

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA  
ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Ekologická zátěž vzniklá výrobou, provozem a likvidací  
fotovoltaických článků

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš KREJČÍ  
Osobní číslo: E09N0086P  
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Technická ekologie  
Název tématu: Ekologická zátěž vzniklá výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických článků  
Zadávající katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

1. Popište výrobu fotovoltaických panelů, které jsou dnes běžně využívány v energetice a její vliv na ŽP.
2. Analyzujte životnost fotovoltaických systémů a zátěž ŽP vznikající jejich provozem.
3. Analyzujte proces ekologické likvidace fotovoltaických systémů a její zátěž ŽP.
4. Vypočítejte celkovou zátěž ŽP vzniklou výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů, porovnejte ji s jinými zdroji elektrické energie.

## **Anotace diplomové práce**

V diplomové práci je popsána metodika výroby fotovoltaických panelů, které jsou v současné době využívány v energetice a mapují jejich dopad na životní prostředí. Navazuje analýza životnosti fotovoltaických systémů a zátěž na životní prostředí vznikající jejich provozem. Dále je v diplomové práci znázorněn proces ekologické likvidace fotovoltaických systémů. V závěru práce posuzuji celkovou zátěž vzniklou výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů a porovnávám je s jiným zdrojem elektrické energie.

### **Klíčová slova:**

*Fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, ingot, recyklace, solární křemík, energetická návratnost*

## **Annotation of master thesis**

The thesis describes the methodology of the production of photovoltaic cells which are nowadays used in power engineering and survey their impact on the environment. Then follows analysis of the photovoltaic systems lifespan and strain on the environment emergent by their operation. Process of the ecologic liquidation of the photovoltaic systems is depicted next. In conclusion of my thesis I assess the total strain emergent by the production, operation and liquidation of the photovoltaic systems and I compare them with another source of the electric power.

### **Key words:**

Photovoltaic cell, photovoltaic panel, ingot, recycling, silicon solar, energy payback time

## PROHLÁŠENÍ:

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne .....

Podpis.....

## PODĚKOVÁNÍ

*Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Benešovi za konzultace a pomoc při realizaci této práce. A také své rodině za podporu při studiu na vysoké škole.*

*Krejčí Tomáš*

## Obsah

1	Úvod	- 9 -
2	Popis výroby fotovoltaických panelů, které jsou dnes běžně využívány v energetice a její vliv na ŽP	- 10 -
2.1	Generační vývoj	- 10 -
2.1.1	První generace	- 10 -
2.1.2	Druhá generace	- 10 -
2.1.3	Třetí generace	- 10 -
2.1.4	Současný trend	- 12 -
2.2	Výroba křemíku	- 12 -
2.2.1	Chlórový výrobní proces	- 13 -
2.2.2	Polykrystalické ingoty	- 14 -
2.3	Fotovoltaické články	- 14 -
2.4	Fotovoltaické panely	- 17 -
2.4.1	Postup výroby	- 17 -
2.4.2	Oboustranné fotovoltaické panely	- 18 -
2.4.3	Panely na bázi monokrystalických křemíkových kuliček	- 18 -
3	Analýza životnosti fotovoltaických systémů a zátěže ŽP vznikající jejich provozem	- 20 -
3.1	Energetická politika EU	- 20 -
3.2	Pozitiva	- 20 -
3.3	Negativa	- 22 -
3.4	Energetická návratnost	- 22 -
4	Analýza procesu ekologické likvidace fotovoltaických systémů a její zátěž na ŽP	- 23 -
4.1	Recyklace panelů na konci životnosti	- 23 -
4.2	Důvody vyřazení panelů	- 24 -
4.3	Řešení v zahraničí	- 24 -
4.4	Množství panelů k recyklaci	- 24 -
4.5	Iniciativa PV CYCLE	- 25 -
4.6	Dobrovolný systém zpětného odběru EPIA	- 26 -
4.7	Metody recyklace	- 27 -
4.7.1	Termická recyklace	- 27 -
4.7.2	Mechanicko-chemická metoda	- 28 -
4.7.3	Konstrukční úpravy	- 29 -
4.8	Množství instalovaných panelů	- 30 -
4.9	Recyklované materiály	- 30 -
5	Posouzení celkové zátěže ŽP vzniklé výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů. Porovnání s jinými zdroji elektrické energie	- 32 -
5.1	Ekonomické ukazatele	- 32 -

5.1.1	Výrobní náklady .....	- 32 -
5.1.2	Vliv ceny paliva na výrobní náklady.....	- 33 -
5.1.3	Koeficient způsobilosti zdroje.....	- 34 -
5.1.4	Nároky na energie .....	- 34 -
5.1.5	Nároky na suroviny .....	- 35 -
5.2	Vliv na zdraví a životní prostředí .....	- 36 -
5.2.1	Zábor půdy .....	- 36 -
5.2.2	Emise skleníkových plynů .....	- 36 -
5.2.3	Emise ostatních plynů .....	- 36 -
5.2.4	Vliv záření .....	- 37 -
5.3	Vyhodnocení pomocí metody LCA.....	- 38 -
5.4	Životní cyklus fotovoltaické elektrárny.....	- 39 -
5.4.1	Výroba solárního křemíku.....	- 40 -
5.4.2	Výroba ingotů a desek.....	- 40 -
5.4.3	Spotřeba energie na řezání desek .....	- 41 -
5.4.4	Výroba článků .....	- 41 -
5.4.5	Snižování spotřeby křemíku.....	- 41 -
5.5	Vyhodnocení pomocí metody Energy pay-back time (EPBT).....	- 42 -
6	Závěr.....	- 45 -
7	Seznam použité literatury .....	- 46 -
8	Přílohy .....	- 47 -

## Seznam použitých zkratek a symbolů

OZE	Obnovitelný zdroj energie
ČR	Česká republika
EU	Evropská unie
EPIA	Sdružení evropských výrobců fotovoltaických panelů
MW	Megawatt
kWp	Výkon
CIS	Články z amorfního a mikrokrytalického křemíku
UV	Ultrafialové záření
EVA	Etylvinylacetát
PEG	Polyethylenglykol
DEM	Double encapsulated module
LCA	Life cycle assesment
EPBT	Energy payback time



# 1 Úvod

Fotovoltaické elektrárny jsou zdrojem čisté energie, který pomáhá snížit český příspěvek ke globálnímu znečištění klimatu i závislosti na neobnovitelných zdrojích.

Vytvářejí nová pracovní místa a mohou představovat významný zdroj příjmů pro obce a i pro soukromé investory.

V první části této práce se budu zabývat metodami výroby fotovoltaických panelů, které jsou v současné době využívány v energetice.

Následně budu řešit vlastní životnost fotovoltaických systémů a jejich případný dopad na životní prostředí vznikající jejich provozem.

Důležitou částí diplomové práce bude proces ekologické likvidace fotovoltaických systémů pro zpětné využití vstupních surovin.

V závěru diplomové práce bych chtěl vyhodnotit celkovou zátěž vzniklou výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů a porovnat jí s jinými zdroji elektrické energie pomocí různých ukazatelů a možných metod pro porovnání zdrojů elektrické energie.

## **2 Popis výroby fotovoltaických panelů, které jsou dnes běžně využívány v energetice a její vliv na ŽP**

### **2.1 Generační vývoj**

#### **2.1.1 První generace**

První generací se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90 %) a dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální struktury až 24 %). Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech. Přestože je jejich výroba relativně drahá (a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), budou ještě v několika dalších letech na trhu dominovat. <sup>[2]</sup>

#### **2.1.2 Druhá generace**

Impulesem pro rozvoj článků druhé generace byla především snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu – křemíku. Články druhé generace se vyznačují 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film) a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokrystalického křemíku (případně silicon-germania či silicon-karbidu, ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se, označované obecně jako CIS struktury). S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů (a tedy za předpokladu velkosériové výroby i k poklesu ceny), nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší (v sériové výrobě obecně pod 10%). Nespornou výhodou tenkovrstvých článků je možnost volby substrátu (na který se tenkovrstvé struktury deponují) a v případě použití flexibilních materiálů (organické, kovové či textilní folie) i značně širší aplikační sféra. Komerčně se začaly články druhé generace prodávat v polovině osmdesátých let. <sup>[2]</sup>

#### **2.1.3 Třetí generace**

Pokus o „fotovoltaickou revoluci“ představují solární články třetí generace. Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra („proudový“ zisk), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů („napěťový“ zisk fotovoltaických článků).

Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev),
- články s vícenásobnými pásy,
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr,
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí,
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách,
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy,
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů).

Zatím jediným komerčním příkladem dobře fungujících článků třetí generace (přímo navazující na FV druhé generace) jsou vícevrstvé struktury (dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články), z nichž každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Příkladem tandemového solárního článku je struktura skládající se z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku a p-i-n přechodu mikrokystalického (hydrogenovaného) křemíku. Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté barvy části spektra, mikrokystalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené. Mikrokystalický křemík může být nahrazen i „slitinou“ křemíku s germánium a dle zvoleného poměru obou materiálů se dají upravovat jejich optické (i elektrické) vlastnosti. Tohoto materiálů se např. využívá komerčně právě pro trojvrstvé solární články, kde dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstevných článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě, horší (příp. nejhorší) z článků limituje dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je pak dané součtem obou (příp. všech) článků. <sup>[2]</sup>

## 2.1.4 Současný trend

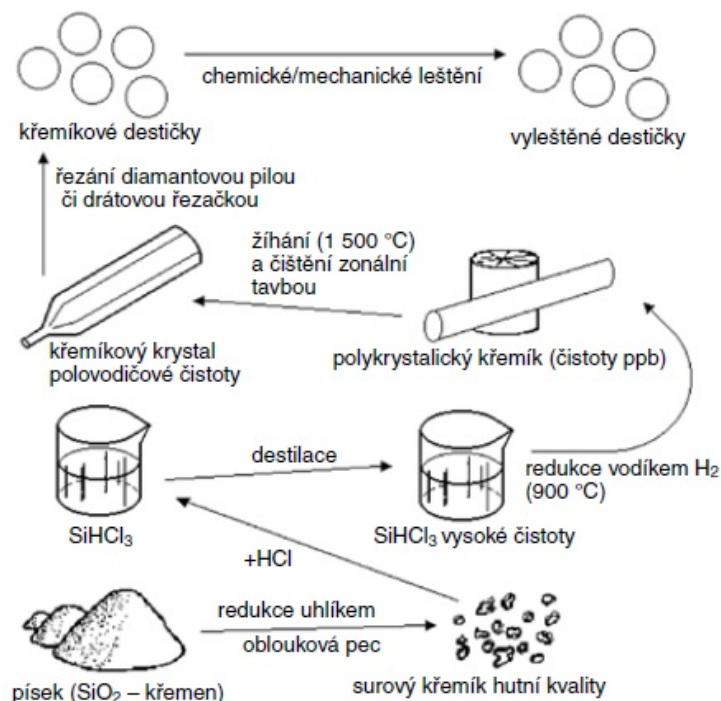
V současné době jsou nejčastěji používány fotovoltaické (PV) panely na bázi křemíku, ať už Si-monokrystalické, polykrystalické či amorfní na bázi tenkých vrstev. Křemík má mnoho výhod. Především je hojně zastoupen v zemské kůře dokonce je to jeden z nejrozšířenějších prvků. Proto je relativně levný, snadno dostupný, není jedovatý a je nejvíce používaným a i prozkoumaným polovodičem. V přírodě se vyskytuje především v podobě křemene neboli oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). V této formě je mechanicky odolný a chemicky stálý, drobná zrnka křemene tvoří všemi známý křemenný písek. Šířka zakázaného pásu čistého křemíku  $\Delta E_G = 1,1 \text{ eV}$ . PV panely založené na jiných bázích lze rozdělit do dvou kategorií. Jedny jsou levnější, ale mají menší účinnost přeměny energie, například PV panely na bázi organických polymerních vrstev či nanovláken. Druhý druh má vyšší účinnost přeměny energie, ale jsou výrazně dražší. Takové panely se používají většinou ke speciálním účelům, například PV panely na bázi GaAs se používají u zařízení pracujících ve vesmíru. <sup>[2]</sup>

