



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO
PROSTŘEDÍ**

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

**MOŽNOSTI LIKVIDACE A RECYKLACE
FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ V ČR**

ASPECTS OF THE DISPOSAL AND RECYCLING OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN CR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Papírek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Kotlík, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1466/2019 Akademický rok: 2019/20
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Student: **Bc. Jan Papírek**
Studijní program: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Josef Kotlík, CSc.**

Název diplomové práce:

Možnosti likvidace a recyklace fotovoltaických panelů v ČR

Zadání diplomové práce:

- 1) Vypracovat patentovou a literární rešerši na téma možnosti recyklace FV panelů.
- 2) Zhodnotit stávající systém sběru a recyklace ve vztahu k dané komoditě – provést materiálovou analýzu.
- 3) Provést projekci toku potenciálního množství v čase na základě dat ERÚ a terénního průzkumu.
- 4) Provést odhad technicko–ekonomických a logistických potřeb možného realizátora.

Termín odevzdání diplomové práce: 29.5.2020:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Jan Papírek
student(ka)

Ing. Josef Kotlík, CSc.
vedoucí práce

doc. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2020

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na posouzení možností likvidace fotovoltaických panelů instalovaných na území ČR. Kromě základní teorie o fotovoltaických článcích a panelech je v teoretické části popisována legislativa, dotace v oblasti fotovoltaiky a vývoj fotovoltaiky v ČR. V kapitole recyklace jsou rozebírány jejich jednotlivé metody, práce kolektivních systému, ale i dopady na životní prostředí.

V experimentální části jsou pomocí dat instalovaného výkonu a průměrných hmotností panelů provedeny různé projekce likvidace panelů v čase, které zohledňují faktory jako jsou životnost elektrárny nebo kapacita recyklační linky. Dále je provedena dle dostupné literatury analýza výnosu z prodeje recyklovaných materiálů obsažených v panelech instalovaných na našem území. Následně byly posouzeny potřeby budoucích realizátorů provedením odhadů pracovní a logistické náročnosti. Na závěr bylo provedeno ekonomické zhodnocení zásadních aspektů recyklačního procesu FRELP a byly určeny čisté ceny odlišných směrů recyklace.

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the assessment of the possibilities of disposal of photovoltaic panels installed in the Czech Republic. In addition to the basic theory of photovoltaic cells and panels, the theoretical parts describe legislation, subsidies in the field of photovoltaics and the development of photovoltaics in the Czech Republic. As part of recycling, their methods, work with the collective system, as well as the impact on the environment are analyzed.

In the experimental part, using the data of the installed capacity and the average weights of the panels, various projections of the disposal of the panels over time are made, which take into account factors such as the life of the power plant or the capacity of the recycling line. Furthermore, according to the available literature, an analysis of the revenue from the sale of recycled materials contained in panels installed in our territory is performed. Subsequently, the needs of future implementers of proven estimates of labor and logical demands were assessed. Finally, an economic evaluation of the fundamental aspects of the FRELP recycling process was performed and the net prices of different recycling directions were determined.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotovoltaika, fotovoltaická elektrárna, recyklace, likvidace, fotovoltaický panel, FRELP

KEYWORDS

photovoltaics, photovoltaic power plant, recycling, disposal, photovoltaic panel, FRELP

PAPÍREK, Jan. *Možnosti likvidace a recyklace fotovoltaických panelů v ČR*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120682>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Josef Kotlík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

..... podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Josefu Kotlíkovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce a rady při jejím zpracování. Dále bych chtěl za rady k experimentální části práce poděkovat studentce Alice Monteiro, která se zajímá o problematiku recyklace fotovoltaických panelů v Brazílii. Poděkovat bych chtěl také Ing. Josefu Barešovi, Ph.D. za umožnění nahlédnout na dosavadní zpracování elektroodpadu a fotovoltaických panelů ve firmě BAMBAS Elektroodpady s. r. o. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině za podporu ve studiu.

OBSAH

1 ÚVOD	7
2 CÍLE PRÁCE	9
3 TEORETICKÁ ČÁST	10
3.1 Historie fotovoltaiky	10
3.2 Princip fotovoltaického článku	11
3.3 Vývoj a typy fotovoltaických článků a panelů	13
3.3.1 Vývoj fotovoltaických článků	13
3.3.2 Typy fotovoltaických článků	14
3.4 Výroba fotovoltaických článků a panelů	17
3.4.1 Výroba křemíku	17
3.4.2 Výroba monokrystalických křemíkových článků	18
3.4.3 Výroba polykrystalických křemíkových článků	18
3.4.4 Výroba amorfních křemíkových článků	19
3.4.5 Výroba fotovoltaických panelů	19
3.5 Typy fotovoltaických systémů a praktických aplikací	21
3.5.1 Systémy připojené k elektrické rozvodné síti	21
3.5.2 Ostrovní systémy.....	22
3.5.3 Hybridní fotovoltaické elektrárny	23
3.5.4 Vysoce účinné fotovoltaické systémy	24
3.5.5 Agrofotovoltaika	25
3.5.6 Rozdělení FVE podle výkonu	26
3.6 Legislativa pro fotovoltaické systémy v ČR a jejich recyklaci	27
3.6.1 Energetický zákon	27
3.6.2 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC (na úrovni EU).....	27
3.6.3 Zákon o odpadech	28
3.6.4 Zákon o podporovaných zdrojích energie	29
3.6.5 Vyhláška o nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady	29
3.6.6 Zákon č. 221/2015 Sb., kterým se mění zákon č. 563/1991 Sb., o účetnictví	29
3.7 Dotace na fotovoltaické systémy v ČR.....	30
3.7.1 Historie finanční podpory FV systémů v ČR	31
3.7.2 Mechanismus výkupních cen a zelených bonusů (feed-in tariff)	31
3.7.3 Nová zelená úsporám	32

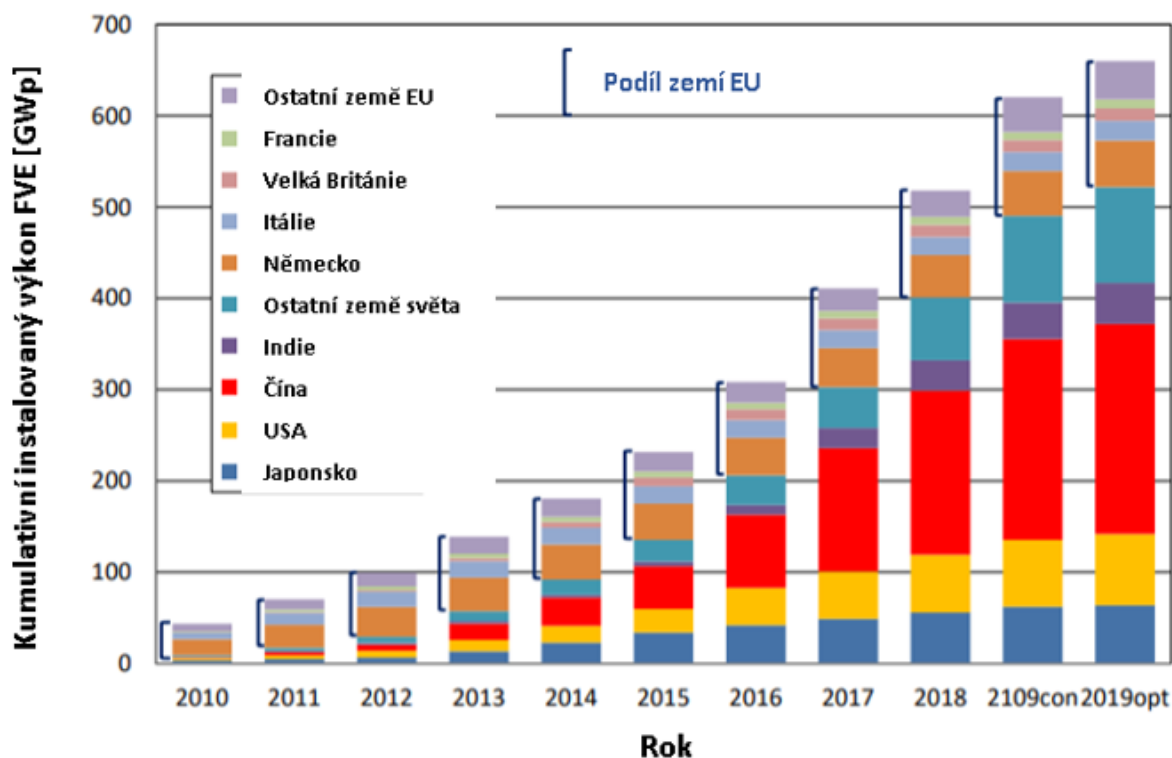
3.7.4 Dotace na fotovoltaiku pro podnikatele	33
3.8 Fotovoltaika v ČR.....	34
3.8.1 Klimatické podmínky pro FVE v ČR	34
3.8.2 První pozemní a střešní FVE u nás	35
3.8.3 Největší FVE v ČR	37
3.8.4 Budoucnost FVE v ČR.....	39
3.9 Recyklace fotovoltaických panelů	41
3.9.1 Recyklovatelné materiály	42
3.9.2 Downcycling	43
3.9.3 Upcycling	44
3.9.4 Nejběžnější metody recyklace FV panelů.....	46
3.9.5 Dopady na životní prostředí	48
3.9.6 Systém současného sběru v ČR.....	49
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	51
4.1 Projekce toku množství fotovoltaických panelů určených k recyklaci v čase	51
4.2 Materiálová analýza.....	60
4.3 Odhad potřeb realizátora.....	63
4.3.1 Lidské zdroje.....	63
4.3.2 Logistické potřeby a potřeby na transport.....	64
4.3.3 Procesní potřeby	65
4.4 Socio-ekonomické zhodnocení FRELP procesu.....	66
5 DISKUSE.....	70
6 ZÁVĚR	73
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	81

1 ÚVOD

Fotovoltaika je dnes třetí nejpoužívanější obnovitelný zdroj energie po vodní a větrné energii. Je to nejvyspělejší technologie pro výrobu obnovitelné energie a zároveň je šetrná k životnímu prostředí. K této šetrnosti například přispívá fakt, že jde o zdroj energie s nízkými emisemi uhlíku, které způsobují globální oteplování. Fotovoltaické technologie použité nejprve ve vesmíru, lze nyní použít všude, kde je potřeba elektřiny. Tato bezpečná a neznečišťující technologie má potenciál stát se ještě v tomto století hlavním globálním zdrojem elektřiny. Předpokládá se, že do konce roku 2022 může globální instalovaný výkon dosáhnout až 1270,5 GW a do roku 2050 se odhaduje jeho rozšíření až na 4500 GW. [1]

Globální instalovaný výkon fotovoltaických elektráren na konci roku 2018 činil 520 GW, z toho na území ČR jsou 2 GW. V roce 2018 přilákala fotovoltaika po celém světě investice ve výši 122 miliard eur (42,5 % ze všech investic do OZE) a kapacita výkonu všech FVE vzrostla o 107 GW. Zároveň v tomto roce pokračoval již čtvrtý rok trend, rozvojové ekonomiky investovaly více do výkonu OZE než rozvinuté. Ke konci roku 2019 bylo očekáváno dosažení výkonu 650 GW a schopnost produkovat z FVE asi 4 % celosvětové elektřiny.

Scénáře o 100 % z OZE, jenž mají za cíl dekarbonizovat energetický sektor, zdůrazňují důležitost fotovoltaického odvětví. Tyto scénáře považují za nutné vybudovat FVE s instalovanou kapacitou více než 4 TW do roku 2025 a až 21,9 TW do roku 2050. [2]

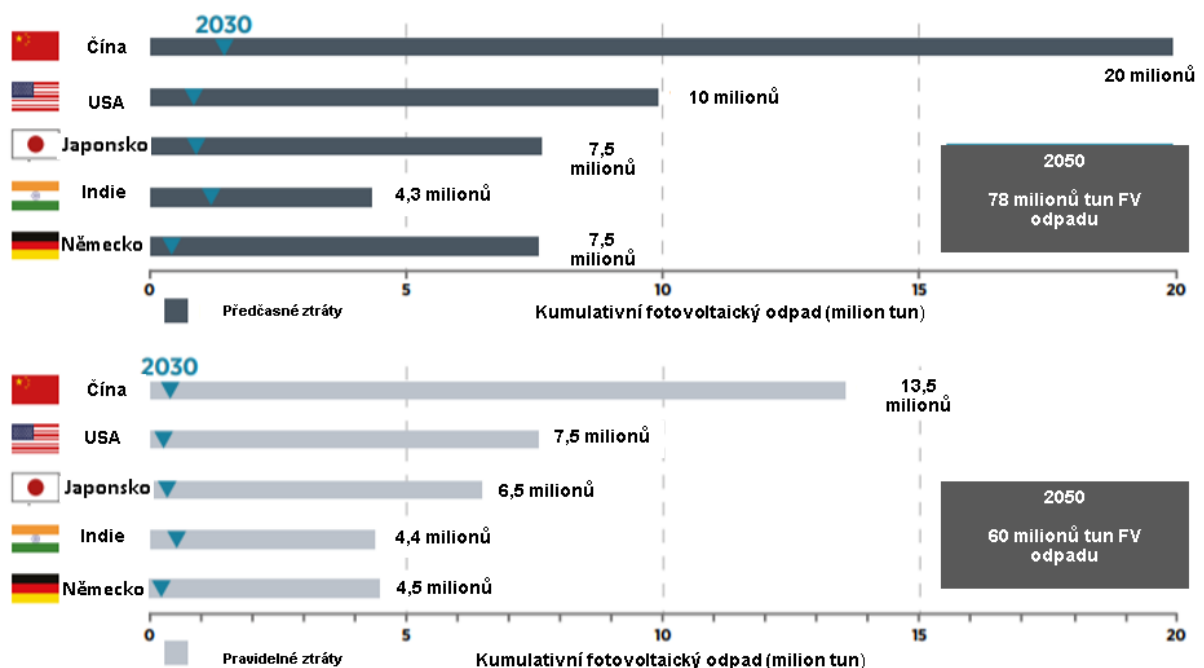


Obrázek 1.1: Graf vývoje globálního instalovaného výkonu s podílem jednotlivých zemí [2]

Do roku 2006 byli hlavními výrobci solárních článků Japonsko a Evropa. Po roce 2006 však nastal nárůst výroby v Číně a na Taiwanu, v roce 2014 se k trendu zvyšování výrobních kapacit přidali i další Asijské země jako Indie, Malajsie, Thajsko, Filipíny nebo Vietnam.

Během posledních desetiletí se zvýšilo využívání fotovoltaiky k produkci elektřiny po celém světě. Stalo se tak díky neustále se snižujícím cenám fotovoltaických panelů a zároveň díky dotacím a výhodným tarifům na prodej elektřiny vyrobené z fotovoltaických elektráren. S nárůstem počtu instalací fotovoltaických elektráren se také začala řešit otázka jejich budoucí recyklace. Solární panely se totiž po konci jejich životnosti (25 a více let) stanou formou odpadu, který je nebezpečný a může poškodit životní prostředí. Většina instalací u nás vznikla v roce 2010, který je u nás také nazýván rokem solárního boomeru. Znamená to tedy, že někdy okolo roku 2040 budou tyto fotovoltaické panely považovány za vysloužilé a bude je potřeba ekologicky likvidovat.

