innovation and Technology - Strategies and Policies*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

HORE-LACY, Ian (2006). *Nuclear Energy in the 21 st Century*. London, World Nuclear University Press.

CHIDAMBARAM, R. (2009). *TERI and INS organize a National workshop on 'Nuclear Energy Development in India: addressing climate change, public perceptions and large scale deployment'*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: http://www.teriin.org/index.php?option=com_pressrelease&task=details&sid=162

CHONTANAWAT, Jaruwat, HUNT, Lester C. a PIERSE, Richard (2008). Does energy consumption cause economic growth? Evidence from a systematic study of over 100 countries. *Journal of Policy Modeling*, **30** (2008), 209–220.

IAEA (2000). *Power Reactor Information System*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>

IAEA (2006). *Nuclear Technology Review 2006*. Vienna, IAEA.

IAEA (2009a). South Africa. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2009/countryprofiles/SouthAfrica/SouthAfrica2003.htm>

IAEA (2009b). *Common User Considerations (CUC) by Developing Countries for Future Nuclear Energy Systems*. Vienna, IAEA.

IAEA (2010a). *Nuclear Technology Review 2010*. Vienna, IAEA.

IAEA (2010b). *International Status and Prospects of Nuclear Power*. Vienna, IAEA.

IMF (2010). *World Economic and Financial Surveys. World Economic Outlook. Database—WEO Groups and Aggregates Information. Country Composition of WEO Groups*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2010/01/weodata/groups.htm>

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Hlavní tým: PACHAURI, Rajendra K. a REISINGER, Andy (editoři)]. Geneva, IPCC.

IPCC (2011). *Organization*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>

JANOUC, František (2007). Úvodní slovo. V knize: COMBY, Bruno. *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.

JEWELLOVÁ, Jessica (2011). Ready for nuclear energy?: An assessment of capacities and motivations for launching new national nuclear power programs. *Energy Policy*, **39** (3), 1041–1055.

KADRNOŽKA, Jaroslav (2008). *Globální oteplování Země. Příčiny, Průběh, Důsledky, Řešení*. Brno, VUTIUM.

KINSHORE, V. V. N. (2007). India`s energy mix. V publikaci: GARDNER, Stephen, THORPE, Ed a VUTZ, Cornelia (editoři). *Renewable energy: potential and benefits for developing countries*. Brussels, Konrad-Adenauer-Stiftung.

KOVAN, Dick (2011). The global renaissance continues: A review of the recent past and a look ahead. *Nuclear News*, February 2011, 52–54 a 59–62.

LEE, Chien-Chiang (2005). Energy consumption and GDP in developing countries: A cointegrated panel analysis. *Energy Economics*, **27** (2005), 415–427.

LESTER, Richard K. a ROSNER, Robert (2009). The growth of nuclear power: drivers&constraints. *Daedalus*, Fall 2009 **138** (4), 19–30.

LOMBORG, Bjorn (2006). *Skeptický ekolog: Jaký je skutečný stav světa?* Praha, Dokořán.

LOVELOCK, James (2008). *Gaia vrací úder*. Praha: Academia.

MACALISTER, Terry (2009). Key oil figures were distorted by US pressure, says whistleblower. [online]. *Guardian.co.uk*, Monday 9 November. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/nov/09/peak-oil-international-energy-agency>

MALLAH, Subhash (2010). Nuclear energy option for energy security and sustainable development in India. *Annals of Nuclear Energy*, **38** (2011), 331–336.

- MCDONALD, Alan (2008). Nuclear Power. Global Status. A look at nuclear power generation around the World and its future prospects. *IAEA Bulletin*, **49** (2), 45–48.
- MEADOWSOVÁ, Donella H., MEADOWS, Dennis L. a RANDERS, Jorgen (1995). *Překročení mezí*. Praha, Argo.
- MILLER, G.Tyler Jr. (1992). *Living in the environment: an introduction to environmental science*. Sedmá edice, Belmont(California): Wadsworth Publishing.
- MOORE, Patrick (2007). Předmluva. V knize: COMBY, Bruno. *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.
- MURRAY, Raymond L. (2000). *Nuclear Energy : An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 5. edice, North Carolina, Butterworth Heinemann.
- OECD/IEA (2006). *World Energy Outlook 2006*. Paris, OECD/IEA.
- OECD/IEA (2010). *World Energy Outlook 2010*. Paris, OECD/IEA.
- OECD/IEA a OECD/NEA (2010). *Projected Costs of Generating Electricity 2010*. Paris, OECD.
- OECD/NEA a IAEA (2010). *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*. Paris, OECD.
- SCURLOCK, Jonathan (2007). Nuclear Energy: An Introductory Primer. V knize: ELLIOTT, David (editor). *Nuclear or Not? Does Nuclear Power Have a Place in a Sustainable Energy Future?*. Basingstoke, Palgrave Macmillan.
- SMALLEY, Richard E. (2005). Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge. *Materials Research Society Bulletin*, **30** (June 2005), 412–417.
- SOKOLOV, Y. A. a MCDONALD, A. (2005). The Nuclear Power Options for Africa. *African Technology Development Forum Journal*, **2** (2), 12–18.
- SOVACOOOL, Benjamin K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, **36** (2008), 2940–2953.