## 2.2 Výroba křemíku

Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci, kde dochází k celému řetězci chemických reakcí. Pokud započítáme pouze výchozí a konečné produkty, můžeme zjednodušeně vše vyjádřit jedinou rovnicí (2.1):



Do obloukové pece se ze shora kontinuálně vpravuje písek promíchaný s mletým karbonizovaným uhlím. Směrem dolů stoupá teplota a v jednotlivých úrovních probíhají chemické reakce. Dole v zóně s teplotou okolo  $T = 2\,000 \text{ }^\circ\text{C}$  se hromadí roztavený křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Takto získaný surový křemík hutní kvality má čistotu až 99 %, zhruba 1 % nečistot tvoří nejvíce příměsi Fe, Al a C. Pro použití v polovodičové výrobě je však potřebná mnohem větší čistota. Proto je třeba surový křemík vyčistit a poté vytvořit finální polotovar pro použití v další polovodičové výrobě. K tomu účelu existují různé technologie, příklad jedné z nich je schematicky znázorněn na obr. č. 2.1. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar až čistoty tzv. ppb (nečistoty řádově  $10^{-9}$ ), která je potřebná pro výrobu integrovaných obvodů. Pro výrobu PV článků běžně postačuje i nižší čistota, tzv. čistota ppm (nečistoty řádově  $10^{-6}$ ). <sup>[2,3]</sup>

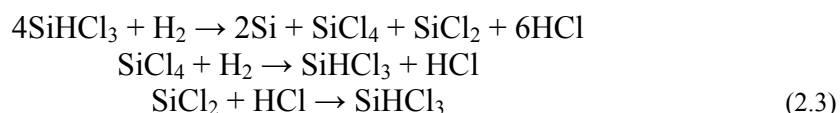


Obrázek č. 2.1- Výroba solárního křemíku <sup>[5]</sup>

Nejpoužívanější technologií čištění křemíku je v současnosti technologie Siemens s chlórovým cyklem. Nejprve proběhne převod na trichlórsilan podle zjednodušených rovnic (2.2):



Po destilaci se z trichlórsilanu opět vyredukuje čistý křemík podle zjednodušených rovnic (2.3):



### 2.2.1 Chlórový výrobní proces

Chlórový výrobní proces je náročný na spotřebu energie a na ochranu bezpečnosti obsluhy i životního prostředí. V současnosti se vyvíjejí nové technologie výroby čistého křemíku, které nepoužívají chlórový cyklus (metody Elkem FBR), a tím tyto problémy eliminují. Nyní jsou tyto technologie ve stádiu testování v poloprovozu, a pokud se osvědčí, mohou podstatně snížit energetickou náročnost výroby čistého křemíku i jeho cenu. Po vyčištění obvykle vzniknou hrudky čistého křemíku, které procházejí kontrolou elektrického odporu. Menší rezistivita než očekávaná hodnota by naznačovala přítomnost

příměsí a tedy nižší čistotu materiálu. Z tohoto polotovaru je třeba vytvořit polykrystalické či monokrystalické ingoty. [2,3]

Tabulka č. 2.1- energetická náročnost výroby čistého křemíku

Metoda	Jednotky	Siemens	FBR	Elkem
<b>Spotřeba energie</b>				
<b>Elektrina</b>	kWh <sub>el</sub>	110	30	25
<b>Teplo</b>	MJ <sub>th</sub>	185	185	
<b>Celkem</b>	MJ <sub>prim</sub>	1070	500	300

## 2.2.2 Polykrystalické ingoty

Výroba polykrystalických ingotů je jednodušší. Materiál se roztaví a nalije do formy, kde se nechá pomalu, definovanou rychlostí chladnout. Chladnutí musí být pozvolné a řízené induktivním ohřevem, aby se vytvořila co možná největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu minimum dislokací, pnutí apod. Hranice zrn i další poruchy krystalu totiž tvoří pro elektrony potenciálové bariéry a je tedy žádoucí jejich přítomnost minimalizovat.

Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralskiho metodou. Do taveniny o teplotě přibližně 1 415 °C se ponoří malý monokrystal jako zárodek. Ten se velmi pomalu z taveniny vytahuje a přitom se nechává otáčet kolem podélné osy. Celý proces probíhá v inertní atmosféře za sníženého tlaku.

Vzniklý polykrystalický či monokrystalický ingot se nakonec příčně řeže na destičky, které tvoří základ PV článků. V technologii řezání došlo v posledních letech k výraznému posunu kvality, zejména drátové řezačky byly podstatně vylepšeny. Zatímco dříve technologie umožňovala řezat destičky o minimální tloušťce  $d = 300 \mu\text{m}$ , nyní je to až  $d = 100 \mu\text{m}$ . Ve stejném poměru se zmenšil i prořez. Úspora křemíku, energie potřebné k jeho výrobě i zefektivnění výroby je tak evidentní. [3]

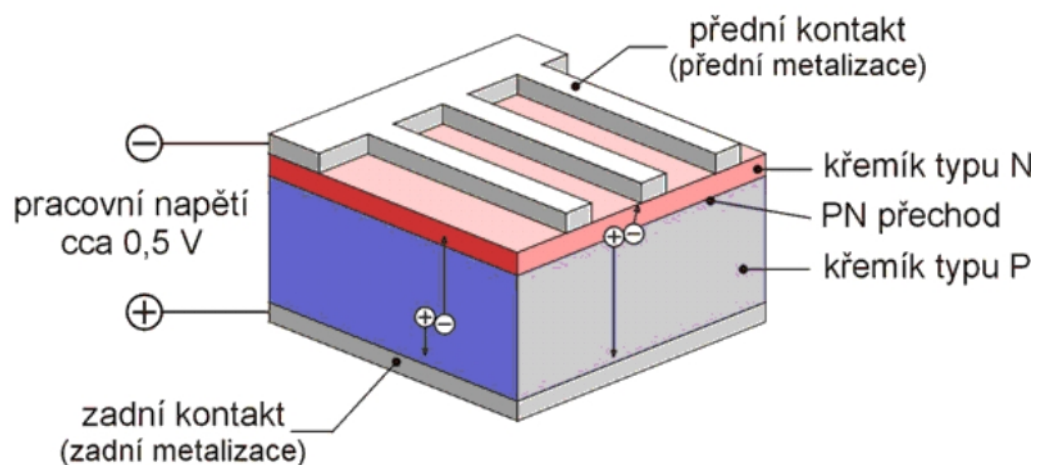
## 2.3 Fotovoltaické články

PV článek je velkoplošnou polovodičovou diodou s přechodem PN orientovaným kolmo k čelní ploše. Difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN probíhá v difúzních pecích. Na přední straně PV článku bývá poté vytvořena antireflexní úprava povrchu kvůli minimalizaci odrazu, aby se využilo maximum dopadajícího záření. Články s nejvyšší účinností se tedy jeví jako černé. Pouze pro určité žádané dekorační účely se nanáší na přední stranu tenká průhledná vrstva pro zesílení

odraženého záření určité vlnové délky v důsledku interference vln elektromagnetického záření na této vrstvě. Takové články v odraženém světle vykazují určitý barevný odstín.

Přední kontakt bývá vytvořen ve tvaru mřížky či hřebínku, aby zakrýval co nejmenší část plochy a aby světlo mohlo dopadat na co největší plochu článku. Zadní kontakt bývá u standardních panelů celoplošný. Kontakty se nanášejí na standardní články buď sítiskem, nebo náročnějšími vakuovými technologiemi, například vakuovým napařováním. Pouze na speciální články určené například pro systémy s velkou koncentrací záření se dělají kontakty vnořené do materiálu polovodiče. Tak se zvětší plocha styku mezi kontaktem a polovodičem i průřez kontaktu kvůli větším proudovým hustotám, které článkem protékají.

Schéma křemíkového PV článku na obr. č. 2.2 je schematicky znázorněn jednoduchý model.

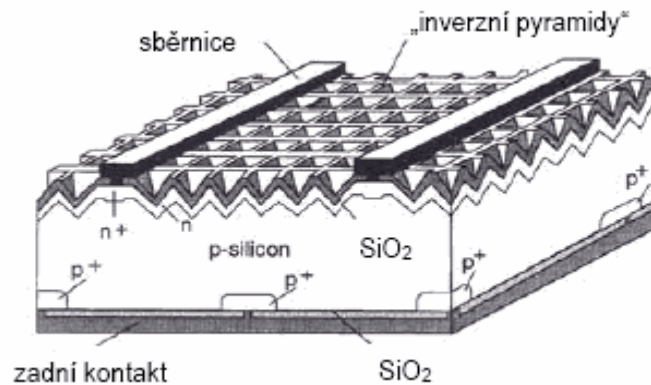


Obrázek č. 2.2- Schéma křemíkového PV článku

Takto konstruovaný článek sice funguje podle výše popsaného principu, ale má nižší účinnost fotovoltaické přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti slouží u kvalitnějších článků mnoho konstrukčních zdokonalení patrných z obr. č. 2.3.

Antireflexní vrstva na přední straně minimalizuje odraz, aby maximum fotonů vniklo do PV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu ( $\text{SiO}_2$  – křemen) chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do PV článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu, a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět. Znovu pak procházejí přechodem PN a pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie se zvyšuje. Oboustranné PV články mají na zadní straně

stejnou strukturu jako na přední straně, fotony tedy mohou dopadat současně z obou stran (na zadní stranu například po odrazu od země) a množství vyrobené elektrické energie je potom větší. Pro záření dopadající na zadní stranu je však účinnost fotovoltaické přeměny nižší, neboť fotony kratších vlnových délek jsou pohlcovány už v silnější vrstvě polovodičového substrátu a nedorazí až k přechodu PN.



Obrázek č. 2.3- konstrukční zdokonalení PV článku

V polykrystalech hranice zrn zhoršují transportní vlastnosti polovodiče, u amorfních polovodičů je situace ještě horší. Účinnost nejkvalitnějších PV článků na bázi monokrystalického křemíku se v současnosti pohybuje kolem 20 % u sériové výroby, účinnost některých laboratorních vzorků s výše uvedenými zdokonalujícími prvky již převyšuje 30 %. Účinnost PV článků na bázi jiných polovodičů (např. GaAs, InP) je ještě vyšší. Pohybuje se kolem 25 % u sériové výroby, avšak cena je několikanásobně vyšší. Proto se takové PV články používají především v kosmických aplikacích, kde cena není limitujícím parametrem, je však nezbytná maximální účinnost a odolnost proti kosmickému záření. Zde se používají především monokrystalické články na bázi InP či epitaxně připraveného GaAs/Ge. Zvláště GaAs má větší odolnost proti kosmickému záření a při rostoucí teplotě PV článků klesá účinnost PV přeměny mnohem pomaleji, než je tomu u jiných polovodičů. Existuje i tzv. tandemové uspořádání, kdy články na odlišné bázi jsou umístěny za sebou a každé využívá jinou oblast spektra.<sup>[3]</sup>

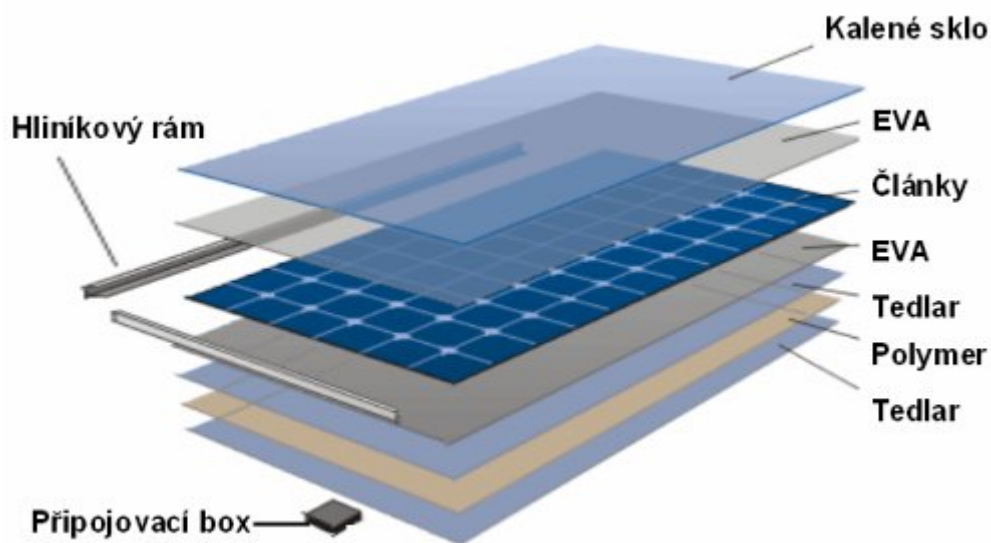
Tenkvrstvé články bývají kromě křemíku např. na bázi CuInSe, CdTe či na bázi hetero přechodů mezi různými druhy polovodičů. Takové články jsou sice relativně levné, ale mají nižší účinnost kolem 10 % a navíc největším problémem bývá stabilita parametrů. Lze vyrobit takový PV článek s přijatelnou účinností až 15 %, ale účinnost brzy klesá a po relativně krátké době je nižší než 10 %. To znamená, že solární systém by musel



zaujímat větší plochu. Cena půdy v evropských zemích je však obvykle vysoká, a proto se použití těchto článků v solárních PV systémech příliš nerozšířilo. Dobře se tenkovrstvé PV články uplatňují v kapesních kalkulačkách napájených elektrickou energií z fotovoltaické přeměny záření. Při malých intenzitách osvětlení totiž pracují lépe.

