

# Jaderná energetika: rizika a alternativy

Zdeněk Bochníček, Přírodovědecká fakulta MU v Brně

Je nesporné, že jaderná energetika vzbuzuje ve společnosti nemalé obavy. Zamysleme se na chvíli nad reálností těchto obav a nad možnými alternativami jaderné energetiky.

Strach z jaderných elektráren má spíše psychologickou než faktickou příčinu. Ionizující záření je lidskými smysly nepostižitelné a může na lidské zdraví působit i velmi dlouho po ozáření. Proto budí tajemnou hrůzu z nepoznaného a zákeřného nebezpečí. Ne zcela právem. Ionizující záření patří totiž k pozemskému životu neoddělitelně jako déšť či vítr. V dávné minulosti byla úroveň radiace na Zemi dokonce podstatně vyšší než dnes, doprovázela celý vývoj života na Zemi a právě svojí schopností poškodit organické molekuly se významně podílela na evoluci.

## Ionizující záření kolem nás

Přirozené pozadí radiace pochází z vesmíru i pozemských zdrojů a jeho úroveň je v různých místech Země velmi rozdílná. Kosmické záření je absorbováno v atmosféře, a proto jeho intenzita roste s nadmořskou výškou tak, že ve výšce 3000 metrů nad mořem dosahuje celkové přirozené pozadí téměř dvojnásobku přímořské úrovně. Některé národy nebo skupiny obyvatel **proto** po tisíciletí žily a budou žít pod podstatně vyšší radiací zátěží, kterou není možné nijak potlačit.

Přirorodní zdroje ionizujícího záření člověk rozšířil o následující

- rentgenová a radioizotopová lékařská vyšetření a terapie
- atmosférické zkoušky jaderných zbraní (v menší míře i podzemní a podmořské)
- jaderné elektrárny s celým palivovým cyklem (výroba paliva a zpracování odpadu)
- některé spotřební výrobky (barevná televize, barviva).
- stavební materiály.

Přehled dávek z přirozených a některých umělých zdrojů je uveden v tabulce 1. Vidíme, že mezi umělými zdroji jednoznačně dominují lékařské aplikace a radon uvolňovaný ze stavebních materiálů. Z tabulky je zřejmé, že vliv jaderných elektráren na radiční zátěž člověka je velmi malý. Mnohem větší význam má to, žijeme-li v nížině nebo na horách, v dřevěném nebo kamenném domě, či jak často létáme letadlem.

## Riziko

Žádný konstruktér nemůže zajistit stoprocentní bezpečnost jaderné elektrárny, ale ani bezpečnost automobilu nebo letadla. Nikdy nelze vyloučit selhání člověka - obsluhy jaderné elektrárny nebo řidiče autobusu. Nikdo vám s jistotou nezaručí, že se zítra bezpečně dopravíte do práce, dokonce ani to, že ve zdraví dočtete tento článek. Každý den, po celý život jsme nuceni podstupovat různá rizika - zbytečná se můžeme pokusit potlačit nebo vyloučit, ale s nutnými riziky musíme žít. Rozvoj civilizace některá rizika snižuje a jiná zvyšuje. Nyní nám například mnohem méně hrozí napadení medvědem, ale může nás porazit automobil. Nemá tedy žádný smysl požadovat, aby některá lidská činnost byla bezpečná na sto procent. Je ovšem třeba znát míru rizika a hledat alternativy, jak se vyvarovat příliš riskantního podnikání.

| Zdroje ionizujícího záření  | dávka ( $\mu\text{Sv}$ )<br>(převzato z [1],[2]) | dávka ( $\mu\text{Sv}$ )<br>(převzato z [3]) |
|---|--|--|
| <b>přírodní</b>   |  |  |
| kosmické záření   | 280  | 300  |
| záření zemské kůry  | 280  | 350  |
| vnitřní radiace (vdechnuté a požitě radioizotopy)                     | 280  | 300  |
| celkové přirozené pozadí ve výšce 3000 m n. m.                        | 1700   |  |
| přirozené pozadí v indickém státě Kerala                              | až 26 000  |  |
| přirozené pozadí v některých pobřežních státech Brazílie <sup>1</sup> | až 430 000                                       |  |
| <b>umělé</b>  |  |  |
| radon uvolňovaný ze stavebních materiálů                              |  | 1000 - 3000                                  |
| lékařské aplikace   | 900  | 600  |
| barevná televize  | 1  |  |
| radioaktivní spad z pokusných jaderných výbuchů                       | 40 (z roku 1980)                                 | 10 (z roku 2000)                             |
| jaderné elektrárny  | 3  | 1  |
| jeden přelet Atlantského oceánu (▪)                                   | 25   |  |
| roční limit pro pracovníky s ionizujícím zářením                      | 50 000   |  |
| roční limit pro obyvatelstvo  | 5 000  |  |
| jednorázová smrtelná dávka (▪)  | 6 000 000  |  |