SOVACOOOL, Benjamin K. a D`Agostino, Anthony (2010). Nuclear Renaissance: A Flawed Proposition. *Chemical Engineering Progress*, July 2010, **106** (7), 29,31,33,35.

SQUASSONI, Sharon (2009). *Nuclear Energy. Rebirth or Resuscitation?*. Washington, Carnegie Endowment for International Peace.

SRIVASTAVA, Leena (2009). India`s challenge. *World Coservation: The Magazine of the International Union for Conservation of Nature*, **39** (2) October 2009, 31.

SRIVASTAVA, Leena (2011). *We need the power, but with scrutiny*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese:

http://www.teriin.org/index.php?option=com_featurearticle&task=details&sid=673

STERN, Nicholas, PETERS, Siobhan, BAKSHI, Vicki, BOWEN, Alex, CAMERON, Catherine, CATOVSKY Sebastian, CRANE Di, CRUICKSHANK, Sophie, DIETZ, Simon, EDMONDSON, Nicola, GARBETT, Su-Lin, HAMID, Lorraine, HOFFMAN, Gideon, INGRAM, Daniel, JONES, Ben, PATMORE, Nicola, RADCLIFFE, Helene, SATHIYARAJAH, Raj, STOCK, Michelle, TAYLOR, Chris, VERNON, Tamsin, WANJIE, Hannah a ZENGHELIS, Dimitri (2006). *Stern Review: The Economics of Climate Change*. London, HM Treasury.

UN STATISTICS DIVISION (2011). *UNdata: Electric power consumption (kWh per capita)*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese:

http://data.un.org/Data.aspx?d=WDI&f=Indicator_Code%3aEG.USE.ELEC.KH.PC

UN WEHAB WORKING GROUP (2002). *A Framework for Action on Energy*. Johannesburg 2002 World Summit on Sustainable Development.

UNDP (2010). *Human Development Report 2010. The Real Wealth of Nations: Pathways to Human Development*. [online]. New York, Palgrave Macmillan. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese:

<http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010/chapters/en/>

UNDP a WHO (2009). *The Energy Access Situation in Developing countries: A Review Focusing on the Least Developed Countries and Sub-Saharan Africa*. New York, UNDP.

UNEA (2009). *Energy for Sustainable Development: Policy Options for Africa*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: http://www.uneca.org/eca_resources/publications/unea-publication-tocsd15.pdf

UNITED NATIONS POPULATION DIVISION (2008). *World Population Prospects. The 2008 Revision*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://esa.un.org/unpp/>

WIKILEAKS CENTRAL (2010). *2010-12-11: WikiLeaks in today's media: Cablegate coverage*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://wlcentral.org/node/588>

WNA (2010). *Asia`s Nuclear Energy Growth*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf47.html>

WNA (2011a). *Nuclear Power in India*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html>

WNA (2011b). *Nuclear Power in China*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html>

WNA (2011c). *China`s Nuclear Fuel Cycle*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: http://www.world-nuclear.org/info/inf63b_china_nuclearfuelcycle.html

WNA (2011d). *Nuclear Power in South Africa*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf88.html>

WNA (2011e). *Nuclear Power in Brazil*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf95.html>

WNA (2011f). *Nuclear Desalinization*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/inf71.html>

WNA (____). *The Biosphere At Risk*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: <http://www.world-nuclear.org/why/biosphere.html>

Přílohy

Seznam příloh

Příloha č. 1: Primární zdroje energie	77
Příloha č. 2: Princip výroby elektřiny z jaderné energie.....	79
Příloha č. 3: Palivový cyklus	80
Příloha č. 4: Konvenční typy reaktorů	81
Příloha č. 5: Rychle množivé reaktory.....	82
Příloha č. 6: Tabulka: Jaderné reaktory ve světě v roce 2011	83
Příloha č. 7: Radioaktivita	85
Příloha č. 8: Jaderné havárie	86