## 2.4 Fotovoltaické panely

Do fotovoltaických panelů se jednotlivé články skládají v sério-paraalelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné napětí a výkon. Maximální výkon záleží především na velikosti celkové plochy PV článků, tedy na velikosti panelů. Nejběžnější konstrukce PV panelu je znázorněna schematicky v řezu na obr. č. 2.4 a výrobní postup je následující: Na přední straně PV panelu je temperované (tzv. kalené) sklo. Tato skla jsou velmi odolná proti nárazu a odolají i poměrně velkým kroupám. Na sklo se pokládá plastová EVA (etylvinylacetát) fólie a na ni se skládají propojené PV články.



Obrázek č. 2.4 - Schéma PV panelu

### 2.4.1 Postup výroby

Postup při výrobě je sériové propojení PV článků z přední i ze zadní strany, kovový pásek spojuje přední kontakt jednoho článku se zadním plošným kontaktem druhého článku. Přes propojené články se znovu pokládá plastová EVA fólie a zadní stěnu tvoří zpravidla laminátová kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Poté se vyčerpá vzduch mezi těmito vrstvami a panel se zahřeje

nad teplotu tání EVA fólie. Etylvinylacetát se po teplotním zpracování rozteče a jako zalévací hmota zalije PV články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec se panely rámují a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů a opatřují krabicí s výstupními kontakty. Hotové PV panely jsou tak utěsněny proti vodě či jiným nečistotám. Životnost kvalitních PV panelů na bázi krystalických polovodičů bývá 20 až 30 let. <sup>[3]</sup>

### **2.4.2 Oboustranné fotovoltaické panely**

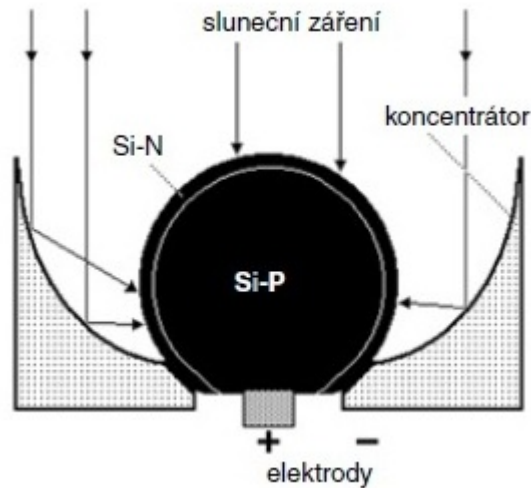
Nové oboustranné fotovoltaické panely složené z oboustranných PV článků jsou výhodnější než dosud používané panely standardní. Přitom jejich cena se příliš neliší, u některých se dokonce vůbec neliší od ceny jednostranných panelů. Rozdíl ve výrobní technologii spočívá pouze v tom, že na zadní straně je použit průhledný laminát a zadní kontakty PV článků nejsou celoplošné, jak bylo řečeno. Panel je sice optimalizován na dopad záření z přední strany, ale účinnost fotovoltaické přeměny při dopadu záření na zadní stranu je jen o málo nižší. Navíc oboustranné (bifaciální) panely na bázi c-Si jsou v infračervené oblasti spektra transparentní pro záření s vlnovou délkou  $\lambda > 1\ 100$  nm, tedy s energií fotonů menší, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu. Toto záření představuje více než 20 % energie slunečního záření a úměrně tomu se tedy v oboustranných panelech absorbuje méně energie transformované na teplo v porovnání s jednostrannými panely. Tyto panely mají proto nižší pracovní teplotu. S tím souvisí i vyšší účinnost fotovoltaické přeměny energie, což jednak plyne z teorie polovodičů, jednak to bylo i experimentálně potvrzeno. <sup>[3]</sup>

### **2.4.3 Panely na bázi monokrystalických křemíkových kuliček**

Pozoruhodnou novinkou jsou panely na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček se sférickým přechodem PN. Technologie je sice známá už několik let, ale teprve nedávno začala sériová výroba a komerční prodej. Mohou být jak tuhé se skleněnou čelní stranou, tak i flexibilní zapouzdřené v plastu obvykle s teflonovou čelní stranou. Kuličky křemíku o průměru cca 0,6 mm jsou uvnitř typu P a na povrchu typu N, mají tedy pod povrchem sférický přechod PN. Vyrábějí se odkapáváním taveniny dopované příměsí typu P z kapiláry, která ztuhne během volného pádu.

Poté probíhá difúze a předopování povrchové vrstvy příměsí typu N. Kuličky jsou umístěny na hliníkové fólii v dírkách o menším průměru, kterými nemohou projít, v prohlubních tvořících malý parabolický koncentrátor záření. Hliníková kostra tvoří jednu

zápornou elektrodu, dole je v každé kuličce část oblasti typu N odleptána a do oblasti typu P je zaveden kontakt, který tvoří druhou kladnou elektrodu. Toto uspořádání je schématicky znázorněno na obr. č. 2.5.



**Obrázek č. 2.5 - Schéma PV článku na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček<sup>[5]</sup>**

Celý článek je zapouzdřen a z těchto článků jsou vyráběny různě velké tuhé či flexibilní panely. Ty flexibilní je možné srolovat a vzít do terénu. Výhodou je jednak skladnost, flexibilita a menší hmotnost, ale největší předností je asi sedmkrát menší spotřeba křemíku v porovnání se standardními panely. Bez detailní znalosti výrobní technologie si však netroufáme posoudit, zda náročnost technologie tyto výhody nepřeváží. Navíc při šikmém osvětlení s velkým úhlem dopadu je potlačen efekt soustředění záření koncentrátorem na kuličku, což vede ke snížení účinnosti panelu. U těchto panelů by se proto zvláště dobře uplatnil sledovač Slunce a automatický pohyblivý stojan. Účinnost těchto panelů je zatím nižší, pohybuje se kolem 14 %. Konstrukteři ale věří, že se časem dostanou na hodnoty účinnosti kolem 18 %, které jsou běžné u standardních panelů.<sup>[3]</sup>

### 3 Analýza životnosti fotovoltaických systémů a zátěže ŽP vznikající jejich provozem.

Získání elektrické energie přímo ze slunečního záření je nyní z hlediska životního prostředí nejčistším a nejšetrnějším možným způsobem výroby elektřiny. Důležité je ovšem posuzovat výrobu elektřiny komplexně včetně výroby a likvidace daného zařízení. Technická řešení pro využití slunečního záření jsou dnes již bez větších potíží komerčně k dispozici. Účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii se liší dle použité technologie.

V odlehlejších oblastech je tento technický způsob řešení výroby elektřiny jistě výhodný. Ovšem v konkurenčním prostředí tradičních energetických zdrojů je tato alternativa stále ještě dražší a jen stěží může bez podpory státu konkurovat na trhu s elektřinou. Existuje ovšem velké množství důvodů proč fotovoltaiku rozvíjet dále. Jak již je uvedeno výše, je fotovoltaika jednou z nejšetrnějších technologií výroby elektrické energie a poskytuje časově neomezenou možnost výroby. Z těchto důvodů je po celém světě, bez rozdílů na hospodářské vyspělosti, více či méně podporováno její využití a hlavně její rozvoj. Ani ČR není výjimkou a legislativní prostředí je vhodně nastaveno, tak aby přispíval k rozvoji této technologie. <sup>[5,6]</sup>

#### 3.1 Energetická politika EU

Energetická politika Evropské unie nyní staví do popředí otázku snížení závislosti na dovozu energií, z čehož vyplývá nutnost maximalizace vlastních zdrojů a to i obnovitelných. Ač všechny členské státy podnikly kroky pro podporu OZE, tak výsledný efekt nebyl všude stejný. Proto vznikla další iniciativa, která má velice ambiciózní cíl zdvojnásobení příspěvku OZE do primární energetické bilance EU (21%). Také Česká republika díky závazkům k EU a vysoké energetické náročnosti svého hospodářství bude muset řešit kompozici své energetické bilance. Závazek České republiky pro podíl OZE je 8 % do roku 2010.

#### 3.2 Pozitiva

- **Palivo je zdarma.** Slunce je jediným zdrojem potřebným pro výrobu elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů a jeho energie bude lidstvu k dispozici až do konce světa. Navíc je většina solárních článků vyráběna z křemíku, který je netoxický a zároveň se jedná o druhou nejrozšířenější „surovinu“ na světě.

- **Neprodukuje žádný hluk, škodlivé emise nebo znečišťující plyny.** Spalování fosilních paliv pro potřeby energetiky produkuje značné znečištění, způsobovat kyselé deště a znečišťovat vodu a vzduch. Vzniká také nejméně populární skleníkový plyn CO<sub>2</sub> (oxid uhličitý). Naproti tomu fotovoltaika využívá jako palivo jen energii Slunce. Nevytváří žádné škodliviny a aktivně přispívá ke snížení nepříznivých aspektů globálního oteplování.

- **Fotovoltaické panely jsou recyklovatelné,** a proto mohou být materiály z výrobního procesu (křemík, sklo, hliník atd.) znovu využity. Recyklace není jen pozitivním příspěvkem našemu životnímu prostředí, ale umožňuje také snížit množství energie potřebné pro výrobu a tudíž ušetřit výrobní náklady.

- **Pro provoz není potřeba téměř žádná údržba.** Solární panely nepotřebují téměř žádnou údržbu a velmi snadno se instalují.

- **Fotovoltaika zajišťuje energetické potřeby vzdálených venkovských oblastí.** Solární systémy poskytují přidanou hodnotu venkovským oblastem, zejména lidem v rozvojových zemích bez rozvinuté přenosové soustavy. Osvětlení domů, napájení nemocničních chladících přístrojů, systémy pro čerpání vody – to jsou jen některé příklady využití do sítě nepripojených fotovoltaických systémů. Velmi často je fotovoltaika využívána také v souvislosti s telekomunikačními systémy.

- elektrická energie stávajících dodavatelů se zdražuje. Vyrobenou elektřinu ze solární elektrárny je kromě distribuce do sítě dodavatelů možno přímo využívat.

- Solární elektrárny mají garantovanou životnost cca 25 let, funkčnost je (při snižující se efektivitě) zachována až 35 let.

- Sluneční energie je nevyčerpatelná. Nehrozí výpadek v dodávkách vstupní energie.