Tabulka 1: Průměrné ozáření člověka z přirozených a umělých zdrojů v  $\mu\text{Sv}$ . S výjimkou položek označených symbolem (▪) jsou dávky vztaženy na jeden rok.

| Lidská činnost                              | příčina úmrtí                |
|---|------------------------------|
| cestování letadlem - 1000 km                | nehoda                       |
| přelet oceánu letadlem                      | rakovina z kosmického záření |
| cestování automobilem - 100 km              | nehoda                       |
| pobyt v kamenné budově - 2 měsíce           | rakovina z ozáření           |
| 1,5 týdne práce v továrně                   | nehoda                       |
| 3 hodiny práce v dole                       | nehoda                       |
| vykouření 1 - 3 cigaret                     | rakovina, cévní choroby      |
| 1,5 minuty horolezectví                     | nehoda                       |
| 20 minut být starší než 60 let              | různé příčiny                |
| 1 rok života v blízkosti jaderné elektrárny | rakovina z ozáření           |

Tabulka 2: Některé lidské činnosti, při kterých je pravděpodobnost úmrtí rovna jedné miliótině [2].

<sup>1</sup> Vysoká úroveň přirozeného pozadí je způsobena ložisky thoriové rudy – monazitu. Tyto oblasti využívají turisté, aby se "prohřáli blahodárnou radioaktivitou"!

V tabulce 2 jsou uvedeny některé lidské činnosti s pravděpodobnosti úmrtí rovné jedné milióntině. Je z ní patrné, že člověk si často a dobrovolně zahrává s nebezpečím mnohem víc, než když staví jaderné elektrárny.

I když pod tíhou těchto čísel se obava z jaderných elektráren jeví zcela neopodstatněnou, je přesto v široké veřejnosti reálná. Člověk mnohdy vnímá riziko velmi zkresleně. Například z údajů v tabulce 3 je zřejmé, že kouření je zcela jednoznačně dominantní mezi příčinami smrti, jimž lze předcházet, avšak často mají lidé obavu z důvodů mnohem méně významných.

| Příčina smrti   | počet úmrtí v ČR za jeden rok |
|-----------------|-------------------------------|
| kouření         | 22 000                        |
| dopravní nehody | 1 400                         |
| sebevraždy      | 1 300                         |
| vraždy          | 300                           |
| ostatní úrazy   | 2 100                         |
| drogy, aids     | méně než 50                   |

Tabulka 3: Roční počet úmrtí v České republice [4].

## Jaderné odpady

Část veřejnosti, i když akceptuje provoz jaderných elektráren, bývá přesto zneklidněna jadernými odpady. Je morální zanechat našim potomkům starost o potenciálně nebezpečné látky? Možná, že není, ale tím, že se z těchto důvodů zřekneme jaderné energetiky, své svědomí neočistíme. Nějak energii vyrábět musíme a každý způsob je zdrojem větší či menší zátěže pro životní prostředí. Lidstvo v každém případě odkáže svým potomkům vážné problémy: vyčerpané zásoby fosilních paliv, pozměněné složení zemské atmosféry, znečištění vod, nesmírné množství odpadu z průmyslu a domácností ..... Stále není vyloučeno, že současná činnost člověka povede v blízké době ke globální celoplanetární katastrofě. Jaderná energetika s nulovou emisí oxidu uhličitého a nepatrným objemem odpadů patří k nejčistším zdrojům elektrické energie. V tabulce 4 je srovnání odpadu z roční produkce uhelné a jaderné elektrárny o výkonu 1000MW.

|                                   | spotřeba paliva | pevné odpady<br>(popel, popílek, vyhořelé<br>palivo)          | plynné odpady<br>(CO <sub>2</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ) |
|-----------------------------------|-----------------|---|---|
| uhelná elektrárna<br>(černé uhlí) | 2 000 000       | 415 000   | 6 600 000   |
| jaderná elektrárna                | 28              | vysoce aktivní 10<br>středně aktivní 400<br>nízko aktivní 600 | 40  |