Fotovoltaické panely se řadí mezi elektroodpad, jehož kumulativní hmotnost činila za rok 2015 41,8 milionu tun. Dle studií IRENA z roku 2016 kumulativní fotovoltaický odpad z panelů dosáhne v roce 2030 hmotnosti 1,7-8 milionu tun a v roce 2050 60-78 milionu tun na základě různých scénářů. Země, které budou produkovat nejvíce fotovoltaického odpadu budou Čína, USA, Japonsko, Německo a Indie. [3]



Obrázek 1.2: Grafické znázornění kumulativního fotovoltaického odpadu v pěti zemích s jeho největším množstvím [3]

Z fotovoltaického odpadu lze zpětně získat materiály jako sklo, hliník, křemík, stříbro, měď a další kovy (Zn, Ni, Sn, Pb, Cd, Ga, In, Se, Te). Všechny tyto materiály lze s dobrou účinností recyklovat a znovu využít např. na výrobu nových panelů. První recyklační linka v Evropě výhradně na fotovoltaické panely vznikla v roce 2018 ve Francii. Firma Veolia a nezisková společnost PV Cycle otevřeli tuto linku v městě Rousset, která už první rok svého provozu má zpracovat asi 1 800 tun vysloužilých panelů. Cílem linky je však zvýšit efektivitu na 4 000 tun a zvýšit účinnost recyklace všech materiálů na 95 %. [4]

2 CÍLE PRÁCE

Práce je zaměřena na vypracování patentové a literární rešerše na téma možnosti likvidace fotovoltaických elektráren. Má za cíl zhodnotit fotovoltaické panely z materiálového hlediska a stávající systém jejich sběru na území České republiky.

V experimentální části je potřeba provést projekci toku množství panelů likvidovaných v budoucnu dle dat ERÚ. Dalším záměrem práce je odhadnout hodnotu materiálů obsažených v panelech, které je možno recyklovat. Na závěr má být na základě dostupné literatury a dat provedeno socio-ekonomické zhodnocení budoucích vykonavatelů celého procesu likvidace.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Historie fotovoltaiky

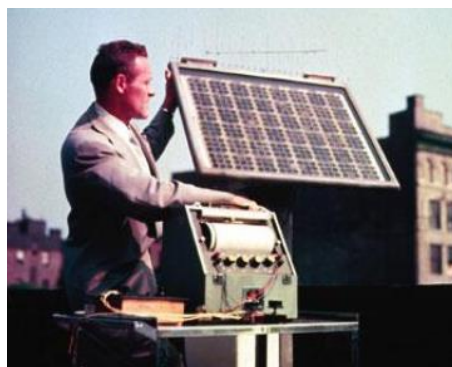
Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 francouzským fyzikem Alexandrem Edmondem Becquerelem. Ten zjistil přírůstek elektrického napětí při manipulaci s elektrochemickými bateriemi se zinkovými a platinovými elektrodami, poté co je vystavil světlu. V roce 1873 objevil Willoughby Smith fotokonduktivitu u selenu a o necelých 30 let později byl fotovoltaický jev u něj prokázán, což vedlo i ke konstrukci prvního selenového článku Američanem Charlesem Fritzem v roce 1883. [5,6]

Ve své práci z roku 1905 popsal Albert Einstein fyzikální princip fotoelektrického jevu tzv. fotoefektu a v roce 1921 za to byl odměněn Nobelovou cenou za fyziku. Einsteinovy teorie experimentálně potvrdil ve svém článku z roku 1916 Robert Andrews Milikan, který za výzkum elementárního elektrického náboje a fotoelektrického jevu dostal Nobelovu cenu v roce 1923. [5]

V roce 1940 Russel Shoemaker Ohl vyrobil PN přechod na křemíku a po zjištění, že při osvětlení vyrábí proud, si objev nechal patentovat. Křemík se od 50. let stal hlavním polovodičovým materiálem a v roce 1954 byl v amerických Bellových laboratořích vyroben první fotovoltaický článek použitelný k výrobě elektřiny. Jednalo se o článek z monokrystalického křemíku a jeho účinnost byla kolem 6 %. [5,7]

Od 60. let se začaly fotovoltaické články používat na kosmických družicích a k napájení spotřebičů jsou zde používány dodnes. Prvním využitím ve vesmíru byl satelit Vanguard I, který používal články o výkonu menším jak jeden watt k napájení jeho rádií. V průběhu let byla vyvinuta řada nových typů fotovoltaických článků, a to jak krystalických, tak i tenkovrstvých. Křemík však vždy byl a stále je hlavním materiálem ve fotovoltaice. V pozemských podmínkách se nejprve fotovoltaické články začaly používat k napájení spotřebičů v odlehlých lokalitách nebo na bójích, které bylo extrémně náročné připojit k elektrizační soustavě. [5,6]

Od 70. let začal díky ropné krizi intenzivní rozvoj a výzkum fotovoltaiky, stejně jako u jiných obnovitelných zdrojů energie. V důsledku rozvoje roste účinnost, klesá cena a zvyšuje se životnost fotovoltaických panelů. Skutečného rozšíření se fotovoltaika dočkala v 21. století se zavedením různých dotačních programů poprvé v Japonsku, následovaném Německem a řadou dalších zemí. [5]



Obrázek 3.1: Testování solární baterie v Bellových laboratořích v roce 1954 [7]

3.2 Princip fotovoltaického článku

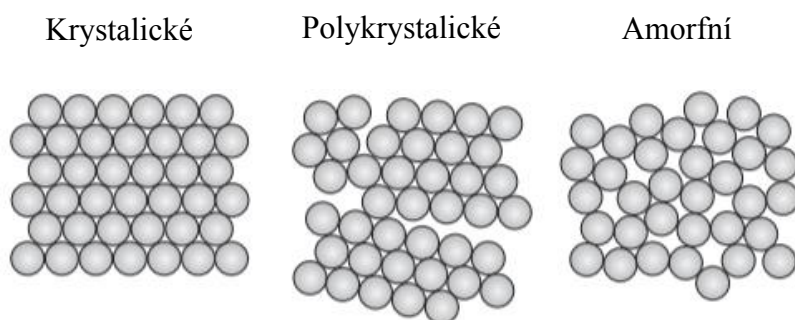
Z hlediska vedení elektrického proudu se látky dělí do tří skupin:

- Vodiče – ty mají ve své struktuře volné elektrické náboje, které zprostředkují vedení proudu. Kovy mají obrovské množství takových volných elektronů a jsou nejběžnějšími vodiči.
- Nevodiče (izolanty) – neobsahují žádné volné náboje a nevedou tak elektrický proud. Typickými izolanty jsou např. plasty nebo sklo.
- Polovodiče – látky, které se za určitých podmínek chovají jako nevodivé (izolanty), ale při změně těchto podmínek se mohou chovat jako vodiče a může jimi procházet elektrický proud. Jsou to látky jejichž elektrická vodivost leží na pomezí vodivosti kovu a dielektrika

Nejběžnějším polovodičem je křemík (Si) a germanium (Ge). Až do 40. let minulého století neměly polovodiče širšího využití, to se změnilo během druhé světové války s objevem radaru a konstrukcí prvního tranzistoru v roce 1947. Dnes patří polovodičové součástky (diody, tranzistory, integrované obvody nebo mikroprocesory) k základním stavebním prvkům všech elektronických přístrojů a zařízení. Polovodiče mají společné charakteristické vlastnosti, které ovlivňují jejich použití. Jednou z nich je i atomová struktura. [8]

Existují tři odlišné atomové uspořádání pro všechny materiály:

1. Krystalické – atomy jsou dokonale uspořádány v trojrozměrném poli
2. Polykrystalické – materiál je složen z krystalografických zrn, v nichž jsou částice uspořádány pravidelně, poloha zrn je však náhodná
3. Amorfní – atomy materiálu jsou uspořádány náhodně [9]



Obrázek 3.2: Tři možná atomová uspořádání pro polovodiče

Nejčastěji používaným polovodičovým materiálem ve fotovoltaice je křemík (Si). V menším měřítku, avšak na speciální typy aplikací se využívá spojovacích polovodičů jako jsou arsenid gallitý (GaAs), tellurid kademnatý (CdTe) nebo selenid mědi a india (CuInSe₂). Existují i polovodiče z organických materiálů. [10]

Ve fotovoltaickém článku probíhá přeměna světla na elektrickou energii nehlukně, bez emisí a spotřeby látek v solárně aktivních materiálech. V krystalických fotovoltaických článcích vzniká pravidelná krystalická mřížka, kde vazby tvoří vnější elektrony atomů křemíku. Tyto elektrony dávají vznik elektrickému proudu. [11]

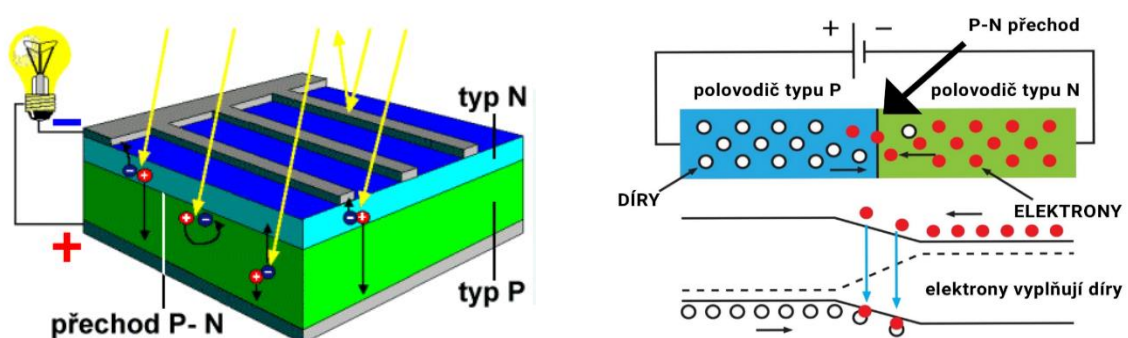
Většina fotovoltaických článků je tvořena pomocí polovodičového P-N spojení. V článku spolu hraničí kladně dotovaná (P) a záporně dotovaná (N) oblast, což jsou dvě rozdílně vodivé polovodičové oblasti. Po osvětlení fotovoltaického článku v něm vzniká fotoelektrický jev a z krystalové mřížky polovodiče se začnou uvolňovat elektrony.

Mezi oblastmi P a N vzniká vnitřní elektrické pole, které je vytvořeno difuzí nadbytečných elektronů z N oblasti do P oblasti v prostoru P-N přechodu. Vzniká oblast s malým počtem volných nosičů náboje, tzv. vrstva prostorového náboje. V oblasti N vrstvy zbyvají kladné, v oblasti P vrstvy záporně nabitě atomy dotujícího prvku. Tím vzniká elektrické pole, které je orientováno proti směru pohybu nosičů náboje, takže difúze elektronů nemůže pokračovat donekonečna. [12]

Polovodič typu P je tenká křemíková destička a na ní se při výrobě vytváří vrstva polovodiče typu N. V těchto vrstvách mají polovodiče ve svých krystalových mřížkách nepatrné množství vhodné příměsi, které určují, jestli bude elektrický proud veden volnými elektrony (elektronová vodivost, vodivost typu N) nebo „děrami“ (děrová vodivost, vodivost typu P).

Vodivost typu N vzniká nahrazením některých atomů v krystalové mřížce křemíku pětimocnými atomy (např. fosfor nebo arsen). Již při nízkých teplotách se uvolňují páte elektrony těchto atomů, které už se nemůžou uplatnit při tvorbě chemických vazeb. Právě tyto elektrony způsobí po připojení ke zdroji elektronovou vodivost.

Zabudováním trojmocných prvků (např. india) do krystalové mřížky křemíku dojde k vzniku tzv. díry s kladným nábojem. Jelikož chybí elektrony pro obsazení všech vazeb, tak tato díra vzniká v místě nenasycené vazby. Díru lze zaplnit elektronem z jiné vazby, přičemž díra se přesouvá na místo elektronu. Po připojení zdroje vzniká vodivost typu P (děrová vodivost). [13]



Obrázek 3.3: Schéma FV článku a znázornění jeho funkce [12]

3.3 Vývoj a typy fotovoltaických článků a panelů

3.3.1 Vývoj fotovoltaických článků

První generace

Jedná se o články z krystalického křemíku s relativně vysokou účinností, ale i cenou. Některé z těchto článků dosahují při průměrné úrovni slunečního záření až 75% účinnosti z možného maxima. Jedinou nevýhodou tohoto typu článků jsou nároky na polovodičové materiály. Kdyby došlo k masovému rozšíření fotovoltaiky polovodiče jako germanium nebo gallium by se mohly stát nedostatkovými. Křemík by byl problematický pouze z hlediska nároků energie na jeho výrobu, jelikož je druhým nejrozšířenějším prvkem v půdě. První generace FV článků je pořád nejvyužívanější technologií, a to zejména pro instalace větších solárních elektráren. [14]

Druhá generace

Druhá generace článků je reakcí na nevýhody první generace. Do kategorie druhé generace lze zařadit většinu typů tenkovrstvých článků jako jsou CdTe, CI(G)S nebo články z amorfního křemíku. Spotřeba polovodičů je sice podstatně nižší než u krystalických článků, avšak některé materiály (např. indium, tellur) se mohou stát v případě většího objemu produkce nedostatkovými. Tato generace je charakterizována snahou snížit množství křemíku v FV článku a tím zlevnit i výrobu. Hlavní nevýhodou článků druhé generace je nižší účinnost a s ní spojená kratší doba životnosti, tato nevýhoda je však kompenzována obvykle nižší cenou na jednotku výkonu. Články druhé generace nachází využití v aplikacích, kde je potřeba pružnost a ohebnost. Např. na ploché střechy jsou lepeny nepropustné fotovoltaické fólie, které zároveň vyrábí elektřinu. [14,15]

Třetí generace

Cílem této generace článků je dosáhnout vysoce účinných zařízení s využitím depozičních metod z druhé generace. Tento cíl spočívá ve snaze o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů, generovaných párů elektron-díra a využití energie dopadajícího fotonu. [16]

FV články třetí generace jsou systémy, které k separaci nábojů nepoužívají metodu P-N přechodu, ale jiné metody, zároveň používají i jiné materiály než polovodiče. Jsou jimi například fotoelektrochemické (fotogalvanické) články, polymerní články skládající se z polymeru s konjugovanými dvojnými vazbami a molekul fullerenu. Uplatňují se také nanostruktury v podobě uhlíkových nanotrubiček. [15]

Za nejpokročilejší lze z kategorie třetí generace považovat vícevrstvé a koncentrátorové články. Vícevrstvé články jsou dvojvrstvé (tandemy) nebo trojvrstvé, z nichž každá substruktura absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tím energetická využitelnost fotonů. Komerčně dostupné jsou tenkovrstvé křemíkové tandemové články, kde jednu vrstvu tvoří amorfni křemík a mikrokrytalický křemík vrstvu druhou (a-Si/ μ c-Si). Při tandemovém využití má amorfni křemík vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra. Mikrokrytalický křemík dobře absorbuje v červené oblasti a dle zvoleného poměru lze upravit jeho optické vlastnosti mísením s germaniem. [14,16]

Čtvrtá generace

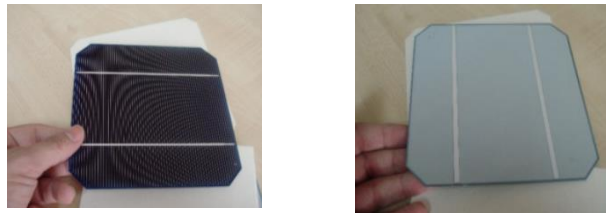
Technologie článků čtvrté generace se označuje také jako technologie solárních článků 4G. Jsou to kompozitní články z více vrstev, které jsou schopny efektivně využívat velkou část slunečního spektra. Každá vrstva dokáže využívat určitou vlnovou délku, přičemž záření, které nevyužije propustí do hlubších vrstev, kde využito je. Články využívají kombinaci anorganických a organických materiálů ke zvýšení účinnosti a nákladové efektivity. U 4G článků se běžně používá jako substrát ITO sklo (cínem dopovaný oxid indium), avšak novější alternativy využívají materiálů jako grafen nebo kovových nanomateriálů. [15,17]

3.3.2 Typy fotovoltaických článků

Monokrystalické křemíkové články

Základními a nejstaršími fotovoltaickými články jsou články z monokrystalického křemíku, vyráběného z ingotů (tyčí) polykrystalického křemíku Czochralského metodou (tažení monokrystalu z kelímku).