Příloha č. 1: Primární zdroje energie

Klasifikace zdrojů energie	Zdroj energie	Výhody	Nevýhody
Neobnovitelné (fossilní)	Uhlí	Relativně snadná dostupnost V zemi se zásobami uhlí nejlevnější zdroj tepla a elektřiny (nezapočítány externí náklady)	Spalováním vznikají skleníkové plyny přispívající ke změně klimatu Spalováním vznikají látky znečišťující ovzduší – negativní dopad na životní prostředí a lidské zdraví Zásoby zhruba jen na 150 let Nízká účinnost uhelných elektráren (40 %)
	Ropa	Relativně levná a dostupná Nejúčinnější z fosilních zdrojů ve spalování, přepravě i skladování	Spalováním vznikají skleníkové plyny přispívající ke změně klimatu Spalováním vznikají látky znečišťující ovzduší – negativní dopad na životní prostředí a lidské zdraví Úniky ropy znečišťují ŽP Zásoby zhruba jen na 46 let
	Zemní plyn	Čistý Levný Kombinovaný zdroj tepla a energie O 50 % nižší emise CO ₂ než ropa, uhlí	Zásoby zhruba jen na 60 let Vyžaduje potravní systém distribuce
Jaderná energie	Uran	Čistý provoz: nízké emise CO ₂ , neprodukuje látky znečišťující životní prostředí Palivo (uran) dostupné na relativně dlouhou dobu Vysoká koncentrace energie v jednotce hmoty (vysoká efektivita využití uranu) Stálá a spolehlivá produkce elektrické energie	Vysoké kapitálové náklady Velká spotřeba vody pro chlazení Nutno zajistit zkušené experty pro provoz Podmíněna existencí dobré infrastruktury Riziko zneužití (šíření jaderných zbraní) Riziko nehody a šíření radioaktivity Produkce radioaktivního odpadu
Obnovitelné	Geotermální energie	Dopady na životní prostředí zanedbatelné V mnoha zemích nevyužitý potenciál	Využití možné jen v omezeném počtu oblastí
	Biomasa	Využití místo fosilních paliv redukuje emise skleníkových plynů V rozvojových zemích může přinést zisky producentům a tak pomoci snížit chudobu	Vyžaduje velké množství půdy a vody – možný negativní dopad na potravinovou bezpečnost Možné negativní dopady na životní prostředí: a) pěstovány jako monokultury, v nichž se snadno šíří škůdci a choroby b) samy se mohou stát invazivním druhem a mít tak negativní dopad na biodiverzitu Přímé spalování pro vaření a topení může mít negativní dopad na lidské zdraví

Solární energie	<p>Velký potenciál v některých zemích s dostatkem slunečního svitu</p> <p>Nejrychleji rostoucí sektor energie, výzkum přináší stále nové možnosti využití solárních článků pro výrobu elektřiny a topení</p> <p>Vhodné pro odlehlé komunity v rozvojových zemích či pro doplnění spotřeby v domácnostech (ohřev vody, nízkoenergetické spotřebiče)</p>	<p>Málo koncentrovaný zdroj energie</p> <p>Velký záběr plochy, omezené možnosti využití pro velké komunity</p> <p>Závislost na počasí a geografické lokaci – jen velmi omezené využití v mírných šířkách severní polokoule</p> <p>Velké kapitálové náklady</p> <p>Zásoby vzácných minerálů pro výrobu solárních článků jsou omezené a při výrobě křemíkových článků vzniká chemické znečištění</p> <p>Neposkytují energii nepřetržitě</p>
Větrná energie	<p>Jeden z nejrychleji expandujících obnovitelných zdrojů energie v současnosti</p>	<p>Málo koncentrovaný zdroj energie</p> <p>Není ekonomicky konkurenceschopný s ostatními zdroji energie, proto vyžaduje velkou vládní podporu (dotace)</p> <p>Závislost na počasí – generuje energii asi jen 25 % požadovaného času</p> <p>Záběr plochy</p> <p>Možný negativní dopad na živočichy, a to jak na souši, tak na moři</p> <p>Hlučnost</p>
Vodní energie	<p>V současnosti dominantní obnovitelný zdroj energie</p> <p>Možnost expanze v rozvojových zemích</p>	<p>V rozvinutých zemích je již potenciál plně využíván a expanze do budoucna je limitovaná</p> <p>Vysídlování oblastí pro stavbu přehrady</p> <p>Možné negativní dopady na biodiverzitu</p>
Energie vln, přílivu a odlivu	<p>Velký potenciál (zatím ale jen experimentální projekty)</p>	<p>Využití možné jen v omezeném počtu oblastí</p> <p>Nebezpečí zničení pobřežních ekosystémů</p>

Zdroje dat:

COMBY, Bruno (2007). *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.