Tabulka 4: Množství paliva a odpadu z ročního provozu 1000 MW uhelné a jaderné elektrárny [3], všechny údaje jsou v tunách. Je zajímavé, že plynných odpadů z uhelných elektráren je více než spotřebovaného paliva. Dominantní složkou v odpadním plynu je CO<sub>2</sub>, v jehož molekule více než 70% hmotnosti připadá na kyslík. Středně aktivní a nízkoaktivní

*odpady jaderných elektráren jsou tvořeny hlavně materiálem, který byl za provozu elektrárny kontaminován (izolace, filtrační vložky, voda z prádelny apod.).*

Je pravda, že odpadům z jaderných elektráren je nutno věnovat značnou pozornost a zajistit bezpečné uložení po velmi dlouhou dobu. Nejvíce nebezpečné jsou vysoce aktivní odpady, které je nutné několik let po vynětí z reaktoru skladovat ve vodních bazénech. Stále probíhající **rozpad radioaktivních produktů štěpení** je zdrojem značného tepla, které je třeba **vodou** odvést. Na druhé straně vysoce aktivní odpady jsou látky s krátkým poločasem rozpadu (např.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  s poločasem rozpadu asi 30 let), a proto jejich aktivita rychle klesá. Za 500 – 1000 let je aktivita těchto odpadů shodná s aktivitou vytěžené uranové rudy, ze které bylo dané palivo pro jadernou elektrárnu vyrobeno [5]. Při žádné myslitelné katastrofě, spojené s jejich obnažením, by obyvatelstvo Země nebylo vážně ohroženo. Za 10 000 let bude celková aktivita všech (i nízko aktivních) jaderných odpadů rovna aktivitě původní rudy. S trochou nadsázky můžeme říci, že jaderná energetika je bezodpadovou technologií s relaxační dobou cca 10 000 let. Přitom předpokládaná životnost kontejnerů pro radioaktivní odpad je 1 mil. let a zdržná schopnost hlubinného úložiště ve vhodné geologické lokalitě se odhaduje na 70 mil. let. Existuje některý jiný obor lidské činnosti, který by zvažoval možné negativní důsledky v časovém horizontu statisíce let?

Více, než provozem jaderných elektráren, projevujeme sobectví a bezohlednost k našim potomkům neochotou omezit individuální dopravu, vytápěním špatně izolovaných domů apod.

## **Alternativy**

Před tím, než definitivně přijmeme nebo odmítneme jadernou energetiku, musíme posoudit jiné možnosti výroby energie.

### *Tepelné elektrárny se spalovacím procesem*

Tímto způsobem se v současnosti ve světě vyrábí asi 65% elektrické energie. Nejčastěji se spaluje uhlí, méně časté, i když ekologicky šetrnější, je spalování zemního plynu a ropy. Odsíření a filtrace zplodin hoření provoz elektráren velmi prodražuje, žádným procesem nelze snížit emise  $\text{CO}_2$ . Ropa a zemní plyn jsou navíc mimořádně významné suroviny pro chemický průmysl.

Účinnost výroby elektrické energie parními turbínami je jen o málo vyšší než 30%, proto více než 60% tepelné energie musí být rozptýleno do okolního prostředí.. Omezení je principiální a je dáno účinností Carnotova cyklu. Ve využití fosilních paliv tedy existuje značná rezerva, kterou můžeme částečně zhodnotit účelnou kombinací výroby elektrické energie a tepla pro zimní vytápění a ohřev užitkové vody. To lze zařídit buď přímo využitím odpadního tepla z elektráren nebo doplněním výtopen o turbíny a alternátory. Stejný problém, a tedy stejnou šanci, mají i jaderné elektrárny.

### *Vodní elektrárny*

Vodní elektrárny jsou významnou alternativou k tepelným elektrárnám, i když jejich nasazení je omezeno přírodními podmínkami. Příkladem může být Rakousko, které vyrábí ve vodních elektrárnách většinu elektrické energie. Mezi všemi zdroji energie jsou unikátní výjimkou velké přečerpávací elektrárny, které umožňují jednoduchou, efektivní a ekologicky

čistou akumulaci energie<sup>2</sup>. Bohužel dopad těchto vodních děl na přírodu není zanedbatelný, a proto ve veřejnosti nenašly jednoznačnou podporu (vzpomeňme na vodní dílo Gabčíkovo - Nagymaros).