Podle toho, kolik krystalu je odříznuto vznikají buď kulaté, pseudočtvercové nebo čtvercové články. Při výrobě kulatých článků vzniká méně odřezků, jsou tedy levnější než čtvercové nebo pseudočtvercové články, avšak při standardních instalacích nenalézají využití. Články jsou řezány v různých rozměrech 10 x 10 cm; 12,5 x 12,5 cm nebo 15 x 15 cm s tloušťkou 0,14 až 0,3 mm. [18]



Obrázek 3.4: Přední a zadní strana monokrystalického křemíkového článku [4]

Polykrystalické křemíkové články

Tento typ fotovoltaických článků je nyní nejběžnější. Vyrábí se odléváním čistého ingotu do vhodných forem a poté řezáním ingotu na tenké plátky. Odlévání je jednodušší metoda než tažení monokrystalu a bloky lze formovat do čtverců nebo obdélníků. Dalšími výhodami je levnější výchozí surovina a možnost vyrábět ve větších rozměrech. Účinnost komerčně dostupných článků se pohybuje mezi 13-17,1 % a jsou vyráběny v různých velikostech od 10x10 cm až 21 x 21 cm s tloušťkou 0,16 až 0,24 mm. Díky rozdílnému odrazu světla se dají jednotlivé krystaly na povrchu dobře poznat (struktura ledových květů). [15,18]

V budoucnu se počítá s využitím ještě tenčích článků. Podle dnešního stavu techniky by hranice mohla být 0,1 mm, protože multikrystalické plátky jsou se snižující se tloušťkou na pomezí zrna stále méně stabilní. Některé firmy se pokoušely zavést i polykrystalické články s délkou hrany 21 cm. S většími články by došlo ke snížení nákladů na jejich výrobu, protože by bylo zapotřebí méně článků na panel. Ovšem výrobci panelů by museli těmto panelům přizpůsobit své výrobní linky, vyvinout nové přemostovací diody a přípojovací krabice. Proto se zatím větší rozměry článků neprosadily.[18]



Obrázek 3.5: Polykrystalický křemíkový článek [22]

Amorfni křemíkové články

Amorfni křemíkové články jsou klasickou tenkovrstvou technikou a první komerčně úspěšnou technologií tenkovrstvých solárních článků vůbec. První funkční amorfni články byly vyrobeny v roce 1974 a o něco později začaly být využívány v malé spotřební elektronice jako např. kalkulačky, hodinky nebo malé kapesní svítilny. [19]

Výhodou těchto článků je menší spotřeba materiálu na jejich výrobu a díky tomu levnější náklady na jejich velkovýrobu. Na výrobu jednoho amorfniho křemíkového článku je zapotřebí až 1000x méně materiálu než na výrobu článku z krystalického křemíku. Výroba probíhá rozkladem vhodných sloučenin jako jsou disilan nebo dichlorsilan ve vodíkové atmosféře. Připravují se tak tenké vrstvy amorfniho křemíku na skleněné, nerezové nebo plastové podložky. Takto nanesený amorfni křemík nemá pravidelnou strukturu a obsahuje určité množství vodíku. [15,18,19]

Díky větší absorpci slunečního záření mohou být vrstvy velmi tenké, lze tak připravovat velmi tenké a ohebné fólie, které nacházejí využití na střeších nepravidelného tvaru nebo na oblečení. Amorfni křemík je však materiál, který má oproti monokrystalickému křemíku větší množství poruch. Některé z atomů křemíku nemají kolem sebe atomy, se kterými by mohli vytvořit vazbu (tzv. „visící“ vazby). Dochází zde k rekombinaci nábojů, tím ke snížení proudu a účinnosti. Někdy tyto vazby může zaujmout vodík (vodíková pasivace).

V prvních 6 až 12 měsících výkon článku klesá díky stárnutí indukovaným světlem (degradace světlem nebo efekt Staebler-Wronski) o 20-30 % a poté se stabilizuje na jmenovitý výkon. Účinnost sériově vyráběných modulů se pohybuje mezi 5-7 %. Ke zvýšení účinnosti se používají při výrobě polovodičů technologie na bázi legování (např. germaniem nebo uhlíkem). Dalším způsobem, jak zvýšit účinnost je skládat přes sebe více vrstev (tandemové FV články), s tím že každá z nich je optimalizována pro jiný rozsah slunečního spektra. [15,18,19]

CdTe články

Technologie CdTe článků je technologie požadující vůbec nejnižší výrobní náklady ze všech tenkovrstvých modulů. V roce 2000 začala jako první sériově tyto moduly vyrábět americká firma First Solar a po rozšíření výroby v USA, Německu a Malajsii se stala vůdcem trhu. Moduly s teluritanem kadmnatým mají homogenní strukturu, typicky tmavě zelenou až černou barvu a nosný materiál pro vrstvy zde tvoří sklo s tloušťkou 3 mm. Tento materiál má také téměř ideální vzdálenost (1,44 eV) valenčního a vodivostního pásu a velkou absorptivitu

pro sluneční záření. Účinnost těchto modulů je mezi 7-13,5 %. V roce 2011 byla zaznamenána rekordní účinnost CdTe článku 17,3 %. [15,18,19]

Hodně diskutabilní je, zda trh bude akceptovat moduly s těžkým kovem kadmium. Kadmium vzniká jako odpad při těžbě zinku, může tak docházet ihned k dalšímu zpracování na CdTe. Teluričitan kademnatý je sám o sobě nejedovatý a k jeho rozkladu dochází až při teplotě 1000 °C.

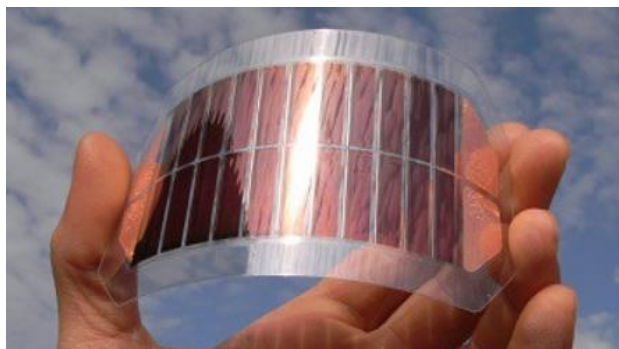
CIS/CIGS články

CIS články neboli články s diselenidem mědi a india (CuInSe_2) se vyznačují vysokou absorptivitou slunečního záření, mohou tak být velmi tenké. Až 99 % slunečního záření je absorbováno už v prvním mikrometru tloušťky. [15]

Ze všech tenkovrstvých modulů se moduly s články CIS vykazují nejlepší účinností. V laboratorních podmínkách bylo s některými malými CIS články dosaženo až 20% účinnosti. Při nanášení vrstev na větší plochu je však účinnost menší, proto mají sériově vyráběné moduly účinnost 7-14,5 %. Moduly se vyrábí v rozměru cca 1,20 x 0,60, mají homogenní strukturu a různé barvy. Nosným materiálem je sklo, kovové či plastové fólie o tloušťce 2-4 mm. Tloušťka povrstvení je 3-4 μm , z toho vrstva CIS 1-2 μm . Výrobce CIS modulů lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou výrobci uplatňující nanášení článků na velkou skleněnou plochu a druhou pak ti, kteří nanášejí články v malých částech na kovové fólie, které pak propojují. [18]

Organické články

Za poslední dvě desetiletí byly vyvíjeny organické články nejen ve snaze zlepšit jejich účinnost přeměny energie, ale i ve snaze organické články komercializovat. Tento typ článků je vyroben z tenkých filmů (menších než 100 nm) organických polovodičových materiálů. Materiály na bázi uhlíkaté nanostruktury jako fullereny nebo grafen mají slibné aplikace díky dobrým elektronickým, optickým, mechanickým a tepelným vlastnostem. Organické solární články jsou založeny na procesu fotosyntézy stejně jako rostliny. Absorpce světla se totiž u těchto článků provádí barvivem, které tak nahrazuje křemík. Světlo způsobí excitaci molekul barviva a uvolní se elektrony, které jsou přeměněny na elektrickou energii. Díky barvivu se někdy nazývají barvivem senzitivované články. K absorpci světla dochází v porézním filmu oxidu titaničitého (TiO_2) s organickým barvivem, poté je vzniklý elektron veden pomocí TiO_2 a uvolněnými ionty v elektrolytu. [20]

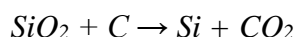


Obrázek 3.6: Organický FV článek [21]

3.4 Výroba fotovoltaických článků a panelů

3.4.1 Výroba křemíku

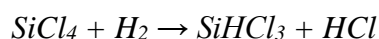
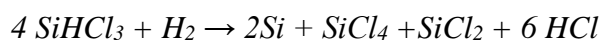
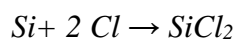
Křemík se vyrábí v obloukové peci z písku redukcí uhlíkem a dochází zde k celé řadě chemických reakcí. Kdybychom započítali jen výchozí a konečné produkty, lze zjednodušeně výrobu vyjádřit rovnicí:



Surový křemík odlévaný takto v pravidelných intervalech má čistotu až 99 %, zbytek tvoří nečistoty s příměsemi železa, hliníku a uhlíku. K použití v polovodičové výrobě je však zapotřebí ještě větší čistoty křemíku, proto je zapotřebí jej ještě přečistit. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat čistoty tzv. ppb (řádově 10^{-9}), pro výrobu fotovoltaických článků běžně postačí čistota tzv. ppm (řádově 10^{-6}). [22]

Nejpoužívanější technologií čištění křemíku je technologie Siemens s chlorovým cyklem. Nejdříve se převede křemík na trichlórsilan, ze kterého se po destilaci vyredukuje čistý křemík. Tato technologie je náročná na spotřebu energie a na ochranu bezpečnosti personálu a životního prostředí. [22]

Tento výrobní proces se dá vyjádřit rovnicemi:



Obrázek 3.7: Výroba křemíku v Číně [22]

3.4.2 Výroba monokrystalických křemíkových článků

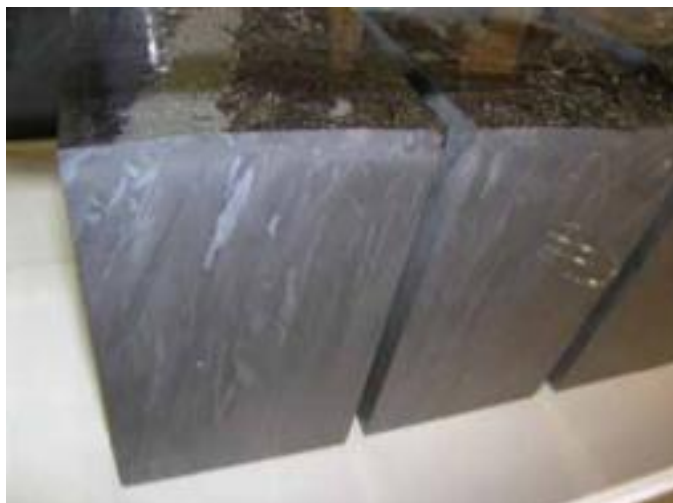
Pro výrobu monokrystalických křemíkových článků se používá Czochralského metoda, tj. tažení monokrystalu z taveniny čistého křemíku. Polykrystalický křemík je roztaven asi při 1420 °C v křemenném kelímku, poté se zárodečný krystal ponoří do taveniny a za pomalého otáčení je vytahován směrem nahoru. Krystal při tažení narůstá až na průměr 30 cm a délku několik metrů. [15,18]

Ingoty se rozřezou na čtvercové/pseudočtvercové tyče, které jsou pak řezány speciální drátovou pilou na plátky (wafery) o tloušťce 0,1-0,25 mm. Tato pila je tvořena několika paralelně napnutými dráty, které za pomoci vhodného abraziva řezou najednou několik ingotů. Při řezání se ztrácí křemík jako odpad, který musí být znovu roztaven. S poklesem tloušťky destiček současně ubývá i tohoto odpadu. Následně jsou plátky chemicky očištěny a podrobeny leptací lázni, která odstraní nečistoty a nepravidelnosti. [16, 18]

Surové plátky jsou již dotovány příměsí typu P (borem), na nich je poté vytvořena tenká vrstva dotovaná příměsí typu N difúzí fosforu. V difúzní peci se rozptyluje fosforový plyn o teplotě 800-900 °C a horní strana je předotována, vzniká tak P-N přechod FV článku. Na závěr je nanášena antireflexní vrstva a na přední a zadní stranu jsou sítotiskem natisknuty sběrné kontakty pro odběr proudu. [18]

3.4.3 Výroba polykrystalických křemíkových článků

Polykrystalický křemík je roztaven v křemenném kelímku, dotován borem a poté odlit do kvádrové formy. Tyto formy jsou kontrolovaně zahřívány a ochlazovány, čímž vychladne litý blok v jednom směru. Tak vzniká mnoho homogenních a velkých křemíkových krystalů o různých velikostech (milimetry až centimetry). Lité křemíkové bloky jsou pásovou pilou řezány na tyče a poté drátovými pilami na plátky o tloušťce cca 0,2 mm. Následuje očištění, po dotaci fosforem nanášení antireflexní vrstvy, natisknutí kontaktů a oleptání hran. [15,18]



Obrázek 3.8: Polykrystalický ingot křemíku [22]