HORE-LACY, Ian (2006). *Nuclear Energy in the 21 st Century*. London, World Nuclear University Press.

KADRNOŽKA, Jaroslav (2008). *Globální oteplování Země. Příčiny, Průběh, Důsledky, Řešení*. Brno, VUTIUM.

LOVELOCK, James (2008). *Gaia vrací úder*. Praha: Academia.

MILLER, G.Tyler Jr. (1992). *Living in the environment: an introduction to environmental science*. Sedmá edice, Belmont(California): Wadsworth Publishing.

Příloha č. 2: Princip výroby elektřiny z jaderné energie

Existují dva způsoby, jakými získat energii z jádra – jaderné štěpení a jaderná fúze. V současnosti se využívá pouze první způsob. Štěpení je vyvoláno srážkou elektricky nenabitého neutronu, který skrz elektrické pole atomu pronikne až k jeho jádru a to rozštěpí. Aby se proces mohl odehrát, je nutno zpomalit neutrony pomocí moderátoru – například vody, grafitu či těžké vody (D_2O) – a použít prvek s velkým těžkým jádrem (nejčastěji uran ^{235}U , plutonium ^{239}Pu či thorium). Při rozpadu jádra uranu se uvolní tepelná energie a většinou 2–3 neutrony, které se sráží s dalšími atomy uranu a štěpí je. Tento proces se nazývá řetězová reakce. Uran má mnohem vyšší energetickou hustotu než fosilní paliva. To je důvodem, proč jaderná elektrárna spotřebuje méně paliva než elektrárny tepelné pro výrobu stejného množství elektřiny. Štěpné reakce probíhají v jaderných reaktorech. Tepelná energie uvolněná při štěpení jader ohřívá vodu v připojeném potrubí, kde vzniká pára, která pohání turbosoustrojí, jehož pohybová síla se v generátoru přeměňuje na elektrickou energii. Pro udržování kontroly nad reakcí je nutno reaktor chladit. Nápadnou součástí jaderných elektráren jsou chladicí věže, kterých se ovšem není třeba obávat, jelikož produktem chlazení je jen neškodná vodní pára.

Příloha č. 3: Palivový cyklus

V konvenčních jaderných reaktorech se jako palivo nejčastěji používá štěpitelný izotop uranu ^{235}U . Použití uranu pro výrobu elektřiny v jaderné elektrárně představuje ale jen část dlouhé cesty paliva, která začíná v uranových dolech. Problémem je, že 99,3 % uranu v přírodě tvoří pomalými neutrony neštěpitelný izotop ^{238}U a obsah potřebného ^{235}U v uranové rudě je jen 0,7 % (Kadrnožka 2008). Proto je po úpravě rudy třeba ji obohatit přibližně na 3–5 % před jejím použitím pro výrobu pelet do palivových článků. Poměrně složitý proces přeměny uranové rudy na palivo do reaktorů je složen z několika mezistupňů, kdy vznikají různé chemické sloučeniny a také radioaktivní odpad. Přibližně po 3–4 letech je koncentrace ^{235}U příliš nízká a palivo je třeba vyměnit (Hore-Lacy 2006). Otázka vyhořelého paliva je zatím nedořešená. Existují dvě varianty palivového cyklu: otevřený cyklus a uzavřený cyklus. Při otevřeném cyklu je palivo použito jen jednou a poté je uskladněno. Při uzavřeném cyklu je vyhořelé palivo použito v rychle množivých reaktorech či přepracováno. Přepracovat (recyklovat) palivo znamená chemicky separovat štěpitelné izotopy (97 % objemu). Přepracované palivo může být znovu použito v klasických reaktorech, čímž se zvyšují zásoby paliva a redukuje množství odpadu. Kanada, Finsko, Švédsko a USA se prozatím rozhodly pro uskladňování odpadu, kdežto Francie, Velká Británie, Japonsko, Čína, Indie a Rusko přepracovávají vyhořelé palivo nebo ho skladují pro budoucí přepracování (McDonald 2008). Většina zemí se prozatím nerozhodla pro strategii, takže investují do výzkumu, sledují vývoj v zahraničí a vyčkávají.

Zdroje:

MCDONALD, Alan (2008). Nuclear Power. Global Status. A look at nuclear power generation around the World and its future prospects. *IAEA Bulletin*, **49** (2), 45–48.

KADRNOŽKA, Jaroslav (2008). *Globální oteplování Země. Příčiny, Průběh, Důsledky, Řešení*. Brno, VUTIUM.