- Solární elektrárny se těší enormní podpoře Evropské unie. Jedná se o projekt v souladu s ekologickým programem a programem rozvoje venkova EU.

- Solární panel vyrobí energii spotřebovanou při jeho výrobě za cca 3-5 let.

- Solární energie zažívá boom v rámci celé Evropské unie.

-V důsledku přerušení zemědělské výroby dojde ke konsolidaci pudy unavené mnohaletým intenzivním obhospodařováním. <sup>[5,6]</sup>

### **3.3 Negativa**

- Solární elektrárny do jisté míry mění vzhled krajiny (stejně jako nové domy nebo továrny, avšak nejedná se o výškové stavby, neboť solární panely pouze kopírují terén ve výši cca 1-2 metry; mnohem větší zásah do krajiny přitom představují stožáry elektrického vedení, vysílače mobilních operátorů či nové domy postavené na svazích nad obcí).

- Ztěžuje se údržba pozemku zastavených elektrárnou (dnes se řeší položením fólie či údržbou sečením; dokonce u větších projektu vypásáním ovce).

- Při položení fólie je nutno vyřešit odtékání dešťové vody (řeší se technologicky podle sklonu svahu a způsobu výstavby elektrárny). <sup>[5,6]</sup>

### **3.4 Energetická návratnost**

Energetická návratnost je důležitý ukazatel, který určuje dobu, za kterou solární panel vyrobí tolik energie, kolik bylo vynaloženo na jeho zhotovení. Knapp a Jester ve své studii posuzovali solární panel s krystalickými křemíkovými články a tenkovrstvý solární modul se strukturou CIS. Na energii náročnější technologie výroby solárních panelů s krystalickým křemíkem má dobu energetické návratnosti něco málo více než 3 roky a panel s tenkovrstvou strukturou CIS vyrobí zpět spotřebovanou energii za méně než dva roky. <sup>[5]</sup>

## 4 Analýza procesu ekologické likvidace fotovoltaických systémů a její zátěž na ŽP.

### 4.1 Recyklace panelů na konci životnosti

Recyklaci fotovoltaických panelů byla dosud věnována menší pozornost. Jejich životnost je delší než u spotřebního zboží a množství panelů k recyklaci je dosud nízké - v rámci celé EU pouze několik stovek tun ročně. Předpoklady jsou, že v roce 2020 to bude asi nějakých 35 000 tun. Proto je třeba se otázkou likvidace těchto materiálů zabývat již dnes. Fotovoltaické články obsahují řadu hodnotných surovin, což by mělo nahrávat jejich budoucí recyklaci. Záleží samozřejmě na tom, jak ekonomická bude recyklace těchto materiálů v porovnání s dostupností těchto surovin na trhu. Technologie fotovoltaiky je založená na šetrném vlivu k životnímu prostředí, proto již byly vyzkoušeny technologie, které při procesu recyklace kompletně zpracují všechny součásti modulů. Využití těchto postupů se tak může stát důležitým surovinovým zdrojem pro výrobu nových fotovoltaických článků. [2]



Obrázek č. 4.1- Základní schéma nakládání s odpadními PV panely

## **4.2 Důvody vyřazení panelů**

V roce 2010 bylo hlavním důvodem pro vyřazení panelu jeho mechanické poškození při dopravě nebo instalaci. Je však nutno upozornit, že mechanická odolnost panelů je vysoká.

V prvních měsících a letech se mohou projevit skryté vady materiálu, které neodhalila výstupní kontrola ve výrobním závodě. Podíl takových závad je u kvalitních panelů nízkých, obvykle pod 1 % objemu dodávek.

U méně kvalitních panelů se mohou projevit výrobní chyby, případně použití nekvalitních materiálů. Hlavním problémem je delaminace – sendvičová struktura panelu se vlivem teploty a UV záření rozlepí. Pokud k takové závadě dojde, týká se obvykle celé výrobní série. <sup>[7]</sup>

## **4.3 Řešení v zahraničí**

Současná evropská legislativa v oblasti zpětného odběru pro zajištění ekologické likvidace a recyklace vysloužilých fotovoltaických panelů zatím neřeší. Přestože jde o elektrozařízení, nespádají fotovoltaické panely do kompetence příslušných směrnic WEEE 2002/95/ES a 2002/96/ES

Fotovoltaický průmysl se však již dříve chopil iniciativy a začal vyvíjet recyklační technologie pro vysloužilé fotovoltaické panely. Výzkum v tomto směru není zdaleka u konce. Dvě německé firmy, First Solar GmbH a Deutsche Solar AG, mají v rámci výrobních linek k dispozici i recyklační pracoviště. Také Evropská unie už v tomto směru podpořila několik velkých výzkumných projektů (SENSE - Sustainable Evaluation of Solar Energy System, RESOLVED - Recovery of Solar Valuable Materials, Enrichment and Decontamination). <sup>[3,7]</sup>

## **4.4 Množství panelů k recyklaci**

V nejbližších 10 až 20 letech lze očekávat, že množství panelů vyřazených z provozu bude velmi nízké. Bude se většinou jednat o panely poškozené při nehodách a živelních pohromách. Odhady se pohybují od několika set do 1000 tun ročně. Ve srovnání s celkovou produkcí odpadů v České republice (přes 20 mil. tun) se jedná o zlomky promile. Kvalitní panely instalované v letech 2009 až 2011 budou vyřazovány z provozu ve větších objemech pravděpodobně až po roce 2040.



Panely nižší kvality zřejmě budou vyřazovány dříve, jejich množství je však obtížné odhadnout. Na konci roku 2010, v horečné snaze dokončit projekty velkých fotovoltaických elektráren za každou cenu, byli investoři ochotni koupit v podstatě cokoli. Vysoké odhady - 30 i více procent - pocházejí od zástupců firem, které dodávají kvalitní produkci, může se proto jednat o reklamní tah. Importu výrobků nízké kvality se snažily zabránit banky tím, že si vytvářely seznamy doporučených typů panelů respektive dodavatelů. Ani nekvalitní panely však nemusí být vyřazeny z provozu. Nejčastějším problémem je nižší výkon nebo rychlejší pokles účinnosti. Několik reklamací tohoto typu již proběhlo, ve všech případech však prozatím investor přistoupil na vrácení části kupní ceny.

Za ekonomicky rentabilní je považována kapacita recyklační linky kolem 20 tis. tun panelů ročně. Taková množství panelů lze očekávat až po roce 2040. Do té doby bude výstavba specializované recyklační linky nerentabilní. Využití univerzálních recyklačních metod, respektive zařízení na druhou stranu nezaručuje, efektivní využití speciálních fotovoltaických materiálů. Z uvedených důvodů by vhodným řešením minimálně do roku 2030 bylo přistoupení České republiky k systému PV Cycle a recyklace panelů na stávajících linkách v Německu.

Systém PV Cycle je financován výrobcí panelů respektive dodavateli na evropský trh. V současnosti zahrnuje přes 85 % dodaných panelů. <sup>[7]</sup>

## **4.5 Iniciativa PV CYCLE**

Sdružení evropských výrobců fotovoltaických panelů EPIA v rámci své iniciativy PV Cycle samo rozbíhá systém recyklace a ekologické likvidace vysloužilých fotovoltaických panelů. Tento systém je však dobrovolný a ani v nejbližších letech by se to zatím nemělo změnit vzhledem k dosud nízké potřebě recyklace (včetně nezařazení fotovoltaických panelů do zmiňovaných evropských směrnic).

- Cíle iniciativy PV Cycle jsou:
- redukce množství celkového fotovoltaického odpadu,
- vícečetné opětovné použití hodnotných surovin, jako je sklo, křemík a polovodivé materiály,
- snížení spotřeby energie v rámci životního cyklu výrobku,
- snížení škodlivých vlivů na životní prostředí při výrobě fotovoltaických panelů.

V každém sběrném místě systému PV Cycle jsou instalovány dva kontejnery na fotovoltaické panely. Jeden kontejner je určen na krystalické křemíkové panely, druhý na panely tenkovrstvé, pro jejichž recyklaci je používána jiná technologie. Po naplnění je kontejner vyměněn za prázdný a panely jsou odvezeny k recyklaci. Pro odvoz většího množství panelů, například z pozemní fotovoltaické elektrárny, je používán vhodnější způsob - kamion určený pro dopravu panelů k recyklaci přijede přímo k likvidované elektrárně. [7]

#### **4.6 Dobrovolný systém zpětného odběru EPIA**

V prosinci 2008 bylo podepsáno dobrovolné prohlášení, na jehož základě se členové EPIA zavázali odebrat minimálně 65 % fotovoltaických panelů instalovaných v Evropě od roku 1990 a recyklovat z nich 85 % materiálů.

Tento dobrovolný systém zpětného odběru byl nastartován loni. Vysloužilé panely (tenkovrstvé a krystalické křemíkové panely) se mohou odevzdávat na stacionární sběrná místa pro fotovoltaické panely. Dopravu ke sběrným místům však musí zajistit provozovatel zařízení. Předání panelů sběrným místům a recyklace je bezplatné.

Všechny vysloužilé fotovoltaické panely, které byly instalovány před 1. 1. 2010, se odebírají zdarma a následně recyklují. U fotovoltaických panelů uvedených do provozu po zmíněném datu platí bezplatnost pouze pro ty výrobce a dovozce, kteří jsou zapojeni do iniciativy PV Cycle. Zpětný odběr a recyklace jsou finančně pokryty také přes PV Cycle.

K ceně každého panelu prodaného od roku 2010 se již nyní připočítává recyklační poplatek. Předání a recyklace panelů by tak měly být možné i tehdy, pokud výrobce v době ukončení životnosti panelu již neexistuje. Na rozvoji dobrovolného systému zpětného odběru a recyklace se podle PV Cycle účastní 85 % výrobců a dovozců. Provozovatel vysloužilého zařízení musí na základě tohoto konceptu náklady na odinstalování panelu a na transport ke sběrnému místu pokrýt sám. Slabina dobrovolného systému spočívá v tom, že nezaručuje rovnoměrně dostupnou síť. [3,7]

## 4.7 Metody recyklace

Existují dva přístupy – recyklace panelů bez ohledu na technologii výroby a úpravy konstrukce s cílem recyklaci usnadnit.

### 4.7.1 Termická recyklace

Metoda termické recyklace je založena na mechanickém opracování panelů, především na ručním oddělení hliníkového rámu a dalších částí po zahřátí. Lze tak získat veliký podíl recyklovaného materiálu. Především křemíkových desek, skla a hliníku. Tento proces je však velmi náročný na energii a ruční práce.



Obrázek č. 4.2 - Recyklační zařízení pro krystalické panely<sup>[10]</sup>

Tato metoda je však využitelná pro většinu solárních panelů dostupných na trhu. Výjimku tvoří panely se články choulostivými na mechanické poškození, kdy dochází k výraznému snížení podílu recyklovaného materiálu.