3.4.4 Výroba amorfních křemíkových článků

Amorfni křemík má nepravidelnou strukturu s otevřenými vazbami, na které se díky nasycení váže vodík. Takto hydrogenizovaný amorfni křemík (a-Si:H) je vyráběn odloučením plynného skupenství z plynného silanu v plazmovém reaktoru. Přiváděním vysokofrekvenčního napětí na reaktor vzniká plazma a teploty při odlučování se drží mezi 200 až 250 °C. Vhodnými dotačními látkami jako B₂H₆ nebo PH₃ se provede dotace. U dotovaného amorfniho křemíku není kvůli krátké difúzní délce výroba elektřiny možná. Mezi P a N vrstvu se proto vkládá nedotovaná „i“ vrstva, v níž je životnost nosiče výrazně vyšší. V této vrstvě dochází k absorpci slunečního světla a vytváření náboje, zatímco ve vrstvách dotovaných příměsí typu P a N se vytváří elektrické pole oddělující volné nosiče náboje. Tato struktura se tak nazývá pin struktura. Na TCO čelní kontakty bývají používány oxid zinečnatý dotovaný hliníkem (ZnO:Al), oxid cínčitý (SnO₂) nebo oxid india (ITO). Spodní TCO kontakty (nejčastěji ZnO) působí jako reflektor společně se zadním kovovým kontaktem. [15,18]

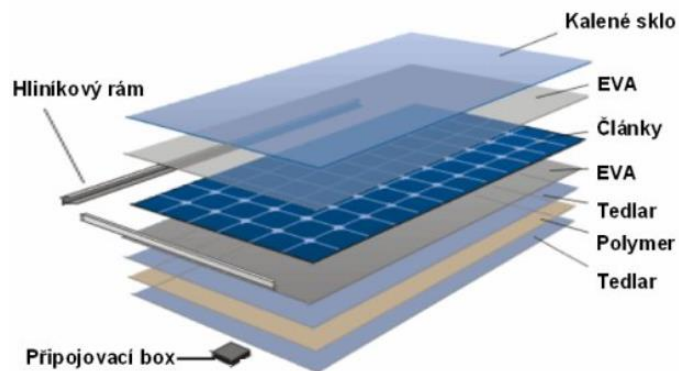
3.4.5 Výroba fotovoltaických panelů

Výroba FV panelů začíná tzv. řetězením fotovoltaických článků, které se zapojují v sérioparalelní kombinaci. Za tím účelem se čelní kontakty jednoho článku připájí s kontakty na zadní straně článku druhého, tím dojde ke spojení záporného pólu (přední strana) a kladného pólu (zadní strana) a vznikne tak sériové spojení. K řetězení se ve velkovýrobě používají tzv. řetězové automaty, jen u některých speciálních modulů se články pájí ručně. Ve standardních FV panelech je spojeno dohromady mezi 36 až 72 články, většinou jde o 9 až 12 článků ve 4 až 6 goniometrických řadách. Jsou ale i panely s dvěma nebo třemi řadami, přičemž v každé je 18 až 20 článků. [18]

Spojování tenkovrstvých článků je již integrováno v jejich výrobě a probíhá v každé vrstvě zvlášť, přičemž články jsou řezány na 0,5 až 2 cm široké proužky laserem nebo mechanicky. U panelů CdTe se články řezou na čelním skle. Mezi sklem a články je TCO vrstva, která je čelním kontaktem. Nakonec je nanášena kovová vrstva (zadní kontakt) a vytvořena struktura k elektrickému spojení předního a zadního kontaktu, tak aby jednotlivé proužky byly sériově propojena. Články CIS jsou odřezávány v opačném pořadí na skle s vrstvou molybdenu, který slouží jako zadní kontakt (přední kontakt je TCO vrstva). [18]

Řetězce článků se zapouzdřují do průhledného spojovacího materiálu, který zároveň slouží jako elektrická izolace, ochrana vůči mechanickému namáhání a vlhkosti. Takový spojovací systém je nanášen na nosný materiál (substrát), kterým je většinou sklo. Nosným materiálem však může být i kov nebo plastová fólie. Články však mohou také být za nebo mezi nosnými materiály. Důležité je, aby pokrytí článků na světlocitlivé straně bylo dobře propustné pro sluneční záření. Kvůli tomu se na přední straně používá bílého skla s nízkým obsahem oxidu, které propustí až 96 % sluneční energie. [18]

U tenkovrstvých panelů se používá tzv. floatované sklo, zatímco u krystalických panelů sklo válcované neboli lité. Při výrobě tenkovrstvého panelu se sklo leptá a pokrývá se na zadní straně kontakty TCO nebo molybdenovými. Sklo na krystalické panely se roztavené vede mezi válci, přičemž získá svou strukturu. Tloušťka těchto solárních skel je většinou mezi 3 až 6 mm, jen při speciálních požadavcích a u panelů větších rozměrů se používá sklo tlusté 10 mm. [18]



Obrázek 3.9: Složení materiálů krystalického panelu [23]

Fotovoltaické články se zapouzdřují nejčastěji do EVA (ethylen-vinyl-acetát), v současné době jde o více než 95 % panelů na trhu. Zapouzdření se provádí pomocí vakuových laminátorů tak, že se články vloží mezi dvě fólie EVA s předním sklem a zadní fólií a uloží se do vakuové komory. Ve vakuové komoře na ně střídavě působí podtlak a přetlak při teplotách kolem 150 °C. EVA se tak roztaví, články zapouzdří a vytvoří laminát. Dalšími materiály, do kterých je možno FV články zapouzdřit jsou např. polyvinylbutyral (PVB), polytetrafluorethylen (PTFE), odlévací pryskyřice (TPU, akrylát) nebo termoplastický silikon (TPSE). [18,22]

Otvorem na zadní straně panelu se vyvádí elektrické vedení pojící články. Na takové místo se pak instaluje přípojovací krabice, ve které jsou umístěny kontakty přípojovacího kabelu k panelu a bočnickové diody. V některých případech se přípojovací krabice zalévají silikonem, což má však nevýhodu, že nelze případně vyměnit poškozené diody. [18]

Většina panelů má po obvodu rámy z hliníku. Tyto rámy slouží jako ochrana skla a zároveň slouží k jejich upevnění na konstrukci. Mezi předním sklem se nachází silikonové nebo gumové těsnění. Některé tenkovrstvé panely rám vůbec nemají a mají po obvodu pouze těsnění. [18]



Obrázek 3.10: Výroba fotovoltaických panelů v Jiaxingu, v Číně [22]

3.5 Typy fotovoltaických systémů a praktických aplikací

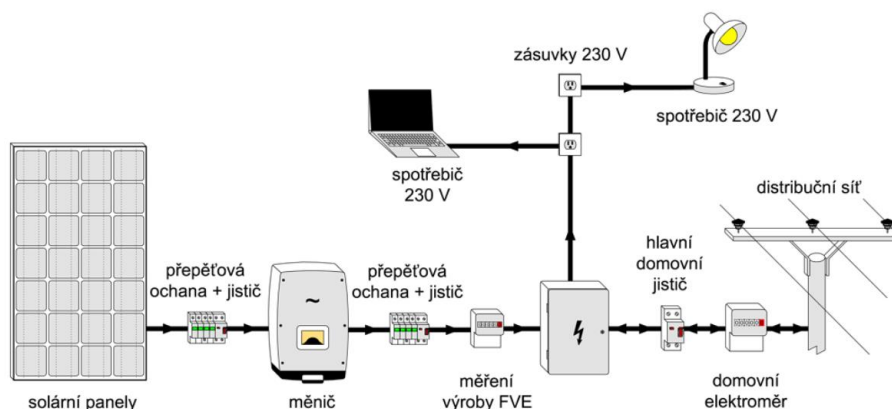
Fotovoltaické systémy lze rozdělit do dvou hlavních skupin na systémy připojené k elektrické rozvodné síti a ostrovní systémy. Další možností jsou hybridní systémy, což jsou kombinace fotovoltaického systému a dalšího zdroje elektrické energie.

3.5.1 Systémy připojené k elektrické rozvodné síti

Tento druh zapojení řeší zásadní problém fotovoltaických systémů a to, jak zajistit, aby všechna vyrobená elektřina byla využita. Většina instalací ve světě je připojena k rozvodné síti, kde fotovoltaické systémy tvoří jen nepatrné procento výkonu v ní proudícího. Nejčastěji jde o pozemní fotovoltaické elektrárny, kde jde všechna vyrobená elektřina přímo do sítě. U některých instalací (střechy rodinných domů a ostatních budov) se však část spotřebovává a přebytek se dodává do sítě.

Fotovoltaický systém připojený k rozvodné síti obsahuje tyto komponenty (neobsahuje bateriové úložiště):

1. FV generátor
2. Rozvaděč generátoru
3. Stejnosměrná kabeláž
4. Hlavní DC vypínač
5. Střídač (měnič)
6. Střídavá kabeláž
7. Elektroměr výroby, spotřeby a domovní přípojka



Obrázek 3.11: Schéma domovního systému připojeného do distribuční sítě [24]

Střídač

Střídač též zvaný měnič nebo invertor, přeměňuje stejnosměrné napětí vyráběné fotovoltaickými panely na střídavé napětí elektrorozvodné sítě. Kromě této hlavní funkce dokáže plnit i další, jako např. monitoring sítě nebo ochranné funkce. Jedním z hlavních faktorů, které mají vliv na spolehlivý chod střídače je účinnost. Touto účinností je myšleno, kolik energie ze stejnosměrného vstupu se dostane na výstup střídavý. Účinnost je závislá od příkonu (od míry slunečního záření), proto je kromě maximální účinnosti uváděna i tzv. evropská účinnost, což je průměr účinnosti při různých zatíženích střídače (měří se při 5, 10, 20, 30, 50 a 100 % nominálního výkonu). Na druhou stranu je evropská účinnost měřena při

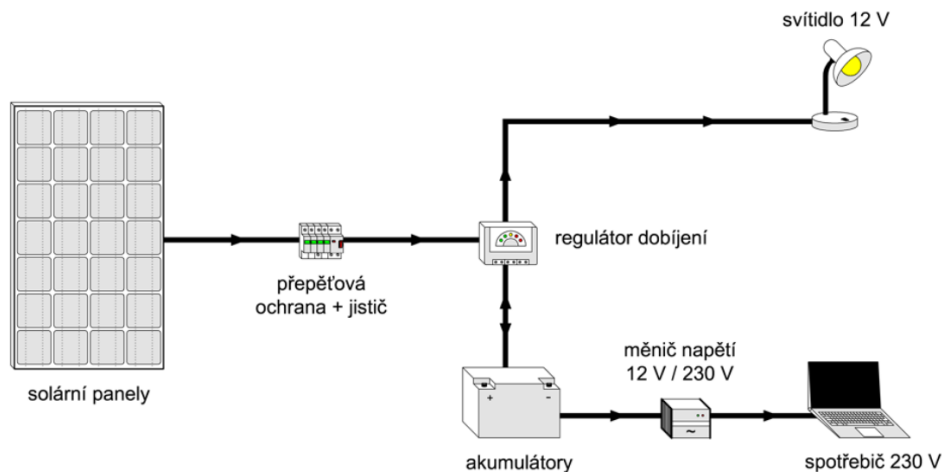
optimálním napětí na DC straně, na kterou má během provozu vliv teplota. Dalším důležitým parametrem je sledování bodu maximálního výkonu (MPPT – maximum power point tracker), ten udává, jak se invertoru daří sledovat optimální pracovní bod fotovoltaických panelů. Právě špatné sledování maximálního bodu výkonu celého řetězce panelů vede ke snížení výnosu energie z FVE. Zvláště u sériově propojených panelů ty slabší ovlivňují ty výkonově silnější a střídač pak neumí zareagovat. Výsledkem je pak ztráta energie a financí. [25,26]

3.5.2 Ostrovní systémy

Ostrovní systémy všechnu vyrobenou elektřinu ze slunce spotřebují. Díky časové nesouhlasnosti výroby a spotřeby energie v spotřebičích jsou často používány u těchto systémů akumulátory jakožto zásobníky energie. Tento druh zapojení se používá často tam, kde zásobování elektrickou energií z rozvodné sítě není možné, není rentabilní nebo je nežádoucí. Tyto systémy mají dobré využití v místech, kde není rozvinutá elektrická infrastruktura (Indie, Afrika). Ostrovní systémy tam představují levný způsob dodání základních energetických služeb. Elektřina vyrobená v takové FVE může být pak použita na čerpání vody z hlubokých vrtů, osvětlení domů, používání domácích spotřebičů (televize, počítač) nebo i na chlazení např. krevních konzerv, léků a vakcín v tropickém klimatu. Kromě domů a chat se tyto autonomní systémy využívají v menších aplikacích jako jsou kalkulačky, nabíječky, hodinky, kapesní svítilny atd.

Hlavní komponenty ostrovního systému jsou:

1. FV generátor
2. Regulátor dobíjení
3. Akumulátor
4. Spotřebiče



Obrázek 3.12: Schéma ostrovního systému [24]

Akumulátory

Akumulátor je u ostrovních FV systémů komponentou, která slouží k uchování vyprodukované elektrické energie. Pro tyto účely jsou nejčastěji používány olověné nebo lithiové baterie. Vyrobená elektřina je spotřebována v domě přes den v běžných spotřebičích (lednice, televize) nebo je ukládána v akumulátoru, z kterého ji lze využít po západu slunce.

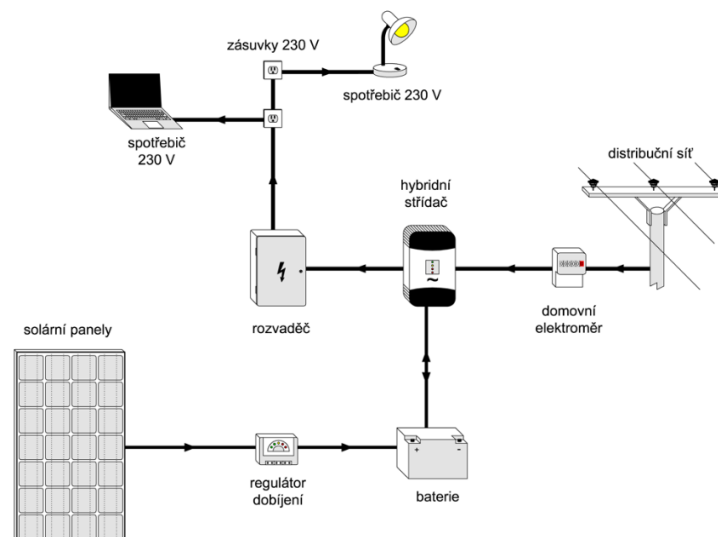
Výhodou bateriových systémů je, že fungují nezávisle na distribuční síti, takže elektřina je k dispozici i při dlouhodobém výpadku proudu. Životnost baterií je však omezená, olověná baterie klesne na 80 % kapacity za 2-5 let, ale např. LiFeYPO₄ až za 20 let. Další nevýhodou je omezené množství energie během zimního období, které lze ale řešit dobíjením ze sítě (HFVE). Baterie nejsou ani zcela bezúdržbové, jejich uživatel může narazit na omezení jejich kapacity nebo na omezení výkonu. [27]

3.5.3 Hybridní fotovoltaické elektrárny

Jde v podstatě o ostrovní systém zálohovaný pomocí elektrické rozvodné sítě, ke které je hybridní FVE připojena. Důležitou součástí systémů je akumulátor, který vyrovnává rozdíly mezi výrobou elektřiny (přes den) a její spotřebou (večer). Hybridní fotovoltaická elektrárna je od distribuční sítě galvanicky oddělena a systém tak nevydělává za prodej elektřiny, ta je totiž spotřebována přímo na místě. Vlastnosti HFVE jsou velmi výhodné, jelikož majitel nepotřebuje získávat licenci od ERÚ. Elektřina z rozvodné sítě pak slouží jako náhradní zdroj energie, v případě, kdy FVE není schopna dodávat a akumulátory jsou vybité.