Značné naděje jsou vkládány do tzv. malých vodních elektráren. V České republice však jejich potenciál není významný. Pokusme se o jednoduchý odhad. Voda téměř z celého území Čech odtéká řekou Labe u Děčína. Její průměrný *vynecháno slovo* “roční” průtok  $Q$  je přibližně roven  $300\text{m}^3/\text{s}$ . Jakou energii nám tato voda může poskytnout? Odtéká-li z Čech za každou sekundu voda o objemu  $Q$ , musí, ve střední hodnotě, za stejný čas toto množství napršet a *odtéci do řek*. Za předpokladu, že srážky jsou na celém území stejně vydatné, můžeme využitelnou potenciální energii vody, která naprší v Čechách za čas  $t$ , spočítat jako

$$E_p = Qt\rho g \langle h \rangle,$$

kde  $\rho$  je hustota vody,  $g$  tíhové zrychlení a  $\langle h \rangle$  je střední hodnota převýšení zemského povrchu nad nejnižším bodem Čech – Děčínem (symbolem  $\langle \rangle$  budeme i dále označovat střední hodnotu). Je-li průměrná nadmořská výška Čech odhadem 550 m.n.m. a nadmořská výška Děčína 150 m.n.m, můžeme přibližně psát  $\langle h \rangle = 400\text{m}$ . Maximální výkon, který mohou vodní toky na území Čech poskytnout, je ve střední hodnotě roven

$$\langle P \rangle = \frac{E_p}{t} = \frac{Qt\rho g \langle h \rangle}{t} = Q\rho g \langle h \rangle.$$

Po dosazení dostaneme

$$\langle P \rangle = 300\text{m}^3\text{s}^{-1} \cdot 1000\text{kgm}^{-3} \cdot 10\text{ms}^{-2} \cdot 400\text{m} = 1200\text{MW}.$$

To je ale čistě teoretická hodnota, která předpokládá 100% využití každého potůčku a horské bystřiny. Reálně jsme schopni využít jen zlomek této hodnoty, řekněme 10 - 20%. Navíc jsme nevzali v úvahu účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou (v malých vodních elektrárnách asi 70%) a na druhé straně i fakt, že na horách (tedy ve větší nadmořské výšce) jsou srážky častější. Překvapivě je tento náš hrubý odhad - 100 - 200 MW - výkonu v dobré shodě s kvalifikovaným odhadem českého potenciálu malých vodních elektráren - 1 600 GWh/rok [6], tedy v průměru 180 MW trvalého výkonu. To je velmi malá hodnota, méně než 2% potřeby České republiky. Malé vodní elektrárny mohou tedy být pouze lokální výpomocí. Nic víc.

### Větrné elektrárny

Pohybuje-li se objem  $V$  vzduchu rychlostí  $v$ , je jeho kinetická energie rovna

$$E_k = \frac{1}{2} \rho V v^2,$$

kde  $\rho$  je hustota vzduchu. Postavíme-li proudícímu vzduchu kolmo do cesty plochu  $S$  (například plochu, kterou opisuje rotor vrtule), projde touto plochou za čas  $t$  objem vzduchu

$$V = Svt.$$

Pokud bychom dokázali využít všechnu kinetickou energii vzduchu, byl by výkon větru proudícího plochou  $S$  dán vztahem

<sup>2</sup> Přečerpávací hydroelektrárna je tvořena dvěma vodními nádržemi nad sebou, mezi kterými jsou umístěny vodní turbíny. V době energetické špičky voda protéká z horní nádrže do dolní a vyrábí elektrický proud. Mimo špičku, kdy je elektrické energie nadbytek, pracují turbíny jako čerpadla a čerpají vodu zpět z dolní nádrže do horní. V naší republice pracují velké přečerpávací vodní elektrárny Dalešice (450 MW) a Dlouhé Stráně (650 MW).

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} \rho S v^3 t}{t} = \frac{\pi}{8} \rho d^2 v^3,$$

přičemž jsme předpokládali, že plocha  $S$  má tvar kruhu s průměrem  $d$ . Reálná účinnost vrtule je za ideálních podmínek rovna 40%, a tedy například vrtule s průměrem 50 m bude mít při rychlosti větru 5 m/s (průměrná rychlost větru v ČR) výkon asi 60 kW. Abychom takto nahradili jediný blok jaderné elektrárny Temelín, potřebovali bychom postavit téměř 17 000 elektráren této velikosti. Pro názornou představu: kdybychom na celém území ČR rozmístili tyto elektrárny rovnoměrně do čtvercové sítě, byla by hrana čtverce dlouhá asi 2 km.