HORE-LACY, Ian (2006). *Nuclear Energy in the 21 st Century*. London, World Nuclear University Press.

Příloha č. 4: Konvenční typy reaktorů

Za poslední půlstoletí se konstrukční typy reaktorů zásadně proměnily. První generace reaktorů zahrnovala designy padesátých let, které měly prokázat funkčnost technologie. Do druhé generace reaktorů patří již komerční konstrukční typy vyráběné v šedesátých až devadesátých letech 20. století. Jaderná technologie je stále bezpečnější a současné tlakovodní a varné reaktory Generace III a III+ jsou toho důkazem. Současné typy reaktorů mají výkon zhruba 1200–1600 MWe a nabízejí vylepšená bezpečnostní opatření, snížené kapitálové náklady, jednodušší údržbu a kratší dobu výstavby než v minulosti. Dokonce jsou schopny odolat povodním, požáru i útokům vojenských a velkých civilních letadel (Adamantiades a Kessides 2009). V současnosti nejvíce zastoupené typy reaktorů jsou lehkovodní reaktory, které představují 90 % světového instalovaného jaderného výkonu (Lester a Rosner 2009). Účinnost obou typů se pohybuje v rozmezí 30–35 % (Kadrnožka 2008). Ještě vyšší požadavky jsou kladeny na novou, již čtvrtou, generaci reaktorů, u které se očekává komerční využití do roku 2030. V roce 2001 se několik států (Argentina, Brazílie, Francie, Kanada, Jižní Korea, Japonsko, JAR, Velká Británie a USA) rozhodlo podepsat dohodu o založení Mezinárodního fóra pro reaktory IV. generace (The Generation IV International Forum, dále jen GIF). Později se připojily Švýcarsko, Rusko, Čína a Euratom. Úkolem členů GIF je pracovat na společném výzkumu a vývoji, který povede k představení reaktorů splňujících kritéria udržitelnosti, konkurenceschopnosti, bezpečnosti a spolehlivosti. Do nové generace reaktorů budou patřit například reaktory s uzavřeným palivovým cyklem.

Zdroje:

ADAMANTIADES, A. a KESSIDES, I. (2009). Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. *Energy policy*, **37** (2009), 5149–5166.

LESTER, Richard K. a ROSNER, Robert (2009). The growth of nuclear power: drivers&constraints. *Daedalus*, Fall 2009 **138** (4), 19–30.

KADRNOŽKA, Jaroslav (2008). *Globální oteplování Země. Příčiny, Průběh, Důsledky, Řešení*. Brno, VUTIUM.

Příloha č. 5: Rychle množivé reaktory

Rychle množivý reaktor (anglicky *Fast Breeder Reactor*, dále jen RMR) funguje na principu přeměny ^{238}U na ^{239}Pu . Reaktor produkuje více paliva, než spotřebovává, v důsledku čehož by zásoby paliva světa mohly vystačit na několik tisíc let. RMR využívá až 60 % přírodního uranu, na rozdíl od klasických typů reaktorů, jež využívají méně než 1 % (Kadrnožka 2008). Na rozdíl od konvenčních typů reaktorů je ovšem chlazen sodíkem a při selhání chlazení hrozí nekontrolovatelná štěpná reakce. Experimentální RMR byly zprovozněny ve Velké Británii, Rusku, Francii, Německu, USA a Japonsku. Od 50. let 20. století jich celosvětově bylo zprovozněno asi 20. Mezi počáteční nedostatky patřila vysoká cena, nebezpečné úniky sodíku a výroba nedostatečného množství plutonia. Později ale vývoj pokročil a francouzský 1300MWe Superphénix generoval elektřinu bez problémů několik let, než byl z politických důvodů v roce 1998 odstaven (Hore-Lacy 2006). Dnes vlastní RMR Rusko, Japonsko, Čína a Francie (Comby 2007, Kadrnožka 2008). Pokud bude do vývoje RMR investováno dostatečné množství prostředků, má tato technologie velký potenciál stát se snad nejvýznamnější technologií pro výrobu elektřiny v příštích desetiletích.

Seznam zkratk:

RMR Rychle množivý reaktor

GIF The Generation IV International Forum

Zdroje:

COMBY, Bruno (2007). *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.

HORE-LACY, Ian (2006). *Nuclear Energy in the 21 st Century*. London, World Nuclear University Press.

MCDONALD, Alan (2008). Nuclear Power. Global Status. A look at nuclear power generation around the World and its future prospects. *IAEA Bulletin*, **49** (2), 45–48.