Hlavní komponenty hybridní FVE jsou:

1. FV generátor
2. Regulátor dobíjení
3. Baterie (akumulátor)
4. Hybridní střídač
5. Rozvaděč
6. Domovní elektroměr
7. Spotřebiče
8. Distribuční síť



Obrázek 3.13: Schéma hybridního systému FVE [24]

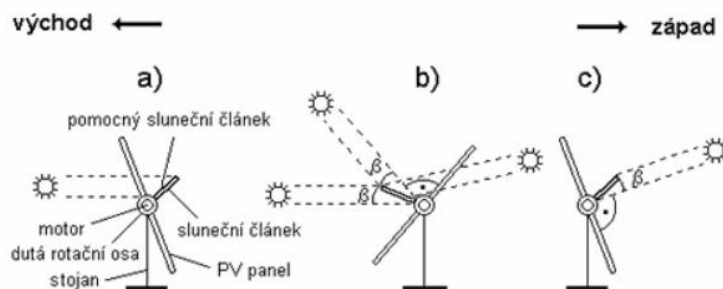
3.5.4 Vysoce účinné fotovoltaické systémy

Mezi vysoce účinné fotovoltaické systémy řadíme technologie významně zvyšující efektivitu solárního systému navýšením množství vyrobené energie. Takovou technologií je např. systém s pohyblivými stojany zvaný tracker, jehož princip spočívá v natáčení fotovoltaických panelů pomocí rotační osy tak, aby sluneční paprsky dopadaly kolmo na panely během celého dne. Trackery mohou být jednoosé i dvouosé, u těch je produkce energie zvýšena až o 35 %. Sledovače Slunce typu TRAXLE™ je složen ze dvou sekcí otočených proti sobě o 180 ° tak, že hlavní sekce je otočena k západu a pomocná sekce k východu. Obě sekce jsou antiparalelně připojeny přímo k elektromotoru, který je spojen s rotační osou. [28,29]



Obrázek 3.14: V popředí TRAXLE – FVE Sivice (Zdroj: Archiv autora)

Ráno před východem Slunce jsou panely většinou orientovány k západu, kde končí činnost předchozí den. Sluneční záření dopadá na pomocnou sekci řídicího panelu a motor natáčí panely za Sluncem, dokud jeho síla neklesne pod prahovou sílu potřebnou k orientaci. Panely jsou poté nasměrovány směrem na východ a úhel dopadu slunečního záření je přibližně roven β ($\beta \approx 48^\circ$). Slunce poté postupuje směrem k západu a solární kolektory Slunce nesledují, jelikož síla motoru je menší než potřebná síla k orientaci. Při dalším postupu Slunce směrem k západu dopadá sluneční záření na hlavní sekci a motor poháněný energií vyprodukovanou samotnými panely otáčí zařízení postupně k západu. [27,28]



Obrázek 3.14: Schéma zařízení TRAXLE™ a průběh jeho natáčení v průběhu dne [28]

Další možností, jak zvýšit produkci energie jsou koncentrátoři slunečního záření. Hřebenový koncentrátor Super TRAXLE je kombinací sledovače Slunce TRAXLE™ s přidavnými zrcadly. Je nutné, aby zrcadla odolávala povětrnostním vlivům a odrážela dostatečné množství fotonů v intervalu vlnové délky 300–1100 nm. Standardní verze tohoto koncentrátoru může nést 2 až 16 fotovoltaických panelů. Hřebenové koncentrátoře lze aplikovat i na různé

pohyblivé systémy, zároveň se u nich dobře redukuje teplota solárních panelů na rozdíl od klasických koncentrátorů. Chlazení je podpořeno prouděním vzduchu, které je umožněno uspořádáním. Nedochozí tak u nich k zhnědnutí EVA folií v panelech a k poklesu účinnosti fotovoltaické přeměny energie díky přehřátí panelů, jak se děje u standardních V-žlabových koncentrátorů. [28,29]



Obrázek 3.15: Tracker s koncentrátorem záření Super TRAXLE osazený čtrnácti fotovoltaickými panely (Zdroj: Archiv autora)

3.5.5 Agrofotovoltaika

Agrofotovoltaika neboli agrivoltaika je využití fotovoltaických panelů na zemědělské půdě. Jde o moderní využití fotovoltaiky v rurálních oblastech a představuje příležitost pro všechny zemědělce, kteří tak kromě úrody nebo pastvy pro dobytek můžou vyrábět i elektřinu. Pro agrofotovoltaické účely se používají oboustranné (tzv. bifacialní) panely, které absorbují sluneční záření oběma stranami panelu. Takovým panelů vyhovuje instalace výše nad zemí a s vyšším sklonem, aby druhou stranou panelu zachytili co nejvíce světla. Oboustranné panely se mohou instalovat dvěma způsoby. Mohou se buď montovat jako klasické pozemní FVE, tzn. orientované na jih a v šikmé poloze, s tím rozdílem, že konstrukce je visutá ve výšce asi 5 metrů. To umožňuje pohybovat se pod panely se zemědělskou technikou, zároveň stín pomáhá plodinám se vypořádat s letní vlnou veder a sucha. Druhá možnost je instalace svisle s orientací stran na východ a na západ, zároveň musí být mezi panely dostatečné rozestupy, aby si navzájem nestínily. V takto vzniklých alejích mají plodiny dostatek slunečního záření a lze v nich standardně zemědělsky hospodařit. [30]



Obrázek 3.16: Instalace oboustranných panelů německou společností Next2Sun v zemědělské krajině [30]

3.5.6 Rozdělení FVE podle výkonu

Malé střešní instalace

Jedná se o střešní instalace zejména na rodinných domech, chatách či jiných objektech, které mají vhodnou střešní konstrukci k instalaci fotovoltaických panelů. Rozeznáváme instalace integrované do střešní krytiny a instalace na nosné konstrukci v rovině střechy. Jde o systémy s nízkým výkonem, cca do 15 kWp.



Obrázek 3.17: FVE na střeše obchodu v Brně (Zdroj: Archiv autora)

Velké střešní instalace

Do této kategorie spadají už instalace se středním špičkovým výkonem od desítek až po stovky kWp. Jde o velkoplošné instalace na střechách obchodních center, univerzit, výrobních hal apod. Na plochých střechách hal se využívá konstrukcí tvořenou trojúhelníkovými profily.

Pozemní FVE

U těchto instalací se předpokládá největší instalovaný výkon, jde o stovky kWp až po desítky MWp. Fotovoltaické panely jsou umístěny na speciálních konstrukcích připevněných k zemi, tak aby byly dostatečně stabilní a zároveň vhodně umístěné. Pozemky, na kterých se tyto FVE rozkládají mají až desítky hektarů. Je nutné je oplotit a zabezpečit před vstupem nežádoucích osob.



Obrázek 3.18: Pozemní FVE Sivice v Jihomoravském kraji (Zdroj: Archiv autora)

3.6 Legislativa pro fotovoltaické systémy v ČR a jejich recyklaci

Fotovoltaická elektrárna je ze zákona považována za výrobu elektrické energie a jestliže se její provozovatel rozhodne připojit ji k distribuční síti musí získat licenci od ERÚ, na jejíž základě se stane podnikatelem v oboru energetika. Jakmile se rozhodne provozovatel prodávat elektřinu do sítě, získávat zelené bonusy nebo výkupní ceny, musí být podnikatelem a fakturovat tyto částky provozovateli distribuční sítě. Hlavním předpisem upravujícím provozování fotovoltaických elektráren je energetický zákon, ale do oboru fotovoltaiky zasahují i další zákony a vyhlášky. [31]

Licenci pro podnikání v oboru energetika vydává ERÚ fyzickým osobám, které splňují následující požadavky:

- dosažení věku 21 let
- úplná způsobilost
- bezúhonnost
- odborná způsobilost
 - do 20 kWp není povinnost dokazovat odbornou způsobilost
 - do 1 MWp vyučení v oboru a 3 roky praxe nebo osvědčení o rekvalifikaci k provozování malých elektráren [32]

3.6.1 Energetický zákon

Zákon č. 458/2000 Sb., energetický zákon, je zákonem o podmínkách podnikání, o výkonu státní správy a o změně některých zákonů. Až do začátku roku 2015 byly všechny připojené zdroje energie do elektrizační soustavy považovány za podnikatelskou činnost. K 31. prosinci 2013 skončila podpora většiny fotovoltaických elektráren a elektrárny připojené po tomto čase už nesplňovaly jednu z podmínek podnikání – peněžní příjem, avšak dále byly považovány za výdělečné zdroje. Přestože majitel FV elektrárny neměl zisk (v každém případě ztráta), musel vlastnit licenci od ERÚ k připojení zdroje. [18]

Tento problém se snaží odstranit novela § 3 odst. 3 zák. č. 458/2000 Sb., energetického zákona. Ukládá, že provozovatel nepotřebuje licenci ERÚ má-li FV elektrárnu s výkonem do 10 kWp vyrábějící elektřinu pro jeho vlastní spotřebu. Taková elektrárna může být připojena k distribuční i přenosové soustavě. Jedinou podmínkou je, že ve stejném odběrném místě nesmí být připojena další výrobní elektřiny s licenci. [18]

3.6.2 Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2012/19/EC (na úrovni EU)

Tato směrnice vstoupila v platnost 13. srpna 2012, jde o směrnici o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) (The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, známá jako direktiva WEEE). Členské státy EU měli povinnost zakomponovat do národní legislativy tuto směrnici do 14. února 2014. Jde o přepracování směrnice 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních. V roce 2014 navíc definoval doplňkový standard TS 50625-6 požadavky na sběr, logistiku a zpracování fotovoltaických panelů. Direktiva WEEE stanovuje povinnost výrobců bezplatně sbírat a recyklovat alespoň 85 % svých fotovoltaických panelů. V mnoha zemích EU byly zavedeny předpisy o odpadech s fotovoltaických panelů, aby se usnadnilo řízení na jejich konci životnosti. [33,34]

V současné době se OEEZ dělí na šest skupin:

1. Zařízení pro tepelnou výměnu (lednice, mrazáky, klimatizace atd.).
2. Obrazovky, monitory a zařízení obsahující obrazovky o ploše větší než 100 cm².
3. Světelné zdroje (zářivky, výbojky, LED světelné zdroje).
4. Velká zařízení, jejichž kterýkoliv vnější rozměr přesahuje 50 cm, kromě zařízení náležejících do skupin 1, 2 a 3, zahrnující kromě jiného: pračky, sporáky, hudební zařízení, elektronické nástroje apod.
5. Malá zařízení, jejichž žádný vnější rozměr nepřesahuje 50 cm, kromě zařízení náležejících do skupin 1, 2, 3 a 6, zahrnující mimo jiné: domácí spotřebiče, spotřební elektroniku, hračky, vybavení pro volný čas apod.
6. Malá zařízení informačních technologií a telekomunikační zařízení, jejichž žádný vnější rozměr nepřesahuje 50 cm.

[35]

Klíčová sdělení této směrnice týkající se fotovoltaických panelů:

- fotovoltaické panely spadají do 4. skupiny EEZ: Spotřební elektronika a fotovoltaické panely
- u zařízení s dlouhým životním cyklem, která spadají do oblasti působnosti této směrnice, jako jsou např. fotovoltaické panely, by mělo být co nejlépe využito stávajících systémů sběru

3.6.3 Zákon o odpadech

Tento zákon postupně zapracovává do legislativy odpovídající směrnice EU. Jedna z takových novelizací se týká i přijaté směrnice WEEE. Upravuje pravidla pro předcházení vzniku odpadů a pro nakládání s nimi při dodržování ochrany životního prostředí, ochrany lidského zdraví a trvale udržitelného rozvoje. Dále upravuje práva a povinnosti osob v odpadovém hospodářství nebo působnost orgánů veřejné správy v odpadovém hospodářství. Odpadem je podle zákona každá movitá věc, které se fyzická nebo právnická osoba zbavuje nebo to má v úmyslu či povinnosti. Odpad může přestat být odpadem, pokud je po něm poptávka na trhu, lze ho použít ke konkrétním účelům nebo pokud odpad splňuje určité normy a neohrožuje životní prostředí. [33]

Zákon č. 185/2001 Sb., zákon o odpadech a o změnách některých dalších zákonů, byl novelizován pomocí zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. Představuje v ČR legislativní základ pro recyklaci fotovoltaických panelů. [35]

Klíčová sdělení zákona:

- za recyklaci panelů uvedených na trh po 1. lednu 2013 zodpovídá výrobce
- za recyklaci panelů uvedených na trh před 1. lednem 2013 zodpovídá provozovatel solární elektrárny
- provozovatel zajistí ekologickou likvidaci solárních panelů prostřednictvím kolektivního systému

- provozovatel pomocí rovnoměrných dílčích plateb poskytovaných minimálně s ročním periodicitou zajistí financování recyklace, počínaje od 1. ledna 2014 tak, aby financování bylo zajištěno nejpozději do 1. ledna 2019

3.6.4 Zákon o podporovaných zdrojích energie

Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů zavádí do zákona o odpadech ustanovení související s likvidací fotovoltaických panelů. Nově je zavedeno, že právnická osoba přejímající odpovědnost za recyklaci/likvidaci OEEZ musí být založena nejméně čtyřmi výrobci elektrozařízení nebo právnickou osobou sdružující nejméně čtyři výrobce elektrozařízení.

V souladu s výjimkou z působnosti směrnice 2002/95/ES o omezení užívání některých nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních (RoHS) je možno na trh uvádět fotovoltaické panely, které obsahují toxické látky (Cd v CdTe panelech, a v malém množství i v CIS/CIGS panelech). Podíl těchto tenkovrstvých technologií je však na trhu v ČR malý, v případě CdTe panelů zajišťuje jejich recyklaci většinou výrobce na recyklačních zařízeních instalovaných na svých výrobních linkách. [33]

3.6.5 Vyhláška o nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady

Vyhláška č. 352/2005 Sb. o podrobnostech nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady a o bližších podmínkách financování nakládání s nimi (vyhláška o nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady) ze dne 5. září 2005 stanovuje mimo jiné bližší podmínky jednotlivých způsobů plnění povinností výrobců a bližší podmínky způsobu plnění povinností a zajištění financování pro účely zápisu do Seznamu výrobců elektrozařízení. [33]

Novela této vyhlášky stanovila, jak vypadá vybírání recyklačních poplatků podle zákona č. 185/2001 Sb. Novela určila také minimální výši recyklačního poplatku, která činí 8,50 Kč/kg. Stanovila také další náležitosti, které musí zájemci o recyklaci fotovoltaických panelů splňovat.