V současnosti zřejmě nejpokročilejší metodu recyklace panelů navrhla a odzkoušela firma Deutsche solar AG. Celé panely jsou zavezeny do speciální pece, kde jsou zahřívány na teplotu nad 500 °C. Při této teplotě se plastové materiály odpaří, následně jsou v další komoře řízeně spalovány. Ostatní materiály jsou separovány ručně. Jsou-li panely nepoškozené, lze vytěžit až 85 % článků pro nové použití. Spotřebu energie na výrobu nových panelů je díky tomu možno snížit až o 70 %. Metoda je použitelná pro všechny stávající konstrukce panelů z krystalických článků.<sup>[2,7]</sup>

Tabulka č. 4.1- Materiálové složení krystalických panelů

Materiál	Složení panelů [kg/kWp]	Podíl [%]	Výtěžnost recyklace [%]
Sklo	60	67	>95
Hliník	16	18	100
Plasty	10	11	
Křemík	3	3	85
Junction box	2	2	
meď	1	1	80

#### 4.7.2 Mechanicko-chemická metoda

Pro likvidaci panelů je navrhován podobný postup jako při recyklaci LCD televizorů. Na začátku se ručně demontuje hliníkový rám. Následuje drcení a třídění velikostních frakcí. K oddělení jednotlivých materiálů slouží separační metody - fluidní a mokré splavy a elektrodynamická separace. Stříbro a další zájmové kovy jsou získávány chemicky a pyrometalurgicky. Získané kovy mohou být použity jako surovina v metalurgickém průmyslu, plasty budou pravděpodobně likvidovány spálením s možností využít teplo. Ve srovnání s termickou recyklací je u této metody nižší podíl ruční práce. Výsledkem jsou však pouze drcené suroviny. Metoda je použitelná spíše pro tenkovrstvé panely, u nichž nelze polovodičové materiály získat jiným způsobem. [7]



Obrázek č. 4.3 - Recyklační zařízení pro tenkovrstvé panely<sup>[10]</sup>

Tabulka č. 4.2 - Materiálové složení tenkovrstvých panelů (CIS, CdTe)

Materiál	Složení panelů [kg/kWp]	Podíl [%]	Výtěžnost recyklace [%]
Sklo	150	84	>95
Hliník	20	12	100
Plasty	5	3	
Ostatní	2	1	90

### 4.7.3 Konstrukční úpravy

Cílem konstrukčních úprav je usnadnit demontáž celých plně funkčních článků na konci životnosti panelu. Na rozdíl od termické metody, kde výstupním produktem jsou křemíkové desky po odleptání funkčních vrstev původního článku. Jsou navrhovány metody zapouzdření článků bez laminace nebo dvojité zapouzdření s mezivrstvou, která má nízkou přilnavost k článkům - metoda DEM (Double Encapsulated Module). U metody DEM jsou články před laminací zapouzdřeny do silikonu, který má srovnatelný index lomu jako EVA, ale nízkou adhezi k článkům. Dodatečné vrstvy snižují účinnost v nejlepších případech o 3 %.

Při rozebírání se nejdříve nahřeje a sloupne vrstva Tedlaru. Následně se prořízne EVA v okolí článku. EVA se sloupne i s mezivrstvou. Kritický je následující krok – oddělení článku od podkladu, k tomu byl navržen speciální přípravek. Problém obou zmiňovaných metod je manipulace s články, zejména v budoucnosti, kdy je předpokládán přechod na výrazně tenčí desky.

V praxi se konstrukční úpravy neprosadily, protože výrobní náklady jsou vyšší. Chybí přitom způsob, jak hodnověrně prokázat očekávanou vyšší životnost panelů. Další výhoda - snížení energetické náročnosti výroby panelů - se postupně vytrácí. Především se novými technologiemi podařilo výrazně snížit energetickou náročnost výroby solárního křemíku. Zároveň se na výrobu krystalických článků používají stále tenčí desky, což rovněž přispívá ke snížení energetické náročnosti výroby panelů. Tenčí desky, zejména z multikrystalického křemíku, jsou však křehčí, výtěžnost při recyklaci se proto výrazně snižuje. [2]

## 4.8 Množství instalovaných panelů

Pomineme-li několik drobných instalací z dřívější doby, byly v současnosti nejstarší panely instalovány mezi lety 2000 až 2006 v rámci programu Slunce do škol. Celkově bylo instalováno přes 1000 systémů na základních školách; výkon těchto systémů byl 100 Wp nebo 200 Wp (jeden nebo dva panely). Později byly instalovány systémy o výkonu 1,2 kWp na středních školách a 20 až 40 kWp na vysokých školách. Celkový počet instalovaných panelů je však v porovnání s pozdějšími lety zanedbatelný.



Obrázek č. 4.4 - Rozvoj fotovoltaiky v ČR

Teprve se zavedením podpory výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů podle zákona č.180/2005 Sb. dochází od roku 2006 k významnému růstu instalovaného výkonu, a tedy i množství instalovaných panelů. Vzhledem k očekávané životnosti lze větší objemy panelů k recyklaci očekávat nejdříve po roce 2030. Do té doby budou likvidovány pouze panely poškozené při dopravě a montáži, případně panely se skrytými výrobními vadami, které se obvykle projeví v prvních měsících a letech provozu. Obtížně odhadnutelné je množství nekvalitních panelů, jejichž účinnost klesne o 10 % dříve než za garantovaných 10 let. Takové panely by byly provozovatelem fotovoltaické elektrárny reklamovány u výrobce nebo dodavatele, kteří by byli zodpovědní i za jejich recyklaci. <sup>[10]</sup>

## 4.9 Recyklované materiály

Největší podíl na hmotnosti panelů připadá na sklo (63 %) a hliníkový rám (22 %). Oba tyto materiály jsou běžně recyklovány. Ostatní materiály lze recyklovat jen částečně.

**Hliník** – primární produkce je energeticky náročná – 200 MJ/kg elektřiny a představuje asi 8 % spotřeby energie na výrobu panelu. V současnosti jsou proto vyráběny i panely bez rámu. Tato praxe však není nutná, hliník lze snadno recyklovat s velmi nízkou spotřebou – 8 MJ/kg převážně tepelné energie, výtěžnost se u kusového hliníku blíží 100 %.

**Sklo** nebo jiný transparentní materiál je základní konstrukční díl, který nelze vynechat. Recyklace skla může snížit spotřebu energie na jeho výrobu asi o 40 %. Významnější je však snížení nároků na těžební a skládkové kapacity. Ve většině případů lze recyklované sklo použít na výrobu stejného produktu.

**Plastové komponenty**, vzhledem k jejich degradaci působením klimatických podmínek, je obtížné recyklovat. Možné je pouze využití tepelné energie při spalování.

**Fotovoltaické články** mají zanedbatelný podíl na hmotnosti panelů. Podílí se však 50 % na ceně panelu a 80 % na spotřebě energie na jeho výrobu. Na konci životnosti jsou přitom články v podstatě nezměněny. S recyklací článků nebo desek jsou již první praktické zkušenosti.

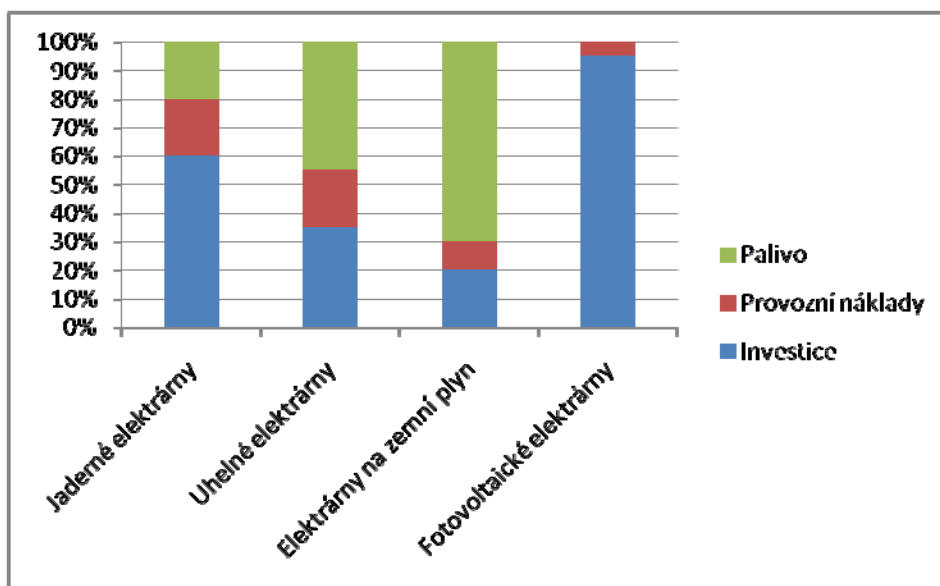
**Těžké kovy** představují z hlediska hmotnosti, ceny i spotřeby energie na výrobu panelů zanedbatelné položky. Podíl olova na hmotnosti panelů je pouze 0,12 %, stříbra 0,14 %, cínu 0,12 % a mědi 0,37 %. Energetická i materiálová náročnost recyklace je srovnatelná s výrobou z primárních surovin. Recyklace je však nutná z jiných důvodů. Těžké kovy jsou toxické a je proto nutno je oddělit od životního prostředí. Mimoto zejména u stříbra lze očekávat v blízké budoucnosti vyčerpání ekonomicky těžitelných zásob a v důsledku toho růst nákladů na těžbu. <sup>[6]</sup>

## 5 Posouzení celkové zátěže ŽP vzniklé výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů. Porovnání s jinými zdroji elektrické energie.

### 5.1 Ekonomické ukazatele

#### 5.1.1 Výrobní náklady

Do výrobních nákladů jsou započítávány investiční náklady, náklady na palivo, provozní náklady, náklady na údržbu, a pokud je to možné, jsou započítávány i externí náklady. Porovnání struktury výrobních nákladů pro jadernou, uhelnou a plynovou je uvedeno v obr. č. 5.1.



Obrázek č. 5.1 - Porovnání struktury výrobních nákladů

Charakteristickou vlastností jaderných elektráren je dlouhá doba výstavby. Zatím co plynovou elektrárnu lze i s uvážením doby potřebné k získání všech potřebných povolení postavit přibližně za čtyři roky, uhelnou elektrárnu kolem sedmi až osmi roků u jaderných elektráren to pak dělá patnáct let, jen pět až sedm let bude třeba na schvalovací proces. Investiční náklady potřebné pro stavbu jaderné elektrárny jsou vysoké, dnes se pohybují kolem 2000 USD/kWe. Investiční náklady uhelných elektráren se pohybují okolo 1000 USD/kWe, plynové potřebují přibližně 500 USD/kWe. Palivová složka výrobních



nákladů je v jaderných elektrárnách na rozdíl od elektráren uhelných a plynových velice nízká.

Odhady průměrných výrobních nákladů z různých studií není možné jednoduše srovnávat a to z důvodů používání různých předpokladů týkající se diskontní sazby, koeficientu využitelnosti bloku a jeho ekonomické životnosti. Některé studie berou v úvahu daně a do ceny kapitálu zahrnují i rizikové prémie zatímco jiné studie to nedělají.

Ceny fosilních paliv jsou stanoveny k různému datu a odpovídají různým či regionálním podmínkám.

Jaderná energetika se vyznačuje dlouhou ekonomickou i technickou životností elektráren. U elektráren na fosilní paliva se předpokládá životnost okolo třiceti let, jaderné elektrárny jsou dnes běžně schvalovány na 60 let, u nových reaktorů se předpokládá životnost 80 let. A u fotovoltaických elektráren se předpokládá životnost 30 let. <sup>[4]</sup>

Tabulka č. 5.1 - Investiční náklady a předpokládaná doba výstavby pro různé zdroje

<b>Elektrárna</b>	<b>Investiční náklady [USD/kW]</b>	<b>Doba výstavby [rok] bez schvalovacího procesu</b>
<b>Jaderná</b>	2000 - 2500	6 – 7
<b>Uhelná</b>	1000 - 2000	4 – 5
<b>Plynová</b>	500 – 900	2 – 3
<b>Větrná</b>	1250 – 2000	1
<b>Solární</b>	5000 - 15000	1
<b>fotovoltaická</b>	15000 - 25000	1

### 5.1.2 Vliv ceny paliva na výrobní náklady

Vliv ceny paliva na výrobní náklady je důležitým faktorem z hlediska středně a dlouhodobé stability cen elektřiny, které zase přímo ovlivňují ekonomickou výkonnost státu či podniku. V tabulce je uveden odhad nárůstu výrobních nákladů v případě zdvojnásobení ceny paliva. Pro jaderné elektrárny byl uvažován jednak pouze nárůst ceny uranu, jednak nárůst celkové ceny paliva. Náklady na vlastní výrobu paliva jsou však zatím daleko stabilnější než vlastní cena suroviny.