Příloha č. 6: Tabulka: Jaderné reaktory ve světě v roce 2011

Země	Výroba elektřiny v jaderných reaktorech 2009		Reaktory v provozu 1. 4. 2011		Reaktory ve výstavbě 1. 4. 2011		Plánované reaktory 1. 4. 2011		Navržené reaktory 1. 4. 2011		Potřebné množství uranu 2011
	TWh	% e	počet	MWe n	počet	MWe g	počet	MWe g	počet	MWe g	tuny U
Argentina	7,6	7,0	2	935	1	745	2	773	1	740	208
Arménie	2,3	45	1	376	0	0	1	1060			56
Bangladéš	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0	0
Bělorusko	0	0	0	0	0	0	2	2000	2	2000	0
Belgie	45	51,7	7	5943	0	0	0	0	0	0	1052
Brazílie	12,2	3,0	2	1901	1	1405	0	0	4	4000	311
Bulharsko	14,2	35,9	2	1906	0	0	2	1900	0	0	275
Kanada	85,3	14,8	18	12679	2	1500	3	3300	3	3800	1884
Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4400	0
Čína	65,7	1,9	13	10234	27	29790	50	57830	110	108000	4402
ČR	25,7	33,8	6	3722	0	0	2	2400	1	1200	680
Egypt	0	0	0	0	0	0	1	1000	1	1000	0
Finsko	22,6	32,9	4	2721	1	1700	0	0	2	3000	468
Francie	391,7	75,2	58	63130	1	1720	1	1720	1	1100	9221
Německo	127,7	26,1	17	20339	0	0	0	0	0	0	3453
Maďarsko	14,3	43	4	1880	0	0	0	0	2	2200	295
Indie	14,8	2,2	20	4385	5	3900	18	15700	40	49000	1053
Indonésie	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000	0
Írán	0	0	0	0	1	1000	2	2000	1	300	150
Izrael	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Itálie	0	0	0	0	0	0	0	0	10	17000	0
Japonsko	263,1	28,9	51	44642	2	2756	12	16532	3	4000	8195
Jordánsko	0	0	0	0	0	0	1	1000			0
Kazachstán	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600	0
KLDR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950	0
Jižní Korea	141,1	34,8	21	18716	5	5800	6	8400	0	0	3586
Litva	10,0	76,2	0	0	0	0	0	0	1	1700	0
Malajsie	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Mexiko	10,1	4,8	2	1600	0	0	0	0	2	2000	247
Nizozemí	4,0	3,7	1	485	0	0	0	0	1	1000	107
Pákistán	2,6	2,7	3	725	0	0	2	600	2	2000	68
Polsko	0	0	0	0	0	0	6	6000	0	0	0
Rumunsko	10,8	20,6	2	1310	0	0	2	1310	1	655	175
Rusko	152,8	17,8	32	23084	10	8960	14	16000	30	28000	3757
Slovensko	13,1	53,5	4	1816	2	880	0	0	1	1200	267
Slovinsko	5,5	37,9	1	696	0	0	0	0	1	1000	145
JAR	11,6	4,8	2	1800	0	0	0	0	6	9600	321
Španělsko	50,6	17,5	8	7448	0	0	0	0	0	0	1458
Švédsko	50,0	34,7	10	9399	0	0	0	0	0	0	1537
Švýcarsko	26,3	39,5	5	3252	0	0	0	0	3	4000	557
Thajsko	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5000	0
Turecko	0	0	0	0	0	0	4	4800	4	5600	0
Ukrajina	77,9	48,6	15	13168	0	0	2	1900	20	27000	2037
SAE	0	0	0	0	0	0	4	5600	10	14400	0
Velká Británie	62,9	17,9	19	10962	0	0	4	6680	9	12000	2235
USA	798,7	20,2	104	101229	1	1218	9	11662	23	34000	19427
Taiwan	39,9	29,7	6	4927	2	2700	1	1350	0	0	1344
Vietnam	0	0	0	0	0	0	2	2000	12	13000	0
Svět	2560	13,8	440	375 410	61	64 074	158	176 767	326	370 995	68 971

Poznámky:

Reaktory v provozu = reaktory připojené k elektrické síti;

Reaktory ve výstavbě = reaktory, na kterých již započaly stavební práce;

Plánované reaktory = schválené pro výstavbu, schválené financování či závazek, očekávány v provozu během 8–10 let;

Navržené reaktory = existují specifické návrhy programu či umístění reaktoru, očekávány v provozu většinou během 15 let.