3.6.6 Zákon č. 221/2015 Sb., kterým se mění zákon č. 563/1991 Sb., o účetnictví

Tento zákon zavedl daňově uznatelnou rezervu na nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů uvedených na trh do dne 1. ledna 2013. [36]

Klíčová sdělení zákona:

- provozovatel FV elektrárny, který platí příspěvky kolektivnímu systému na recyklaci elektroodpadu a panelů uvedených na trh do 1. ledna 2013, může tento příspěvek uplatnit jako daňově uznatelnou rezervu
- rezerva se tvoří postupně po dobu daňového odpisování, což zajišťuje průběžné a rovnoměrné uplatnění nákladů na platbu recyklačních poplatků
- celkovou výši rezervy na nakládání s elektroodpadem ze solárních panelů tvoří úhrnná částka recyklačních poplatků
- rezervu bylo možné již vytvářet ve zdaňovacím období započatém v roce 2015. Taktéž bylo možné do tvorby rezervy započaté v roce 2015 nebo v roce 2016 zahrnout alikvotní část rezervy, která připadá na měsíce zdaňovacího období započatého v roce 2014 nebo 2015

3.7 Dotace na fotovoltaické systémy v ČR

Dotace jsou finanční i nefinanční podpory soukromoprávních nebo veřejnoprávních projektů. Dotace bývají vyčleněny ze státního nebo územního rozpočtu a mají pomoci nastartovat a následně realizovat tyto projekty. Poskytnutí dotací není automatické, žadatel musí splnit podmínky dotace a následně se starat o udržitelnost projektu např. i z vlastních nákladů. Jestliže žadatel o dotaci dodrží její podmínky, nemusí poté poskytnuté finanční prostředky vracet. Přestože mají dotace záměr urychlit vývoj nových technologií, je jejich nevýhodou zásah do rovnovážnosti stavu trhu.

V oblasti fotovoltaiky lze rozdělit dotace podle modelu jejich poskytování, na provozní a investiční. Provozní dotace probíhají v pevném časovém rozpětí nebo v pravidelných intervalech. V ČR byly takové dotace poskytovány do 31. 12. 2013 formou přímého výkupu a zelených bonusů. Provozní dotace na fotovoltaické systémy započaly v roce 2006, kdy výše cen za elektřinu z obnovitelných zdrojů a výši cen zelených bonusů definoval Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů). Každým rokem ERÚ od roku 2006 vydává cenové rozhodnutí, kde stanovuje provozní podporu pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů. Výkupní ceny byly nastaveny tak, aby po dobu životnosti výroben elektřiny z OZE zaručily patnáctiletou návratnost investice do nich vložené. Instalace fotovoltaiky ale během let 2008-2010 zlevnila a návratnost byla najednou podstatně kratší a podnikatelsky tak byla investice do výstavby FVE nesmírně výhodná.

Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výroby [kW]		Jednotarifní pásmo provozování	
od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
-	31. 12. 2005	-	-	8 353	7 282
1. 1. 2006	31. 12. 2007	-	-	17 529	16 458
1. 1. 2008	31. 12. 2008	-	-	17 096	16 025
1. 1. 2009	31. 12. 2009	0	30	16 040	14 805
1. 1. 2009	31. 12. 2009	30	-	15 922	14 851
1. 1. 2010	31. 12. 2010	0	30	14 939	13 704
1. 1. 2010	31. 12. 2010	30	-	14 821	13 750
1. 1. 2011	31. 12. 2011	0	30	8 963	7 728
1. 1. 2011	31. 12. 2011	30	100	7 054	5 983
1. 1. 2011	31. 12. 2011	100	-	6 573	5 502
1. 1. 2012	31. 12. 2012	0	30	7 219	5 984
1. 1. 2013	30. 6. 2013	0	5	3 917	2 682
1. 1. 2013	30. 6. 2013	5	30	3 252	2 017
1. 7. 2013	31. 12. 2013	0	5	3 434	2 200
1. 7. 2013	31. 12. 2013	5	30	2 794	1 559

Tabulka 3.1: Výše výkupních cen a zelených bonusů během let provozní podpory [ERÚ]

3.7.1 Historie finanční podpory FV systémů v ČR

Prostřednictvím Zákona č. 180/2005 Sb. implementovala do své legislativy Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2001/77/ES, jejímž cílem bylo splnit závazky vycházející z Kyotského protokolu a dohodnout cíle jednotlivých členských států pro podíl OZE v roce 2010. ČR se zavázala k podílu 8 % z hrubé výroby tuzemské elektřiny a společně s tím i k vytvoření příslušné legislativy a trhu. Tento cíl byl nakonec splněn a překonán o 0,3 %. [37]

V roce 2007 byly spuštěny žádosti na investiční dotace, které měli podpořit instalace fotovoltaických systémů na střeších rodinných domů. Dotace vyhlásilo MŽP prostřednictvím Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů. Mírou podpory bylo tehdy 50 % investice a maximální částka, kterou žadatel mohl získat bylo 200 000 Kč. Podmínkami bylo, že instalovaný výkon nesměl přesáhnout 5 kWp a FV systém musel být napojen na distribuční síť. V této výzvě bylo vyhověno téměř 150 žádostem s požadavkem na podporu více jak 28,5 mil. Kč. [18]

V dalších letech už nebyly investiční podpory nabízeny a tento stav trval až do roku 2015. Od 1. ledna 2014 přestala platit i provozní podpora pomocí výkupních cen a zelených bonusů. V tomto mezidobí však vznikl na základě výzvy MŽP dotační programy Zelená úsporám (2009) a Nová zelená úsporám 2013 (2013), které mohli využít fyzické osoby, vlastníci domů, družstva, sdružení vlastníků nebo soukromí majitelé. Tyto programy však přímo investiční podporu na instalaci FVE nezahrnovaly, podporovaly však např. solárně-termické systémy na ohřev vody.

3.7.2 Mechanismus výkupních cen a zelených bonusů (feed-in tariff)

Výkupní ceny

Pro provozovatele přenosové nebo distribuční soustavy vyplývá ze zákona č. 180/05 Sb. povinnost připojit FVE do přenosové soustavy a veškerou vyrobenou energii (na kterou se podpora vztahuje) vykoupit. Výkup probíhá po dobu 20 let minimálně za cenu určenou Energetickým regulačním úřadem pro rok, ve kterém provozovatel zahájil činnost.

ERÚ nastavil výkupní ceny nepřiměřeně vysoké už v roce 2005. Zároveň byly výkupní ceny z FVE nastaveny jednotně bez ohledu na velikost a umístění elektrárny (na zemi nebo na střeše). V průběhu dalších let vývoj výkupní ceny v ČR vypadal chaoticky, a to díky výkyvu kurz koruny. Prudké posílení koruny v roce 2008 zvýšilo atraktivnost investic do FVE způsobem, jenž ERÚ nemohl předvídat ani ovládat. Např. v sousedním Německu byla výkupní cena nastavena tak, aby zajistila návratnost po 10 letech, ale zároveň je zákonem pevně dán ročně její 5% pokles. V roce 2009 krátce po oznámení MPO o záměru prosadit snížení výkupní ceny od 1. ledna 2010 ERÚ prezentoval návrh vyhlášky 475/2005 Sb., zejména technicko-ekonomické parametry používané pro výpočet podpory FVE. Současně byla zveřejněna informace, jak vysoké by výkupní ceny měly být, aby odpovídaly nově definovaným požadavkům. Pro systémy do 30 kWp byla podle ERÚ přiměřená výkupní cena 11,20 Kč/kWh a pro systémy nad 30 kWp jen 9,00 Kč/kWh. [38]

Zelené bonusy

Investor si ovšem může vybrat i jiné schéma podpory – tzv. zelený bonus, jímž se rozumí finanční částka navyšující tržní cenu elektřiny, která zohledňuje snížené poškození životního prostředí využitím obnovitelného zdroje). Tento systém je více ve shodě s liberalizovaným trhem. Výrobce si na trhu musí najít obchodníka, kterému elektřinu prodá za tržní cenu. Cena je nižší než u konvenční elektřiny, protože v sobě obsahuje nestabilitu výroby, a je různá pro různé typy OZE. V momentu prodeje získá výrobce od provozovatele distribuční soustavy tzv. zelený bonus neboli prémii. Regulační úřad stanoví výši prémie tak, aby výrobce získal za jednotku prodané elektřiny o něco vyšší částku než v systému pevných výkupních cen. [32]

3.7.3 Nová zelená úsporám

Od 22. října 2015 opět mohou majitelé rodinných domů využít investiční dotace z programu Nová zelená úsporám. Žádat můžou o dotace na pořízení FVE s akumulací přebytků do ohřevu teplé vody nebo na pořízení hybridní FVE S baterií. Příspěvek může činit od 35 000 do 150 000 Kč s tím, že dotace může pokrýt maximálně 50 % investičních nákladů. Instalovaný výkon nesmí přesáhnout 10 kWp a připojení k síti musí být realizováno po 1. ledna 2016. Žádosti na NZÚ přijímá Státní fond životního prostředí ČR před zahájením, v průběhu i po konci instalace, a to až do 31. prosince 2021 nebo do vyčerpání alokace. [39]

V Hlavním městě Praze podporuje NZÚ instalaci fotovoltaických panelů na střeších bytových domů. O dotaci ve výši 15 500 Kč/kWp můžou žádat (spolu)vlastníci bytových domů; pověřený vlastník bytové jednotky, společenství vlastníků jednotek nebo správce svěřeneckého fondu, do něhož byl vyčleněn bytový dům. Minimální výše dotace je 50 000 Kč a podíl na způsobilých nákladech je 25 % (30 % při splnění dalších podmínek). Příjem žádostí pro tuto dotaci trvá do 31. prosince 2021 nebo do vyčerpání alokace.

Jednotka	Typ systému	Výše podpory [Kč]
C.3.3	Fotovoltaický systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
C.3.4	Fotovoltaický systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků a celkovým využitelným ziskem $\geq 1\,700$ kWh.rok-1	55 000
C.3.5	Fotovoltaický systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 1\,700$ kWh.rok-1	70 000
C.3.6	Fotovoltaický systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 3\,000$ kWh.rok-1	100 000
C.3.7	Fotovoltaický systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 4\,000$ kWh.rok-1	150 000
C.3.8	Fotovoltaický systém efektivně spolupracující se systémem vytápění a přípravy teplé vody s tepelným čerpadlem	150 000

Tabulka 3.2: Typy podporovaných systémů v programu NZÚ a jejich výše podpory [40]

Sledovaný parametr	Jednotka	C.3.4	C.3.5	C.3.6	C.3.7	C.3.8
Celkový využitelný zisk	Q_{FVu} [kWh.rok ⁻¹]	≥ 1 700	≥ 1 700	≥ 3 000	≥ 4 000	≥ 3000 (1f) ≥ 4 000 (3f)
Minimální míra využití vyrobené elektřiny pro krytí spotřeby v místě výroby	[%]	70	70	70	70	70
Akumulace přebytků energie do teplé vody	-	povinná	možná	možná	možná	povinná
Minimální měrný objem zásobníku teplé vody nebo akumulární nádrže	[l·kWp ⁻¹]	80	-	-	-	180
Akumulace přebytků energie do elektrických akumulátorů	-	možná	povinná	povinná	povinná	možná
Minimální měrná kapacita akumulátorů	[kWh·kWp ⁻¹]	-	1,75/1,25	1,75/1,25	1,75/1,25	-

Tabulka 3.3: Potřebné parametry a podmínky pro jednotlivé podoblasti podpory [41]

3.7.4 Dotace na fotovoltaiku pro podnikatele

Dne 13. prosince 2019 vyhlásilo MPO 3. výzvu dotačního programu podpory OPPIK Úspory energie Fotovoltaické systémy s/bez akumulace pro vlastní spotřebu. Malé, střední i velké firmy mohou od 13. ledna 2020 žádat o dotaci v minimální výši 2 miliony korun. Maximální výše dotace může být až 50 milion Kč pro jednoho žadatele. To znamená, že je dotace určena pro elektrárny s vyšším výkonem. Přesněji je to minimálně 180 až 200 kW u systémů bez baterie a minimálně 100 kW u systémů s baterií o kapacitě 100–120 kWh. Maximální instalovaný výkon FVE může být 2 MWp. [42, 43, 44]

Celková plánovaná alokace financí v dotační výzvě je 500 milion Kč Dotace jsou určeny i pro hotelová, restaurační, sportovní, zábavní nebo rekreační zařízení. Realizovaný projekt však musí být mimo území hl. města Prahy. Výše dotace je posuzována dle velikosti firmy následovně:

- malý podnik (do 49 zaměstnanců) – 40-80 % prokázaných způsobilých výdajů
- střední podnik (50 až 249 zaměstnanců) – 35-70 % prokázaných způsobilých výdajů
- velký podnik (od 250 zaměstnanců) – 30-60 % prokázaných způsobilých výdajů

3.8 Fotovoltaika v ČR

První solární panely byly v České republice instalovány v rámci programu MŽP ve spolupráci s MŠMT „Slunce do škol“. Stalo se tak mezi lety 2000–2006 a vznikly zde stovky školních instalací s celkovým výkonem ve stovkách kWp. Na školách základních byl výkon 100 Wp nebo 200 Wp (jeden nebo dva panely), na středních školách systémy o výkonu 1,2 kWp a na vysokých školách se výkon instalovaných systémů pohyboval mezi 20 až 40 kWp. [18,45].

Instalovaný výkon začal růst po roce 2006 díky zavedení podpory výkupu elektřiny z OZE podle zákona č. 180/2005 Sb. Cenová podpora byla i tak slabá pro vznik malých střešních fotovoltaik a ceny zařízení byly k instalaci malého výkonu vysoké. Do instalací se tak pouštěli jen techničtí nadšenci nebo dotované právní subjekty. Skutečný rozvoj fotovoltaiky nastal po roce 2008, kdy došlo k poklesu cen křemíkových technologií. Až do konce roku 2008 lze hovořit o první fázi počátečního rozvoje fotovoltaiky v ČR.

V roce 2009 se na snížení cen panelů značně podepsala celosvětová finanční krize, zároveň v Asii byla uvedena do provozu výroba solárního křemíku, což jeho cenu srazilo téměř na desetinu. Ceny panelů se tak snížily na polovinu a investice na instalace FVE klesly o více než 30 %. V ČR byla tato situace ještě umocněna posílením koruny a nastal tak tzv. „fotovoltaický boom“, kdy došlo k intenzivnímu nárůstu počtu FVE a tím i instalovaného výkonu. Na jaře 2010 byl vyhlášen tzv. stop-stav budování dalších výroben energie z OZE díky přemrštěným výkupním cenám elektřiny z nich vyrobené. Od začátku roku 2011 do konce roku 2012 tak probíhala fáze stagnace. Stop-stav byl koncem roku 2012 postupně uvolňován a v letech 2012 a 2013 proběhla poslední fáze rozvoje FVE u nás, jakožto podporovaného zdroje energie. Od roku 2013 se již celkový instalovaný výkon mění jen zanedbatelně a jeho hodnota se pohybuje kolem 2000 MW (poslední čtvrtletní zpráva ERÚ z roku 2019 udává 2044,3 MW).