Tabulka č. 5.2 - Vliv zdvojnásobení ceny paliva na výrobní náklady

Uhelná	Plynová	Jaderná		Větrná, Fotovoltaická
		Cena uranu	Celková cena paliva	
40%	75%	4%	15%	0%

### 5.1.3 Koeficient způsobilosti zdroje

U moderních elektráren určených pro práci v základním zatížení se koeficient způsobilosti (disponibility) výrazně neliší. Uhelné, plynové a jaderné elektrárny dosahují koeficientu způsobilosti okolo 85% a jsou tedy ročně v provozu na požadovaném výkonu cca 7500 hodin (průměrný koeficient pro jaderné elektrárny 84%, roční provoz na požadovaném výkonu 7 350 hod). V případě zdrojů s nespojitou dodávkou (fotovoltaické a větrné elektrárny) závisí koeficient způsobilosti především na místních podmínkách, méně už na použité technologii. Koeficient způsobilosti se pro fotovoltaické elektrárny pohybuje kolem 10 až 25%, pro větrné elektrárny mezi 15 a 45%. To vyžaduje velkou záložní kapacitu nebo dobře zajištěnou možnost dovozu. <sup>[4]</sup>

### 5.1.4 Nároky na energie

Výroba elektřiny vyžaduje nezanedbatelnou spotřebu energie při výstavbě elektrárny a pro elektrárny na fosilní paliva a elektrárny jaderné rovněž pro zásobování palivem a zpracování odpadů. Množství primární energie potřebné na jednu vyrobenou kWh elektřiny se pro vodní, větrné a jaderné elektrárny pohybuje mezi 0,03 a 0,15 kWh. Pro elektrárny plynové a uhelné je nezbytný energetický vklad na vyrobenou kWh v rozmezí 0,16 až 0,30kWh, to je dáno zejména energetickou náročností těžby, dopravy a zpracování paliva. Odpovídající čísla pro dnešní fotovoltaické elektrárny pohybují mezi 0,62 a 1,24kWh. To se také odráží v době jejich energetické návratnosti, která se pohybuje mezi šesti a dvanácti lety, a je ve srovnání s jinými zdroji bezkonkurenčně nejdelší. <sup>[4]</sup>

**Tabulka č. 5.3 - Surovinová náročnost různých zdrojů**

	<b>Ocel</b> [kg/GWh]	<b>Měď</b> [kg/GWh]	<b>Hliník</b> [kg/GWh]
<b>Černé uhlí</b>	1750 – 2310	2	16 – 20
<b>Hnědé uhlí</b>	2100 – 2170	7 – 8	18 – 19
<b>Zemní plyn</b>	1207	3	28
<b>Jádro</b>	420 – 490	6 – 7	27 – 30
<b>Fotovoltaika</b>	3690 – 24250	210 – 510	240 – 4620
<b>Vítr</b>	3700 – 11140	47 – 140	32 – 95
<b>Voda</b>	1560 - 2680	5 - 14	4 - 11

### 5.1.5 Nároky na suroviny

Výroba elektřiny je náročná na spotřebu surovin jako ocel, měď a hliník. Z pohledu udržitelnosti je třeba hodnotit i efektivní využívání těchto a jiných surovin. Zahrnuje surovinové nároky při výstavbě, zásobováním palivem a provozu. Jedná se jen o nástin a ne o důkladnou materiálovou bilanci. Výsledky ovšem naznačují, že relativně malá koncentrace energie ve slunečním záření či větru má za následek značnou surovinovou náročnost. Surovinová náročnost se musí nutně odrazit ve výrobních nákladech. <sup>[4]</sup>

**Tabulka č. 5.4 - Energetická návratnost**

<b>Zdroj</b>	<b>Energetická návratnost</b> [měsíce]
<b>Černé uhlí</b>	3,2 – 3,6
<b>Hnědé uhlí</b>	2,7 – 3,3
<b>Zemní plyn</b>	0,8
<b>Jádro</b>	2,9 – 3,4
<b>Fotovoltaika</b>	71 – 141
<b>Vítr</b>	4,6 – 13,7
<b>Voda</b>	8,2 – 13,7

## 5.2 Vliv na zdraví a životní prostředí

### 5.2.1 Záběr půdy

Koncentrace energie ve fosilních palivech a palivu jaderném umožňuje výstavbu relativně malých elektráren se zastavěnou plochou pouze několik kilometrů čtverečních. Nízká energetická vydatnost obnovitelných zdrojů měřená územím potřebným pro výrobu jednotkového množství energie je ukázána na plochách potřebných pro výrobu 1 000 MWe s uvážením lokálních požadavků a klimatických podmínek. <sup>[4]</sup>

Tabulka č. 5.5 - Záběr půdy pro elektrárnu o instalovaném výkonu 1000MW

Elektrárna	Plocha [km <sup>2</sup> ]
Jaderná	0,25 – 4
Uhelná	0,85 – 1,5
Plynová	0,16 – 0,25
Fotovoltaická	20 – 50
Větrná	50 – 150
Biomasa	4000 - 6000

### 5.2.2 Emise skleníkových plynů

Emise skleníkových plynů jsou vzhledem ke své pravděpodobné roli v oteplování planety a změnách klimatu současným ukazatelem globálního ovlivňování životního prostředí. Emise skleníkových plynů z jaderných, větrných a vodních elektráren jsou o jeden až dva řády nižší než emise z elektráren na fosilní paliva.

### 5.2.3 Emise ostatních plynů

Emise kyslíčnicku siřičitého, oxidu dusíku a emisí aerosolových částic. Je třeba poznamenat, že nepřímé emise během těžby surovin a výroby součástí jsou závislé na konkrétním energetickém mixu a nejsou jednoduše přenositelné na jiné země. Nicméně, vzhledem k dost obdobným podílům fosilních paliv na energetickém mixu v řadě zemí, umožňují získat základní představu pro porovnání tohoto aspektu jednotlivých způsobů výroby elektřiny.

Vzhledem k vysokým nárokům na množství paliva převyšuje množství škodlivých látek z elektráren spalujících fosilní paliva emise z jakéhokoliv jiného zdroje. Znečištění obecně závisí na míře nečistot v palivu, například zemní plyn je čistším palivem než ropa a ropa je zase čistším palivem než uhlí. Elektrárna s výkonem 1 000 MWe spalující uhlí bez technologií pro redukci emisí a odpadů vyprodukuje ročně v průměru 44 000 t kysličníků síry a 22 000 t kysličníků dusíku, které jsou uvolněny do ovzduší. Navíc tu máme 320 000 t popílku obsahujícího 400 t těžkých kovů – arzenu, kadmia, kobaltu, olova, rtuti, niklu a vanadu. Do těchto množství nejsou zahrnuty vlivy z dalších částí palivového cyklu, to je z těžby a dopravy.

Elektrárny spalující fosilní paliva, které jsou vybaveny moderními technologiemi pro redukci odpadu a emisí, mohou plynné emise omezit až desetinásobně, je však třeba mít na paměti, že toto snížení je doprovázeno produkcí značného množství pevných odpadů. V závislosti na obsahu síry v palivu může snižování emisí síry v elektrárně s výkonem 1 000 MWe vést ke vzniku 500 000 t pevných odpadů při spalování uhlí, více než 200 000 t pevných odpadů při spalování ropy a zhruba 200 000 t v procesu zbavování zemního plynu merkaptanů. Tento odpad, který obsahuje určité množství toxických látek, je odkládán na odkladištích, využíván pro zpevňování skládek. Stále častěji je však legislativně zařazován do kategorie odpadů.

Jaderná elektrárna s výkonem 1 000 MWe při provozu prakticky neuvolňuje do ovzduší škodlivé plyny ani jiné škodlivé látky, vyprodukuje ročně zhruba 25 t vysoce radioaktivního vyhořelého paliva a 800 t nízko a středně radioaktivních odpadů s celkovým objemem cca 300 kubických metrů. Významného snížení objemu nízkoaktivních odpadů je dosahováno zhutňováním. Pro srovnání průmyslové činnosti vyprodukuje v EU ročně víc než 10 milionů kubických metrů pevného toxického odpadu. <sup>[4]</sup>

#### **5.2.4 Vliv záření**

O vlivu záření se mluví prakticky pouze v souvislosti s jadernými elektrárnami, ale i provoz elektráren na fosilní paliva a geotermálních elektráren je doprovázen emisemi radioaktivních látek. Odhaduje se, že člověk žijící ve vzdálenosti do 80 km od uhelné elektrárny obdrží průměrnou roční dávku 0,3  $\mu\text{Sv}$ , zatímco člověk žijící ve vzdálenosti do 80 km od elektrárny jaderné obdrží průměrnou roční dávku 0,09  $\mu\text{Sv}$ . V obou případech jde o dávku tisíckrát menší než např. při rentgenovém vyšetření a více než desettisíckrát menší, než je roční průměrná dávka z přírodního pozadí v České republice.

Radiologická rizika za normálního provozu jsou spojena s výpustmi radioaktivních látek do ovzduší a do vod. Tyto výpusti podléhají velmi přísné regulaci.

Vliv normálního provozu elektráren na zdraví obyvatel může být hodnocen pomocí úmrtnosti definované jako zkrácení očekávané délky života, tento ukazatel se vyjadřuje v měsících na GWh.

Jaderné, větrné a vodní elektrárny způsobují za normálního provozu velmi nízkou mortalitu. Mortalita způsobena plynovými a fotovoltaickými elektrárnami je srovnatelná, elektrárny uhelné způsobují mortalitu daleko vyšší. <sup>[4]</sup>

### **5.3 Vyhodnocení pomocí metody LCA**

Metoda LCA (Life Cycle Assessment) viz příloha č. 1. spočívá v ohodnocení vybraného objektu od způsobu jeho výroby, přes provoz, až po likvidaci na konci životnosti. Zkráceně se tedy jedná o posuzování životního cyklu určitého objektu. Například u jaderných elektráren, které mají zanedbatelné emise v průběhu provozu, hodnotí metoda LCA emise vypouštěné během dobývání a obohacování uranu, výstavby areálu elektrárny, ukládání či přepracování použitého paliva a odstavení elektrárny z provozu a její likvidace.

Z pohledu výstavby spotřebuje každý zdroj elektrické energie určité množství surovin (kovy, beton, plasty) a velké množství energie. Je tedy potřeba elektrická energie, kterou zdroj později opět dodává do sítě. Spotřebují se však i neobnovitelné zdroje, například uhlí, z kterého se vyrábí koks používaný na výrobu oceli. Při stavbě se dopravou spotřebovávají také ropné produkty (benzín, nafta) a jejich deriváty pro výrobu plastů, barev, vápence atd. Při výrobě vzniká též velké množství odpadů. Řada z nich je nerecyklovatelná a končí na skládkách. Dále průmyslová výroba uvolňuje zanedbatelné množství skleníkových plynů.

## **5.4 Životní cyklus fotovoltaické elektrárny**

Životní cyklus výrobku zahrnuje všechny fáze od těžby suroviny, výroby polotovarů, konečných výrobků přes dobu užívání až po recyklaci nebo likvidaci na konci životnosti. Následující hodnocení životního cyklu předpokládá panely z krystalického křemíku. V životním cyklu FVE můžeme rozlišit následující fáze životního cyklu:

- těžba surovin
- **výroba metalurgického křemíku (mg-Si)**
- **výroba solárního křemíku (sg-Si)**
- výroba ingotu a desek
- výroba článků
- **kompletace panelů**
- montáž fotovoltaického systému
- provoz – výroba elektřiny
- demontáž systému
- recyklace komponent

K tomu doprava v různých fázích. Podobný řetězec lze vysledovat i pro ostatní komponenty fotovoltaického systému – měnič, nosná konstrukce atd.

Energetická náročnost výroby

Podíl jednotlivých složek

Z hlediska spotřeby energie jsou některé fáze výroby panelů náročnější:

- výroba mg-Si
- rafinace na sg-Si
- výroba ingotů a desek
- výroba článků
- kompletace panelů

Z hlediska celého životního cyklu může být významná ještě recyklace na konci životnosti.