Nutno dodat, že jsme se při výpočtu dopustili jisté nepřesnosti. Nelze počítat střední výkon větrných elektráren ze střední hodnoty rychlosti větru. Neplatí totiž, že  $\langle v \rangle^3$  je rovno  $\langle v^3 \rangle$ . Pro přesnější výpočet bychom museli znát časové i místní rozdělení rychlosti větru v ČR v průběhu celého roku. V místech, kde je průměrná rychlost větru vysoká, mohou být větrné elektrárny mnohem efektivnější.

Na rozdíl od malých vodních elektráren se přes ojedinělé pokusy větrné elektrárny zatím v ČR příliš neosvědčily.

### *Sluneční elektrárny*

Na hranici atmosféry Země dopadá ze Slunce intenzita záření  $1300 \text{ Wm}^{-2}$  (solární konstanta). Pokud uvážíme absorpci záření v atmosféře, střední počet slunečních dnů v roce a zeměpisnou šířku ČR zjistíme, že ročně dopadá na  $1 \text{ m}^2$  vodorovné plochy v průměru 1000 kWh solární energie. Pokud použijeme sluneční kolektory jen pro ohřev vody, je účinnost poměrně vysoká až 80%, při výrobě elektrické energie se však prudce snižuje. Budeme-li slunečním zářením vyrábět páru pro pohon turbogenerátorů, dosáhneme účinnosti asi 30%, podobně jako v tepelných elektrárnách. Při přímé přeměně záření na elektrickou energii s využitím fotovoltaického jevu (tzv. fotočlánky), bude účinnost jen 15%. Abychom pomocí slunečních elektráren vyrobili tolik elektrické energie, jako jeden 1000 MW blok jaderné elektrárny, museli bychom parní elektrárnu zásobovat teplem z plochy téměř  $30 \text{ km}^2$ . Při použití fotočlánků by nutná plocha byla dvojnásobná. Nasazení fotočlánků k velkovýrobě elektrické energie je ovšem zcela nepřijatelné. Nejen pro devastaci rozsáhlé plochy a nesmírnou cenu, ale, paradoxně, také pro velké ekologické zatížení přírody spojené s výrobou polovodičů.

Slunce a vítr jako zdroj energie mají ještě jednu velkou společnou nevýhodu – nerovnoměrnost. Například sluneční kolektor nám poskytne 75% energie od dubna do září a jen 25% od října do března. V noci slunce nesvítí vůbec. Právě nerovnoměrnost výkonu za současného stavu techniky zcela vylučuje využití energie slunce a větru ve velkém měřítku. Skladování velkého množství energie by bylo velmi drahé a neekologické.

To ovšem neznamená, že nelze najít oblasti, kde se alternativní zdroje mohou skutečně uplatnit. Velmi slibné je použití malých slunečních kolektorů na ohřev užitkové teplé vody pro domácnost. Kolektor s plochou cca  $6 \text{ m}^2$  a akumulární nádobou je schopen více než šest měsíců v roce téměř úplně krýt spotřebu teplé vody rodinného domku. Cena těchto zařízení je v současné době taková, že zajistí rozumnou návratnost investic a může být atraktivní pro každého majitele rodinného domu [7].

I přes důslednou snahu využívat obnovitelných zdrojů energie budeme vždy potřebovat výkonný, spolehlivý, relativně bezpečný a kontinuálně pracující zdroj elektrické

energie, který co nejméně naruší ekosystém naší planety. V současnosti je jaderná energetika dobrá volba.

### **Literatura**

[1] A. C. Upton, *The Biological Effects of Low-Level Ionizing Radiation*. Scientific American **246**, č. 2 1982, s 29.

[2] J. Jandl, I. Petr, *Ionizující záření v životním prostředí*. SNTL Praha, 1988.

[3] J. Marek, *Jaderná energetika*. Propagační materiál ČEZ, 2000.

[4] E. Králíková, J. T. Kozák, *Kouřit nebo nekouřit*. Vesmír **79**, č. 4 2000, s 206.

[5] F. Peřina, J. Marek, G Cziviš, *Jaderná energetika a životní prostředí*, SNTL Praha, 1987.

[6] <http://www.energ.cz/hlavni.html?m1=/usporovodni.html>, (květen 2000).

[7] [http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/e\\_papers/solar/tech\\_inf.html](http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/e_papers/solar/tech_inf.html) (květen 2000).