Od 1. ledna 2014 přestala platit cenová provozní podpora pro FVE ze zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a z fotovoltaiky se tak stal nepodporovaný zdroj energie. To se však změnilo opět v roce 2015, když byly nastartovány investiční dotace do podnikových energetických kombinací a dotace pro malé střešní FVE bez licence ERÚ s výkonem pod 10 kWp.

Sklon fotovoltaických panelů bývá nejčastěji 35° až 45° od vodorovné roviny a panely by měly být orientovány, pokud možno na jih. Z panelů o výkonu 1 kWp, které zaberou v průměru 8 až 10 m² se běžně vyrobí 1000 kWh energie za rok. Největší podíl instalovaných FVE má Jihomoravský kraj (447,9 MW; 21,9 % z celkového instalovaného výkonu), který je z hlediska délky slunečního svitu a celkové roční výše slunečního záření vzhledem ke zbytku ČR nadprůměrný. [46]

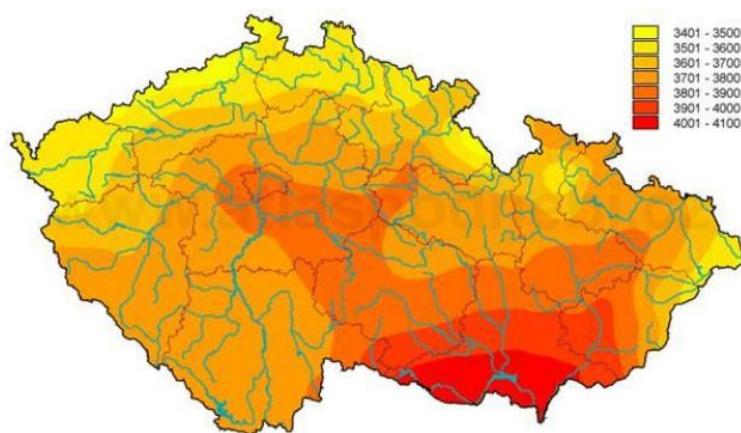
3.8.1 Klimatické podmínky pro FVE v ČR

Průměrné roční množství dopadající sluneční energie na vodorovný zemský povrch v ČR je 1 050 kWh/m² (t.j. cca 3 780 MJ/m²). Fotovoltaický systém však musí být navržen pro skutečné místní podmínky.

Pro výběr lokality FVE je tedy nutno zjistit:

- množství dopadajícího globálního slunečního záření na vodorovný povrch v daném místě – lze zjistit z Atlasu podnebí ČHMÚ
- počet hodin slunečního svitu (bez oblačnosti) – poskytne ČHMÚ
- orientaci uvažované FVE a sklon FV panelů
- množství stínících překážek
- zda vyhovuje výměra ploch pro uvažovanou velikost FVE
- ostatní podmínky

Nejdůležitější je hodnota globálního slunečního záření v lokalitě. Lze ji zjistit (pro vodorovnou plochu) z mapy ročního úhrnu globálního slunečního záření (viz obrázek 3.18).



Obrázek 3.19: Mapa ročního úhrnu globálního slunečního záření (MJ/m^2) [ČHMÚ]

V ČR se průměrný počet hodin slunečního svitu bez oblačnosti pohybuje kolem 1 460 h/rok (od 1 400 do 1 700 h/rok). Nejmenší počet hodin má severozápad území, směrem na jihovýchod počet hodin narůstá. Pro danou lokalitu údaje o slunečním svitu poskytuje ČHMÚ. Nejvýhodnější orientace FVE je na jih, jiná orientace pak zhoršuje využití sluneční energie k výrobě elektřiny.

Sklon panelů má být kolmo ke směru slunečního záření a jejich sklon vzhledem k vodorovné rovině je cca 35 °. Tato podmínka je zvláště důležitá při instalacích na střechách budov. Na volné ploše (pozemku) lze tuto podmínku jednoduše dodržet. Významné zvýšení dopadajícího slunečního záření lze docílit pomocí panelů s pohyblivými stojany a s automatickým natáčením za sluncem (viz kapitola 3.5.4). [47]

3.8.2 První pozemní a střešní FVE u nás

Vůbec první výstavba fotovoltaické elektrárny začala v roce 1994 na Mravenečnicku v Jeseníkách a do provozu byla uvedena v roce 1998 s průměrnou výrobou elektrické energie 6650 kWh. Elektrárna musela být z důvodu častých krádeží panelů přemístěna do areálu jaderné elektrárny v Dukovanech, kde svůj provoz zahájila v říjnu roku 2003. [48]

První velké pozemní FVE u nás vznikaly zejména na plochách, které neměly jiné využití jako např. střechy a brownfieldy. V červenci roku 2006 byla v Opatově na Svitavsku připojena do

sítě v té době největší elektrárna. Její výkon byl tehdy 60 kWp a jednalo se o instalaci na vhodně orientované šikmé střeše bývalé drůbežárny. Elektrárna funguje dodnes a časem „vrostla“ do přírodního a mokřadního okolí. Jedním z příkladů FVE instalovaných na brownfieldech je fotovoltaická elektrárna v Dubňanech na Hodonínsku. Instalace proběhla v bývalém důlním areálu v březnu roku 2007 a byla zde uvedena do provozu 1. etapa FVE s výkonem 59 kWp. Tato etapa se skládala z 1323 panelů a čtyřmi polohovacími trackery. Po zahájení provozu byly instalovány další panely a byl dosažen konečný výkon 233 kWp.



Obrázek 3.20: FVE na střeše bývalé drůbežárny v Opatově na Svitavsku (vlevo) a první etapa FVE v Dubňanech na Hodonínsku (vpravo) [49]

FVE v Ostrožské Lhotě připojená k síti v červenci 2007 se stala svého času největší elektrárnou u nás a zároveň byla jednou z prvních elektráren, kde místo betonových patek sloužily k upevnění konstrukce dlouhé zavrtávací šrouby z pozinkované oceli. Z hlediska budoucí likvidace FVE a revitalizace plochy je použití zavrtávacích šroubů vhodnější než upevnění do betonových patek. Právě výstavba této FVE s výkonem 702 kWp (dnes už 2,25 MWp) se stala impulzem k oživení průmyslové výroby zavrtávacích šroubů pro nejen české FVE v její bezprostřední blízkosti. [49]



Obrázek 3.21: FVE v Ostrožské Lhotě a 1,6 m dlouhé zavrtávací šrouby použité ke připevnění konstrukce [49]

Výstavba FVE na rekultivované skládce odpadu ve Zlíně-Louky je dalším vhodným příkladem využití vysloužilých průmyslových ploch. Elektrárna o výkonu 200 kW byla vystavěna na jižně orientovaném svahu na ploše 20x120 m. Instalace FVE na rekultivovaných skládkách se jeví jako jeden z nejúčelnějších způsobů jejich využití, jelikož nepoškozuje izolaci a nehrozí tak riziko úniku škodlivých látek z podloží skládky. [49]



Obrázek 3.22: FVE na rekultivované skládce (Zlín-Louky) [49]

3.8.3 Největší FVE v ČR

Největší komplex FVE v České republice se nachází poblíž obce Ralsko v okrese Česká Lípa a byl vystavěn v druhé polovině roku 2010. Celý komplex s instalovaným výkonem 38,3 MW se skládá ze čtyř menších zdrojů o výkonech 14,269 MW, 12,869 MW, 6,614 MW a 4,517 MW, které jsou připojeny k jednomu odběrnému místu. Solární elektrárna Ralsko Ra 1 je složena z polykrystalických panelů a nachází se ve vhodné lokalitě, kde průměrný roční úhrn slunečního záření dosahuje 3500 MJ/m². Odhaduje se, že elektřina vyrobená ze FVE Ralsko Ra 1 pokryje až 10 000 domácností na pomezí středních a severních Čech. Druhá největší FVE u nás je FVE Vepřek, která se rozkládá na 82,5 hektarech v katastrálním území Vepřek obce Nová Ves v okrese Mělník. Je vybudována z 26 bloků 186 960 monokrystalických panelů o výkonech 185 nebo 190 Wp. Třetí největší projekt v ČR je solární elektrárna Ševětín na Českobudějovicku zabírající plochu 60 hektarů. Instalaci o celkovém výkonu 29,9 MW zainvestovala Skupina ČEZ, která projekt odkoupila od společnosti Gentley v závěru roku 2009. Elektrárna byla oficiálně spuštěna v prosinci roku 2010 a pokrýt by měla ročně asi 8 000 jihočeských domácností. Čtvrtá největší solární elektrárna FVE Mimoň Ra 3 leží jen pár kilometrů od největšího zdroje Ralsko Ra 1 a má výkon 17,494 MW. Stejně jako Ralsko Ra 1 i Mimoň Ra 3 je v oficiálním provozu od 29.12.2010. S výkonem 16,03 MW je pátou největší solární elektrárnou na našem území FVE Vranovská Ves, která se nachází v katastru obce Vranovská Ves v Jihomoravském kraji. Tato elektrárna leží ve vůbec nejlepších slunečních podmínkách na našem území, roční úhrn slunečního záření totiž na jihu Moravy dosahuje až 4 100 MJ/m². [50, ERÚ]



Obrázek 3.23: Mapa s FVE o výkonu větším než 5MW [50, ERÚ]

Název:	Výkon (MWp)	Zahájení provozu:	Obec, Kraj:
FVE Ralsko	55,762	29.12.2010	Ralsko, Liberecký
FVE CZECH Vepřek	35,103	7.5.2010	Nová Ves, Středočeský
FVE Ševětín	29,902	14.12.2010	Ševětín, Jihočeský
FVE Vranovská Ves	16,033	3.12.2010	Vranovská Ves, Jihomoravský
Solar Stříbro s.r.o.	13,608	15.12.2009	Stříbro, Plzeňský
FVE ALKOUN s.r.o.	12,900	28.12.2010	Chomutov, Ústecký
FVE Uherský Brod	10,211	1.11.2010	Uherský Brod, Zlínský
FVE Brno – Letiště Tuřany	8,638	31.12.2009	Brno, Jihomoravský
FVE Klenovka	8,434	28.12.2010	Přelouč, Pardubický
FVE Oslavany	7,990	30.12.2010	Oslavany, Jihomoravský
FVE Tuchlovice	7,781	18.10.2010	Tuchlovice, Středočeský
FVE BS Park II.	7,567	1.9.2010	Brno, Jihomoravský
PAPENO 2 s.r.o.	7,519	30.12.2010	Sokolnice, Jihomoravský
FVE Vlkoš u Kyjova	6,751	20.10.2009	Vlkoš, Jihomoravský
FVE - Raková u Konice I. a II.	6,518	21.10.2010	Raková u Konice, Olomoucký
FVE Velké Těšany	6,336	15.12.2010	Bařice-Velké Těšany, Zlínský
FVE CZECH SMÍŘICE I	6,086	18.8.2009	Smiřice, Královéhradecký
FVE Litrobratřice	6,000	7.12.2010	Litrobratřice, Jihomoravský
FVE Triangle	5,997	21.12.2010	Žiželice, Ústecký
FVE ALT Pohledy	5,864	28.2.2011	Pohledy, Pardubický
FVE Ledce u Židlochovic	5,851	22.11.2010	Ledce, Jihomoravský
FVE Veselí nad Moravou Michalka-Sun	5,730	3.12.2010	Veselí nad Moravou, Jihomoravský
FVE ŽH - SUN, s.r.o.	5,683	27.12.2010	Hrádek, Plzeňský
FVEBřest 5,52 MWp	5,641	21.12.2010	Břest, Zlínský
Fotovoltaická elektrárna Žabčice	5,6	30.12.2009	Žabčice, Jihomoravský
FVE KH	5,594	1.11.2010	Kutná Hora, Středočeský
FVE BSP III 5MW	5,474	25.10.2010	Brno, Jihomoravský
FVE Papeno	5,445	18.12.2009	Zakřany Jihomoravský
FVE Zašová I	5,28	15.12.2010	Zašová Zlínský
FVE Břest	5,185	22.11.2010	Břest Zlínský
FVE Ladrná	5,168	7.12.2009	Břeclav Jihomoravský
FVE Kameničná	5,1	29.11.2010	Kameničná Pardubický
FVE Chrudichromy I	5,027	23.12.2010	Chrudichromy Jihomoravský
FVE Letkov	5,025	8.10.2010	Letkov Plzeňský
FVE Chrudichromy II	5,019	23.12.2010	Chrudichromy Jihomoravský
FVE Letkov	5	8.10.2010	Letkov Plzeňský
FVE APTPOWER	5	9.12.2010	Krupka Ústecký

Tabulka 3.4: Přehled elektráren na území ČR s výkonem 5 MWp a vyšší [50, ERÚ]

3.8.4 Budoucnost FVE v ČR

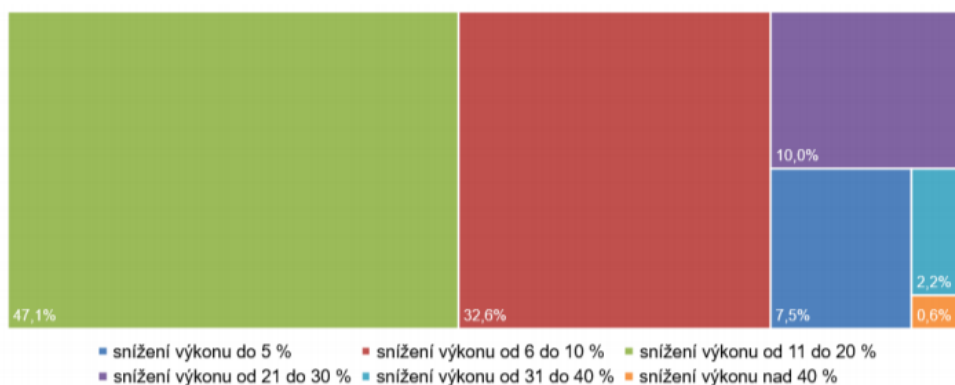
FVE po ukončení podpory

Okolo roku 2030 vyprší většině provozovatelům FVE licence udělená ERÚ a skončí jim tak vyplácení podpory. V letech 2014 a 2016 proběhla šetření, jestli tyto FVE budou provozovány i po ukončení podpory.