MWe n (net) = čistý elektrický výkon reaktoru;

MWe g (gross) = hrubý elektrický výkon reaktoru;

% e = podíl elektřiny vyrobené v jaderných reaktorech z celkového množství vyrobené elektřiny, vyjádřeno v procentech;

SAE = Spojené arabské emiráty;

KLDR = Korejská lidově demokratická republika;

JAR = Jihoafrická republika;

ČR = Česká republika;

USA = Spojené státy americké.

Zdroj dat: World Nuclear Association (2011). *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements*. [online]. Poslední přístup 3. května na adrese: <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>

Příloha č. 7: Radioaktivita

Nejvýznamnější zdroj obav lidí z jaderných elektráren pramení v neznalosti základních faktů o radioaktivitě. Radioaktivní záření, které vzniká během rozpadu jader (většinou těžkých nestabilních prvků), je přirozenou součástí přírodního prostředí – přichází z vesmíru, zemského jádra i prvků na povrchu, z budov, potravin, nápojů i lidského těla. V různých oblastech na zemi se přirozeně liší podle nadmořské výšky a geologického podloží. V některých oblastech světa, například v indické Kerále, v brazilském Guarapari či íránském Ramsaru je přirozená radioaktivita až 100 krát vyšší než průměrná. I přesto ve zmíněných místech nebyl prokázán vyšší výskyt rakoviny (Comby 2007). Nejvyšší radioaktivní zátěž pro člověka představuje radon (50 %), kdežto jaderná energie je zdrojem méně než 0,01 % (Comby 2007). Průměrná dávka radioaktivity, které je člověk za rok vystaven je 2,4 mSv (miliSievertů). Vysoké dávky radioaktivního záření vedou k poškození DNA, a tedy k rozpadu či mutaci buněk, tím mohou způsobit smrt či onemocnění rakovinou. Pod hranicí jednorázové dávky 200 mSv ale nebyly prokázány dlouhodobé karcinogenní účinky. Hospitalizován musí být člověk vystaven dávce větší než 2 Sv. Při 3,5–4,5 Sv je šance přežití 50% a 10 Sv znamená jistou smrt během několika hodin či dní. Radioaktivita se snižuje s časem a vzdáleností a v atmosféře či moři je rychle zředěna. Při jaderné havárii mohou být oběti ozářeny nebo kontaminovány zvenčí či vnitřně. Nízké dávky radioaktivního záření mají ale jiný účinek, který lze pozorovat na organismech v okolí Černobylu. Zvířata a rostliny tam kupodivu prosperují více než před nehodou (Lovelock 2008). Oblast poskytuje unikátní příležitost prozkoumat doposud jen málo známé důsledky dlouhodobého vystavení radioaktivnímu záření na živé organismy. Výsledky nezávislých vědeckých studií z oblasti naznačují, že dlouhodobé vystavení nízkým dávkám záření nejenže není pro organismy škodlivé, dokonce posiluje imunitní systém.

Poznámky:

Sievert (Sv) je jednotkou vyjadřující účinek radiace na lidské zdraví.

Zdroje:

LOVELOCK, James (2008). *Gaia vrací úder*. Praha: Academia.

COMBY, Bruno (2007). *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.

Příloha č. 8: Jaderné havárie

Three Mile Island

Nehoda pátého stupně ve Three Mile Island v Pensylvánii v roce 1979, při níž bylo vážně poškozeno jádro reaktoru, je nejhorší jadernou havárií v historii USA (Miller 1992). Byla způsobena kombinací selhání techniky i lidského faktoru. Při nehodě nebyl nikdo usmrcen. I přestože odklizení následků nehody bylo velmi nákladné (1,2 miliardy amerických dolarů) a stálo více než výstavba poškozeného reaktoru (700 milionů dolarů) (Evans 2007), tato havárie dokázala, že bezpečnostní opatření jsou natolik spolehlivá, aby se zabránilo nekontrolovanému úniku radioaktivních materiálů do okolí (Janouch 2007).