- Ostatní položky jsou méně významné:
- těžba a zpracování surovin
- montáž systému
- spotřeba energie v provozu
- demontáž systému
- doprava

Podíl jednotlivých položek závisí kromě použité metody výroby solárního křemíku a ingotů i na konkrétním výrobcí. Výroba monokrystalických článků je ve srovnání s multikrystalickými energeticky náročnější. <sup>[6]</sup>

#### **5.4.1 Výroba solárního křemíku**

Z počátku byl pro výrobu fotovoltaických článků používán odpadní křemík z výroby mikroelektronických součástek, protože požadavky na kvalitu solárního křemíku jsou nižší. S růstem výrobních kapacit však tento zdroj přestal dostáčet. Proto byly budovány nové provozy speciálně na výrobu solárního křemíku.

Metody produkce solárního křemíku. V současnosti je ve výrobě solárního křemíku zavedeným standardem upravený Siemens postup, v několika variantách je používán už více než 10 let. Proces využívající Fluidized Bed Reaktor (FBR) namísto reaktoru Siemens vykazuje nižší spotřebu elektrické energie.

Další snížení energetické náročnosti je možné přechodem na přímou výrobu solárního křemíku z primárních surovin s vynecháním energeticky náročné destilační fáze. <sup>[6]</sup>

#### **5.4.2 Výroba ingotů a desek**

Spotřeba energie na tažení monokrystalických ingotů vykazuje velké rozdíly mezi výrobcí. Nižší spotřebu vykazují novější zařízení. Spotřeba klesá při větších průměrech, je zvládnuto tažení ingotů o průměru 450 mm, ve fotovoltice se přechází na standardní rozměr desek (156 mm x 156 mm). Rozdíly mezi výrobcí jsou způsobeny různou velikostí ingotů. <sup>[6]</sup>



### 5.4.3 Spotřeba energie na řezání desek

Závisí na šířce řezu a ploše, její podíl je méně významný, nelze ji podstatným způsobem snížit. Lze snižovat spotřebu pomocných materiálů (recyklovat brusnou emulzi).

Recyklace brusné emulze. Brusná emulze obsahuje karbid křemíku (SiC) a polyethylenglykol (PEG). Spotřeba energie na její výrobu představuje 30 MJ/m<sup>2</sup> desek. Recyklace může snížit finanční náklady a zároveň spotřebu až o 20 MJ/m<sup>2</sup> při výtěžnosti 90 % SiC a 85 % PEG. [6]

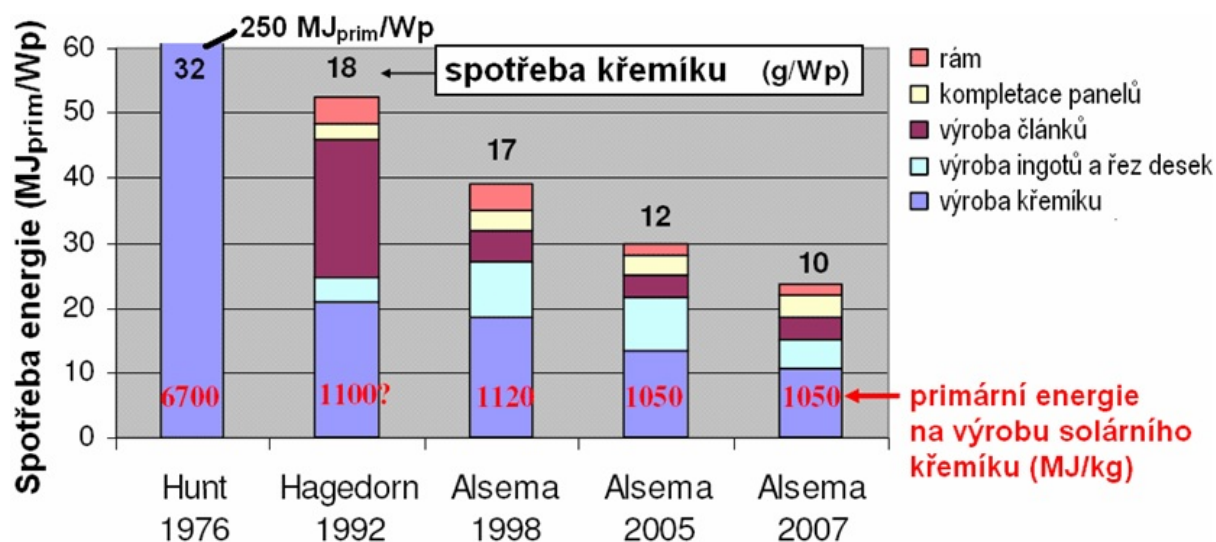
### 5.4.4 Výroba článků

Z hlediska spotřeby energie nedošlo ve výrobě článků k tak výrazným změnám jako při výrobě solárního křemíku. Jedním z důvodů bylo, že podíl spotřeby energie na výrobu článků byl v celkové bilanci méně významný.

V současnosti nad snahou o snižování spotřeby energie ve výrobě článků převažuje snaha o zvyšování účinnosti. V důsledku spotřeba energie ve výrobě mírně narůstá.

### 5.4.5 Snižování spotřeby křemíku

Spotřeba křemíku na výrobu článku (g/Wp) klesá jednak snižováním ztrát křemíku ve výrobě, tak i zvyšováním účinnosti článků a panelů. Snížení spotřeby křemíku snižuje výrobní náklady. Současný standard je spotřeba na úrovni 10 až 12 g/Wp. V nejbližších letech je očekáván pokles na 4 až 6 g/Wp obr. č. 5.2. Za technologickou mez se považuje hodnota 2 g/Wp.



Obrázek č. 5.2 - Vývoj spotřeby energie v závislosti na spotřebě křemíku [3]

Tloušťka desek postupně klesala, až na současný standard 200  $\mu\text{m}$ . V současnosti jsou vyráběny články na deskách o tloušťce 180 a i 150  $\mu\text{m}$ . Do budoucna jsou uvažovány bezmezné postupy pro výrobu desek o tloušťce asi 80  $\mu\text{m}$  s prořezem pouze 5  $\mu\text{m}$ . Tenčí desky však vyžadují automatizaci, ruční manipulace je téměř vyloučena. <sup>[6]</sup>

## 5.5 Vyhodnocení pomocí metody Energy pay-back time (EPBT)

Výroba fotovoltaických systémů, stejně jako každá jiná výroba, spotřebovává určité množství energie. Pro stanovení doby energetické náročnosti je nutné nejprve provést důkladnou analýzu všech energetických vstupů do celého řetězce životního cyklu fotovoltaického systému od výroby ingotu křemíku až po konečnou likvidaci. Fotovoltaický systém se neskládá pouze z křemíku, ale také z jiných materiálů jako je hliník, sklo, EVA atd. Je tedy nutné také započítat všechnu energii potřebnou pro výrobu základních i pomocných materiálů. Dále by měla být započítána procesní energie potřebná pro výrobu, dopravu, údržbu a likvidaci v podobě elektřiny, plynu a jiných paliv (není ve výpočtu uvažováno). Řešitelé se zaměřili především na energetickou náročnost ve výrobě křemíkových ingotů, s jejich následným řezáním na desky. Dále na výrobu solárních článků a solárních panelů. Do výpočtu bylo nezbytné také zahrnout materiálovou a procesní výtěžnost. Současně byla vyhledána data k energetické náročnosti výroby základních materiálů.

Metoda „Energy pay-back time“ (EPBT) definuje čas návratnosti energie nutné k výrobě fotovoltaického panelu, který následně sám elektrickou energii vyrábí. Tento indikátor má svou váhu vzhledem k blížícímu se vyčerpání zdrojů elektrické energie a poškození životního prostředí. Mohou se s jeho pomocí dobře srovnávat jednotlivé technologie výroby fotovoltaických prvků. Následně se z této metody může odvodit úspora množství  $\text{CO}_2$ . Nevýhodou metody je nejednotnost v oblasti získávání vstupních dat a také jejich dostupnost. EPBT lze definovat velmi jednoduchým vztahem (5.1):

$$\text{EPBT} = E_{\text{input}} / E_{\text{saved}}, \quad (5.1)$$

kdy  $E_{\text{input}}$  představuje energii vstupující během celého životního cyklu panelu (zahrnuje např. energii potřebnou k výrobě, energii nutnou k instalaci, energie spotřebovanou během vlastního provozu – např. otáčení trackeru nebo ztráty v „Balance of system“ – BOS, atd.).  $E_{\text{saved}}$  je průměrná roční vygenerovaná elektrická energie fotovoltaickým panelem. <sup>[8,6]</sup>

### **Posouzení FVS metodou EPBT zahrnuje spoustu faktorů, které ji mohou ovlivnit:**

- technologie výroby křemíkových desek a solárních článků,
- způsob laminování FV panelů (do hliníkového rámu, dvojsklo nebo různá integrace do budov),
- rozměry panelů a výsledná efektivita,
- typ aplikace FVS: ostrovní systém (s nutností akumulace energie) nebo přímo napojený na rozvodnou síť,
- případně lze zde zahrnout způsob dopravy všech součástí FVS na místo instalace,
- a nakonec vlastnosti FVS měřené během jeho vystavení slunečnímu záření.

Z tohoto důvodu je třeba specifikovat podmínky vztahující se k výrobě a k provozu FVS

Základní vlastnosti sledovaného FVS jsou popsány na následujících řádcích:

#### **Výroba FVS:**

- monokrystalické křemíkové desky (CZ křemík, řezání na desky drátořeznou pilou, p-typový substrát, rozměr: 4", vstupní tloušťka 300 $\mu$ m),
- solární články vyrobeny standardním procesem (vytvoření texturovaného povrchu, difúze n<sup>+</sup>-vrstvy, depozice antireflexní vrstvy SiN<sub>x</sub> metodou LPCVD, sítotiskové nanesení kontaktů a jejich následné žíhání),
- solární panel typu SMI 36-55/12 (ruční pájení kontaktních pásků na článek a vytváření řetězců, skládání fólií, laminace a rámování Al rámem,
- prvky a ideální úhel sklonu panelů),
- střešní instalace,
- místo instalace: kdekoliv v České republice.

#### **Provoz FV systému:**

- předpokládá se přímé připojení fotovoltaického systému na rozvodnou síť,
- dobré podmínky pro provoz (žádné stínění jako jsou stromy či konstrukční prvky a ideální úhel sklonu panelů),
- střešní instalace,
- místo instalace: kdekoliv v České republice.

### Energetická návratnost:

Dle definované rovnice EPBT byla tabulka se sumou jednotlivých energetických vstupů přepočítána na dobu energetické návratnosti. Výsledná tabulka je pro lepší přehled rozdělena na minimální a maximální předpokládanou roční výtěžnost elektrické energie (na 850 a 1150 kWh). [6,8]

Tabulka č. 5.6 - Předpokládaná EPBT pro jednotlivé složky vložené energie

850 kWh	ingot	článek	panel	roky
proces	1,27	0,44	0,31	<b>2,02</b>
materiál	2,59	0,03	0,58	<b>3,20</b>
	<b>3,86</b>	<b>0,47</b>	<b>0,89</b>	<b>5,22</b>
1150 kWh	ingot	článek	panel	roky
proces	0,94	0,32	0,23	<b>1,49</b>
materiál	1,92	0,02	0,43	<b>2,37</b>
	<b>2,86</b>	<b>0,34</b>	<b>0,66</b>	<b>3,86</b>

Z tabulky č. 5.6 vyplývá, že na území České republiky se nám vrátí energie vložená do výroby fotovoltaických prvků za 3,86 až 5,22 let. Pokud připočteme k EPBT také instalaci systému v rámci BOS (bez elektroniky), navýší se EPBT cca o 0,75 let. Energetická náročnost recyklace a likvidace fotovoltaických systémů na konci svého životního cyklu zde není zahrnuta, protože v dnešní době nejsou dostatečné zkušenosti v této oblasti. [6,9]

## **6 Závěr**

V prvním bodě této práce jsem popsal výrobu fotovoltaických panelů, které jsou v současné době běžně využívány v energetice a jejich vliv na životní prostředí. V bodě druhém jsem analyzoval životnost fotovoltaických systémů a zátěž na životní prostředí vznikající jejich provozem. V třetím bodě jsem uvedl popis dobrovolného systému zpětného odběru EPIA a metody recyklace fotovoltaických panelů a též nejčastější důvody pro vyřazení panelů k recyklaci.