Černobyl

Známa, přesto mýty opředená nehoda sedmého stupně v Černobylském jaderném reaktoru číslo čtyři se odehrála 26. 4. 1986. Oficiální příčinou exploze reaktoru byla kombinace selhání techniky chlazení a lidského faktoru. Podle Janoucha (2007) byla ale prvotní příčina politického charakteru, nikoliv chybou technologie. Černobylský typ reaktoru byl totiž konstruován pro výrobu plutonia pro vojenské účely, nikoliv pro výrobu elektřiny. Reaktoru chyběly ochranné pláště, které by zabránily úniku radioaktivity. Představitelé v Sovětském svazu potřebovali pokrýt rostoucí poptávku po energii a z ekonomických důvodů se rozhodli pro konstrukci tohoto typu reaktoru, který následně přetěžovali a s nímž dokonce experimentovali. Výsledkem byla exploze, následný několikadenní požár a únik značného množství radioaktivních materiálů do ovzduší. Radioaktivní materiály se díky povětrnostním podmínkám přenesly nejen nad území Evropských států, ale i celého světa. Ačkoli veřejnost se někdy mylně domnívá, že při nehodě a následkem ozáření zemřely tisíce lidí, potvrzených úmrtí je jen 56. Přesně 47 havarijních pracovníků zemřelo během několika dní na akutní nemoc z ozáření a devět dětí později zemřelo na rakovinu štítné žlázy. V době přechodu radioaktivního mraku nad zónou 10 km od Černobyly byla hodnota radiace 0,03 Sv, ve vzdálenosti 30 km 0,01 Sv. Rok po havárii byla v západní Evropě radiace zvýšená jen o 0,088 mSv. Podle Lovelocka (2008) dávky radiace, kterým byli vystaveni obyvatelé Ukrajiny, Běloruska a Ruska, jim možná zkrátily život o několik týdnů,

obyvatelům ostatních států Evropy o několik dnů či hodin. U všech jaderných havárií je ale těžké odhadnout počty obětí, jelikož je téměř nemožné prokázat kauzalitu mezi radioaktivním únikem z elektrárny a vznikem smrtelného onemocnění. Následky nehody vyšetřovalo i více než 100 expertů z Černobylského fóra, založeného v roce 2003 z iniciativy IAEA a několika dalších organizací. Experti došli k závěrům, že nadměrným dávkám radiace bylo vystaveno na 600 000 lidí a smrt v důsledku onemocnění rakovinou může být spojována s havárií u 4000 z nich (Adamantiades a Kessides 2009).

Fukushima

Havárie v Japonské Fukushimě Daiichi v březnu 2011 je nejnovějším příkladem rizik jaderných elektráren. Zemětřesení devátého stupně zapříčinilo přerušení dodávky elektrické energie. Reaktory v elektrárně byly sice automaticky vypnuty systémem detekujícím zemětřesení, avšak v reaktorech i po jejich vypnutí dochází v důsledku rozpadu štěpných produktů k tvorbě asi 1,5 % původního množství tepla. Z tohoto důvodu je nutné reaktory chladit. Asi hodinu po zemětřesení fungovaly záložní generátory, které napájely chladicí systém. Poté ale přišla 14metrová vlna tsunami, která generátory zaplavila. Po selhání chladicího systému se v jádrech vytvářela pára, zvyšoval se tlak a v důsledku poklesu chladicí vody byly palivové tyče obnaženy. V jednotce 2 došlo k výbuchu a poškození kontejnmentu, následkem čehož z reaktoru uniká radioaktivní voda. Další úniky radioaktivity jsou způsobeny poškozením chladicích systémů v bazénech s vyhořelým palivem. Personál elektrárny stále doplňuje chladicí vodu z externích zdrojů.

Havárie byla původně klasifikována stupněm pět, avšak později nejvyšším stupněm sedm. Situace je stále vážná a bude trvat několik měsíců, než dojde ke studenému odstavení reaktorů. Radioaktivita v atmosféře, půdě i mořské vodě je stále monitorována. Dávky však nejsou tak vysoké, jak se veřejnost obává. Žádný pracovník nezemřel na akutní nemoc z ozáření a nikdo nebyl vystaven jednorázovým dávkám větším než 250 mSv. Pro obyvatele žijící blízko elektrárny by dávka v prvním roce po nehodě neměla překročit 30 mSv. Je však nutné poznamenat, že škody způsobené havárií bude možné vyhodnotit až za několik měsíců či let. (WNA 2011).

Poznámky:

Sievert (Sv) je jednotkou vyjadřující účinek radiace na lidské zdraví.

Zdroje:

EVANS, Robert L. (2007). *Fuelling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy*. Cambridge, Cambridge University Press.

JANOUC, František (2007). Úvodní slovo. V knize: COMBY, Bruno. *Environmentalisté pro jadernou energii*. Praha, Pragma.

MILLER, G.Tyler Jr. (1992). *Living in the environment: an introduction to environmental science*. Sedmá edice, Belmont(California): Wadsworth Publishing.

LOVELOCK, James (2008). *Gaia vrací úder*. Praha: Academia.

ADAMANTIADES, A. a KESSIDES, I. (2009). Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospects. *Energy policy*, **37** (2009), 5149–5166.

WNA (2011). *Fukushima Accident 2011*. [online]. Poslední přístup 3. května 2011 na adrese: http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html