Hlavním cílem této práce bylo vypočítat celkovou zátěž životního prostředí vzniklou výrobou, provozem a likvidací fotovoltaických systémů a porovnat jí s jinými zdroji energie.

V diplomové práci jsem pro výpočet zátěže použil dvě metody. Jedna z nich je metoda LCA (Life cycle assesment) pro výpočet životního cyklu fotovoltaické elektrárny. A druhá je metoda EPBT (Energy pay-back time). Definiuje čas návratnosti energie nutné k výrobě fotovoltaického panelu, který následně sám elektrickou energii vyrobí. Ta se v našich podmínkách pohybuje okolo 4,5 – 6 let bez započítání energie, která bude potřeba k procesu recyklace. Pro porovnání s ostatními zdroji energie jsem použil dva ukazatele. A to ukazatele ekonomické a vliv na zdraví a životní prostředí. Do ekonomických ukazatelů jsem zařadil výrobní náklady, nároky na energii, nároky na suroviny a koeficient způsobilosti zdroje. Do ukazatelů na vliv na zdraví a životní prostředí jsem zařadil zábor půdy, emise skleníkových plynů, emise ostatních plynů a vliv záření.

Přímé využití energie slunečního záření patří z hlediska ochrany životního prostředí k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektřiny. Jde o energetický zdroj, kterého bude dlouho v přírodě dostatek. Ve srovnání s ostatními zdroji energie je u nás výroba elektřiny s využitím fotovoltaických systémů stále ještě příliš drahá a neefektivní a to především z důvodu poměrně nízké průměrné roční intenzity slunečního záření a nízké účinnosti přeměny energie. Z toho vyplývá, že fotovoltaické zdroje u nás mají smysluplné využití především v místech bez možnosti připojení k rozvodné síti, případně jako doplňkový zdroj malého výkonu či ostrovní systém.

## 7 Seznam použité literatury

- [1] MOTLÍK, J; ŠAMÁNEK, L; ŠTEKL, J.: *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich využití pro ČR*
- [2] BAŘINKA, R; BECHNIK, B; ČECH, P.: *Analýza životního cyklu fotovoltaických systémů. 3. Česká fotovoltaická konference. 2008*

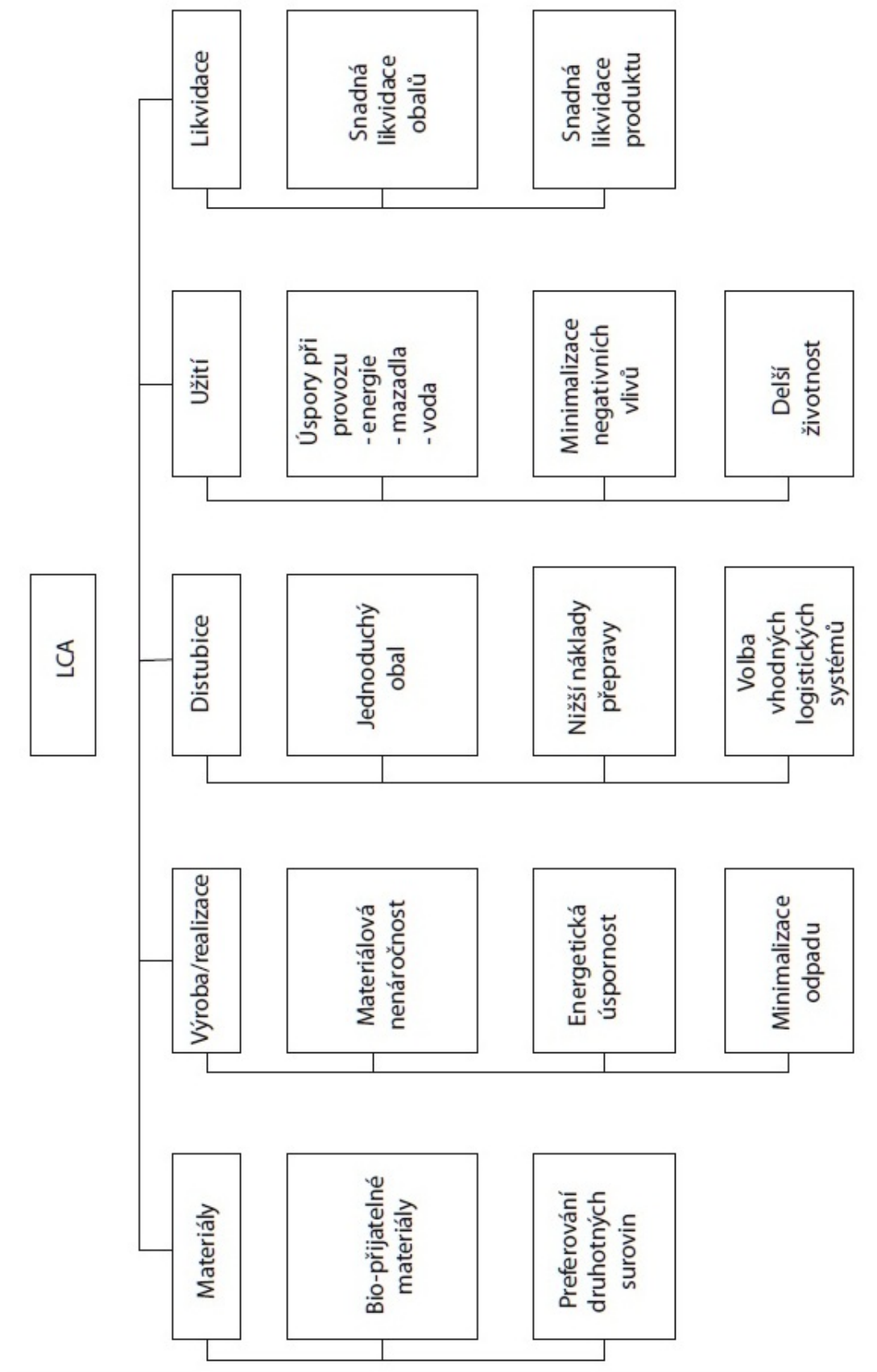
### Internetové odkazy (využívané od 1.12 2010 do 31.1 2012)

- [3] <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [4] <http://www.pro-energy.cz/clanky3/4.pdf>
- [5] <http://czepho.cz/cs/stalo-se/studie-bb>
- [6] <http://www.czrea.org/cs>
- [7] <http://energie.tzb-info.cz/fotovoltaika>
- [8] <http://www.enviweb.cz/clanek/energie/69728/>
- [9] <http://www.chmi.cz>
- [10] <http://www.oze.tzb-info.cz>

## **8 Přílohy**

Příloha č. 1	Schéma LCA procesu
Příloha č. 2	Trvání slunečního svitu
Příloha č. 3	Výnos ze slunečního záření

### Příloha č. 1 Schéma LCA procesu





**Příloha č. 2 Trvání slunečního svitu**

Trvání slunečního svitu – Sunshine Duration (h)												
Dlouhodobé normální klimatických hodnot za období 1961–1990												
Lokalita / měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Kuchařovice	57,6	81,4	133,9	177,6	223,4	226,8	240,8	227,7	174,3	135,8	60,2	53,2
Velké Pavlovice	49,3	78,7	126,8	180,2	225,2	228,6	252,1	227,8	172,9	131,9	58,2	44,5
Milešovka	59,3	78,0	125,4	166,0	216,3	214,6	223,7	218,3	162,4	130,7	60,3	48,2
Churáňov	79,5	90,4	122,6	150,8	184,2	186,8	214,0	201,8	165,7	149,2	77,4	69,2
Brno, Tuřany	45,3	71,6	121,5	169,1	219,1	221,0	234,9	217,9	161,9	124,0	51,3	40,1
Praha, Ruzyně	50,0	72,4	124,7	167,6	214,0	218,6	226,7	212,3	161,0	120,8	53,6	46,7
Holešov	44,3	70,3	119,0	167,9	219,6	220,0	233,8	217,2	161,1	122,4	47,4	37,1
Hradec Králové	48,6	71,0	118,1	164,9	210,9	214,0	216,9	209,5	153,9	123,3	48,4	42,5
Olomouc	38,7	65,8	113,4	166,2	215,9	213,9	228,5	216,9	159,2	118,8	46,3	33,2
Praha, Karlův	44,6	69,2	119,0	162,8	208,3	210,8	219,6	210,4	156,4	117,3	50,1	42,5
Velké Meziříčí	36,5	62,3	115,7	162,0	208,5	214,7	229,8	213,0	155,7	115,7	44,3	34,0
Semčice	37,0	65,4	114,6	164,1	209,7	215,7	216,9	208,4	152,2	115,1	42,7	31,9
Mošnov	47,3	63,5	112,4	153,5	202,6	204,6	217,4	203,2	150,2	118,8	54,6	38,5
České Budějovice	47,0	63,3	116,3	151,1	184,6	204,8	219,1	201,8	162,3	114,1	56,8	43,1
Příbrav	39,1	61,9	112,0	156,8	201,9	205,4	215,7	205,9	153,3	119,5	43,6	37,3
Svratouch	47,8	64,8	108,6	150,0	195,7	199,7	209,6	203,3	151,0	126,8	50,5	41,1
Klatovy	43,3	66,8	110,8	149,8	197,0	205,9	218,5	204,1	152,1	111,5	50,4	38,7
Lysá hora	63,9	77,5	102,3	135,4	173,8	164,8	186,4	184,3	138,5	129,8	59,5	56,2
Doksany	31,1	57,1	107,5	152,8	199,3	201,3	203,2	195,2	140,2	92,1	36,2	28,8
Cheb	38,9	65,4	107,2	141,9	183,4	187,6	195,9	185,4	139,4	103,7	40,0	31,3
Liberec	36,0	60,3	102,0	139,1	182,5	178,8	183,4	183,6	139,9	112,0	41,3	29,2
Tábor	11,1	48,5	106,6	148,5	182,6	182,1	197,0	192,8	149,6	99,1	22,5	9,4

**Příloha č. 3 Výnos ze slunečního záření**

<b>Očekávaný solární výnos v topné sezoně a v létě</b>			
Součty slunečných hodin za rok a topnou sezonu			
<b>Lokalita</b>	<b>Celkem za rok</b>	<b>Topná sezona X. - IV.</b>	<b>"Léto" V.-IX.</b>
Kuchařovice	1792,7	699,7	1093,0
Velké Pavlovice	1776,2	669,6	1106,6
Milešovka	1703,2	667,9	1035,3
Churáňov	1691,6	739,1	952,5
Brno, Tuřany	1677,7	622,9	1054,8
Praha, Ruzyně	1668,4	635,8	1032,6
Holešov	1660,1	608,4	1051,7
Hradec Králové	1622,0	616,8	1005,2
Olomouc	1616,8	582,4	1034,4
Praha, Karlov	1611,0	605,5	1005,5
Velké Meziříčí	1592,2	570,5	1021,7
Semčice	1573,7	570,8	1002,9
Mošnov	1566,6	588,6	978,0
České Budějovice	1564,3	591,7	972,6
Přibyslav	1552,4	570,2	982,2
Svratouch	1548,9	589,6	959,3
Klatovy	1548,9	571,3	977,6
Lysá hora	1472,4	624,6	847,8
Doksany	1444,8	505,6	939,2
Cheb	1420,1	528,4	891,7
Liberec	1388,1	519,9	868,2
Tábor	1349,8	445,7	904,1
<b>Průměrný počet hodin</b>	<b>1583,7</b>	<b>596,6</b>	<b>987,1</b>
Očekávaný solární výnos [kWh] "zima" z 1 m2 panelu			
Předpokládaný využ.výkon panelu <b>400 W/m2</b>		<b>239</b>	
Očekávaný solární výnos [kWh] "léto" z 1 m2 panelu			
Předpokládaný využ.výkon panelu <b>800 W/m2</b>		<b>790</b>	