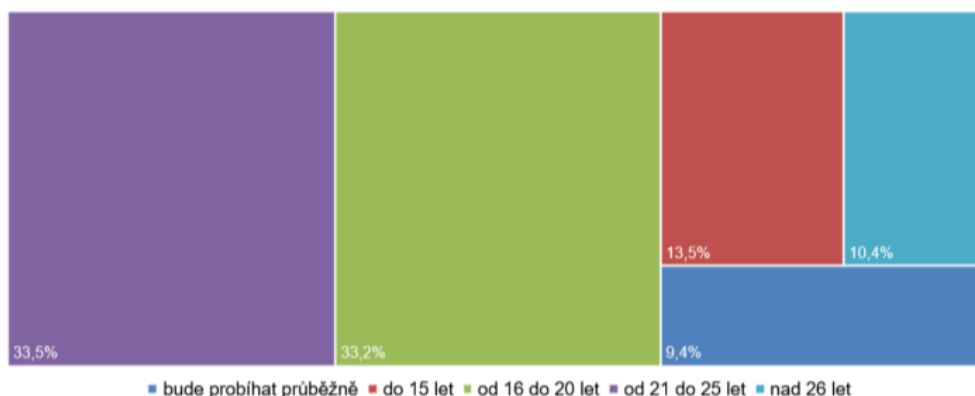
Zásadní zjištění těchto šetření:

- 95 % provozovatelů předpokládá pokračování v provozu svých FVE i po ukončení podpory
- provozovatelé očekávají průměrnou degradaci výkonu okolo deseti až patnácti procenty
- rekonstrukci zvažuje přibližně 40 % provozovatelů, a to cca 20 let po instalaci, zároveň očekávají zachování nebo mírné navýšení výkonu
- více než 70 % provozovatelů očekává konkurenceschopnost vyrobené elektřiny po roce 2030

Většina FVE tak i po ukončení podpory zůstane zachována a jen menšina bude likvidována. Obdobný závěr vyplývá i z výzkumu Solární asociace, který zjistil že minimálně 85 % provozovatelů FVE plánuje pokračování v provozu. Výzkumu se zúčastnilo 145 respondentů o instalovaném výkonu 665 MW. [51]



Obrázek 3.24: Snížení výkonu vlivem degradace FV panelů [51]



Obrázek 3.25: Odhadovaná doba provozu FVE do jejich rekonstrukce [51]

Odhad potenciálu FVE dle NKEP

Dle provedených studií byl potenciál instalovaného výkonu FVE v ČR odhadnut na 39 GW (cca asi 2,4 milionu instalací různých velikostí). Odhad se týká střech budov, jejich fasád a brownfieldů. V ČR má potenciál k instalaci FVE 2355 brownfieldů, které zaujímají rozlohu 13 326 ha, avšak celkový počet brownfieldů je v ČR okolo 10 tisíc o celkové rozloze 27-38 tisíc ha. Na tyto brownfieldy bylo možné instalovat více jak sedminásobek dosavadního instalovaného výkonu. [51]

Umístění	Potenciální výkon (GWp)
střechy rezidenčních budov	6,2
střechy nerezidenčních budov	4,3
fasády rezidenčních budov	8,8
fasády nerezidenčních budov	4,4
brownfieldy	15,3
celkem	39,0

Tabulka 3.5: Odhadovaný technický potenciál FVE v ČR [51]

Národní klimaticko-energetický plán (NKEP) je dokumentem pomocí něhož evropské státy mají definovat své závazky vůči EU v oblasti energetiky a klimatu a stanovit strategii jejich naplnění. NKEP definuje i cíle v oblasti OZE, kde si ČR stanovila cíl pro podíl ve výši 20,8 % na spotřebě energie.

Scénář	2020	2025	2030
NKEP	2 091,6	2 070,2	2 232,2
Realistický	2 158	5 112,5	9 000
Kogenerační	2 198	3 758,7	6 850

Tabulka 3.6: Instalovaný výkon (MWp) pro různé scénáře z dokumentu NKEP [51]

Realistický scénář je postaven na využití předpokladu výrazného poklesu cen technologií v oboru fotovoltaiky a na realizaci ekonomického potenciálu stavby těchto elektráren. FVE se mohou kolem roku 2025 stát tržně konkurenční a jejich výstavba nebude potřebovat státní podporu.

Kogenerační scénář využívá rozvoje FVE i větrných elektráren. Instalovaný výkon větrných elektráren odhaduje shodně s předchozím scénářem na 1,4 GWe, avšak v oblasti fotovoltaiky roste na hranici 6,85 GWe. Pokles výkonu FVE v tomto scénáři je umožněn díky výrazným přírůstkům výroby elektřiny v režimu KVET u bioplynových stanic a biomasy. [51]

3.9 Recyklace panelů

Otázka recyklace se stává předem zájmu díky stoupajícímu množství instalací fotovoltaických panelů na celém světě. Doposud tomuto tématu byla věnována malá pozornost díky relativně dlouhé životnosti fotovoltaických panelů, jejíž délku většinou výrobci panelů uvádí 25 let. Tato životnost je definována poklesem výkonu o 20 %. Většina výrobců garantuje pokles výkonu o 10 % za 10 let a o 20 % za 25 let. Na některých instalacích starých až 25 let byl zjištěn pokles výkonu o 6 až 8 %. Skutečná životnost fotovoltaických panelů tak může být mnohem delší, u kvalitních panelů se předpokládá doba mez 30 až 40 lety. Tyto panely mohou být funkční i po době jejich „oficiální“ životnosti, pouze jejich účinnost bude dál klesat. Provozovatel tedy může zvážit, zdali je pro něj výhodnější koupit panely nové nebo je nabídnout zájemcům, pro které je nízká cena panelu důležitější než jejich výkon.

V České republice nebyly doposud recyklovány fotovoltaické panely vyřazené díky úbytku výkonu, jelikož ani nejstarší instalace nepotřebují nutnost obměny za panely nové. Hlavními důvody vyřazování panelů zatím jsou jeho mechanická poškození při dopravě a instalaci nebo skryté vady materiálu neodhalené při výrobě panelů.

Díky využitelnosti většiny komponent, ze kterých se fotovoltaický panel skládá, klesá výrobní cena panelů nových. Proto dnes výrobci a prodejci panelů nabízejí recyklovatelné panely. Panely jsou z největší části tvořeny sklem (60-70 %) a hliníkem (kolem 20 %). U tenkovrstvých panelů je podíl skla a hliníku větší jak 95 %. Tyto materiály jsou běžně recyklovány z téměř 100 %

Další podstatnou komponentou fotovoltaického panelu jsou články z křemíku, jehož velká část se získává při recyklaci zpět. Přestože fotovoltaické články představují jen jednotky procent z celkové váhy panelu, podílejí se až z 80 % na energii spotřebované na výrobu panelu a zhruba z 50 % na jeho ceně. Recyklace křemíku tak významně napomáhá snížení ceny nových fotovoltaických panelů.

Zbylé komponenty fotovoltaického panelu jsou z těžkých kovů nebo plastů. Těžké kovy jsou z hlediska hmotnosti zanedbatelné (desetiny promile z hmotnosti panelu) a jejich recyklace je stejně energeticky náročná jako jejich výroba. Recyklace je však nutná z jiného důvodu, těžké kovy jsou toxické a musí tak být odděleny od životního prostředí. Plastové fólie z panelů lze jednoduchými metodami recyklovat těžko, jako lepší možnost jejich opětovného využití se jeví využití energie z jejich spálení.

Jako první systém byl ke sběru a recyklaci fotovoltaických panelů vytvořen v roce 2007 PV Cycle. Smyslem a cílem PV Cycle bylo vybudovat systém sběrných míst pro zpětný odběr vysloužilých a poškozených fotovoltaických panelů. Jde o celoevropskou aktivitu výrobců a dodavatelů, kteří nesou odpovědnost za výrobek v průběhu jeho celého životního cyklu, budují tak oboru zelenou image. V každém sběrném místě jsou kontejnery zvláště na krystalické a na tenkovrstvé panely. Pro větší množství panelů např. při likvidaci pozemní fotovoltaické elektrárny, je používán k dopravě panelů na místo recyklace kamion. [45]



Obrázek 3.26: Sběrné místo PV Cycle [52]

Skládkování bylo v minulosti hlavní metodou likvidace FV panelů. Panely mohly být legálně ukládány na skládku společně s ostatním odpadem. Tato přímá likvidace však způsobuje trvalé ztráty opakovaně použitelných zdrojů a může vést k znečištění životního prostředí. Pro recyklaci fotovoltaických panelů tak byly navrženy různé metody, některé z nich jsou univerzální, některé jsou vhodné jen pro specifické typy panelů. Nejběžnější metody recyklace fotovoltaických panelů jsou založeny na mechanických, tepelných a chemických procesech. [34,54]

Recyklaci samotnou lze rozdělit na:

- downcycling (recyklace s nízkou hodnotou – extrakce kontaminovaných materiálů s nižší čistotou a nízkou hodnotou pro znovupoužití)
- upcycling (recyklace s vysokou hodnotou – extrakce materiálů s vyšší čistotou a lepší kvalitou pro opětovné použití)

3.9.1 Recyklovatelné materiály

Hliník

Hliník lze snadno recyklovat s velmi nízkou spotřebou energie 8 MJ/kg (zejména energie tepelná). Hliník je třetím nejzastoupenějším prvkem v zemské kůře a tvoří asi 7,5-8,3 % jejího obsahu. Nejběžnější hornina na bázi hliníku je bauxit, který se těží ve velkých povrchových dolech. Světové zásoby bauxitu jsou odhadovány na 28 miliard tun. Z extrahovaného bauxitu se vyrábí oxid hlinitý a z něj poté elektrolyticky hliník. Ze čtyř tun extrahovaného bauxitu lze získat asi jednu tunu čistého hliníku.

Sklo

Recyklace skla dokáže snížit spotřebu energie při jeho výrobě asi o 40 % a ve většině případů může být recyklované sklo využito k výrobě stejného produktu. Ve fotovoltaických panelech bývá nejčastěji obsaženo sodnovápenaté, které sestává z 71-75 % z oxidu křemičitého, z 12-

16 % z oxidu sodného a z 10-15 % z oxidu vápenatého. Křemík zde není v čisté formě, ale pouze v jeho sloučeninách.

Plastové komponenty

Jde hlavně o fólie z EVA nebo jiného polymeru. Je obtížné je recyklovat a zároveň degradují v důsledku klimatických podmínek. Lze je spalovat a z procesu využít tepelné energie.

Těžké kovy

Z hlediska hmotnosti představují zanedbatelné položky, ceny a spotřeby energie pro výrobu FV panelů. Recyklace těžkých kovů (zejména Cd a Pb) je nutná, protože jsou toxické a musí být od životního prostředí odděleny. Dnes se odhadují celosvětové rezervy stříbra na 540 000 tun. Výtěžek stříbra z rudy se současně pohybuje od 40 % do 65 %. Při dnešní stoupající míře těžby se předpokládá vytěžení stříbra do 17 let a poté bude existovat pouze jediný zdroj stříbra, a to z recyklačních procesů. Dalším důležitým kovem k recyklaci je měď, které lze recyklovat z panelu 100 %.

Fotovoltaické články

FV články mají zanedbatelný podíl na hmotnosti celého panelu. Krystalické články se podílejí z 80 % na spotřebě energie pro výrobu panelu a zhruba z 50 % na jeho ceně. S recyklací článků už jsou i první praktické zkušenosti. U tenkovrstvých křemíkových panelů mají články podíl na hmotnosti panelu a na nákladech ještě od dva řády nižší, ale i tak jde o cenné polovodiče které je výhodnější získat zpětně než ze surovin. [53]

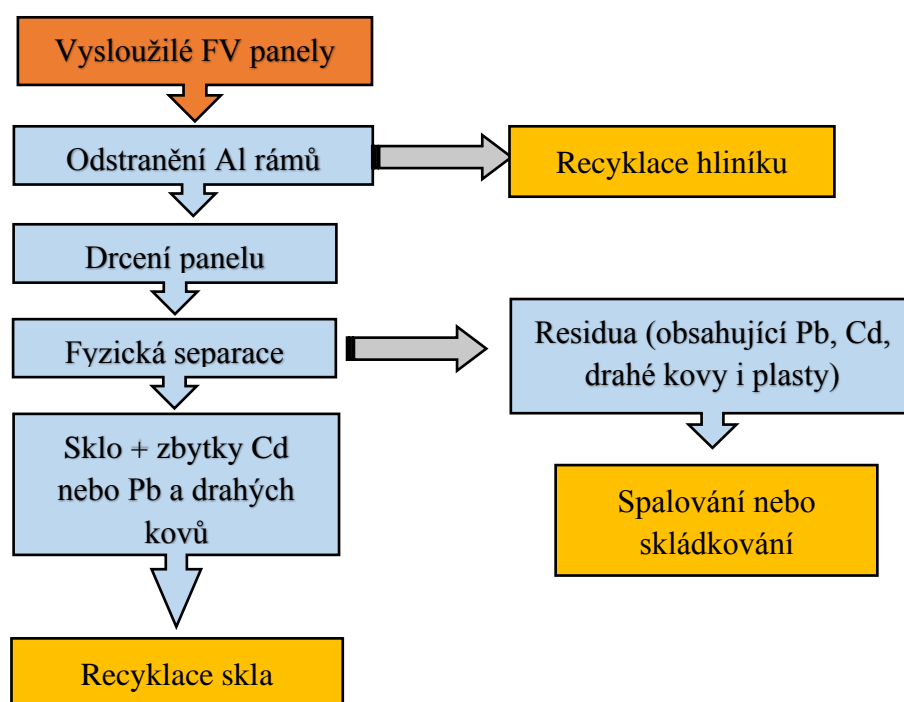
3.9.2 Downcycling

Metoda recyklace s nízkou hodnotou (downcycling) představuje u fotovoltaických panelů možnost, jak znovu využít skla a hliníkového rámu. V první fázi procesu se odstraní hliníkový rám, připojovací krabice a měděné kabely. Poté je modul drcen a probíhá řada mechanických procesů třídění a extrakce za účelem recyklace většiny skla a hliníku. Kovy jsou odeslány konkrétním zpracovatelům a zbytky které obsahují křemík, kovy, polymerové fólie a sklo jsou posílány na skládku. Tento jednoduchý způsob recyklování brání ukládání většího množství materiálu na skládky, zároveň není tak energeticky náročný jak pokročilejší procesy. [34]





Obrázek 3.27: Na snímcích panely připravené k drcení, drtič materiálu, dělič frakcí drceného panelu a jednotlivé frakce FV odpadu ve firmě Bambas Elektro s.r.o (Zdroj: Archiv autora)



Obrázek 3.28: Schéma procesu zpracování vysloužilých panelů při downcyclingu

3.9.3 Upcycling

Metoda recyklace s vysokou hodnotou (upcycling) dokáže recyklovat většinu materiálu, ze kterého se fotovoltaický panel skládá. Kromě skla a hliníku lze tak recyklovat stříbro, křemík, měď, cín, telur, indium, germanium, galium apod. Po odstranění hliníkových rámu probíhá odstranění skla, polymerových fólií a připojovací skříňky od fotovoltaických článků. Křemík a kovy z fotovoltaických článků pak lze recyklovat tak, aby se zachovala maximální hodnota a minimalizovalo se riziko úniku residuů z procesu likvidace. [34,54]

1. fází této metody je delaminace panelu, aby se sklo oddělilo od fotovoltaických článků.

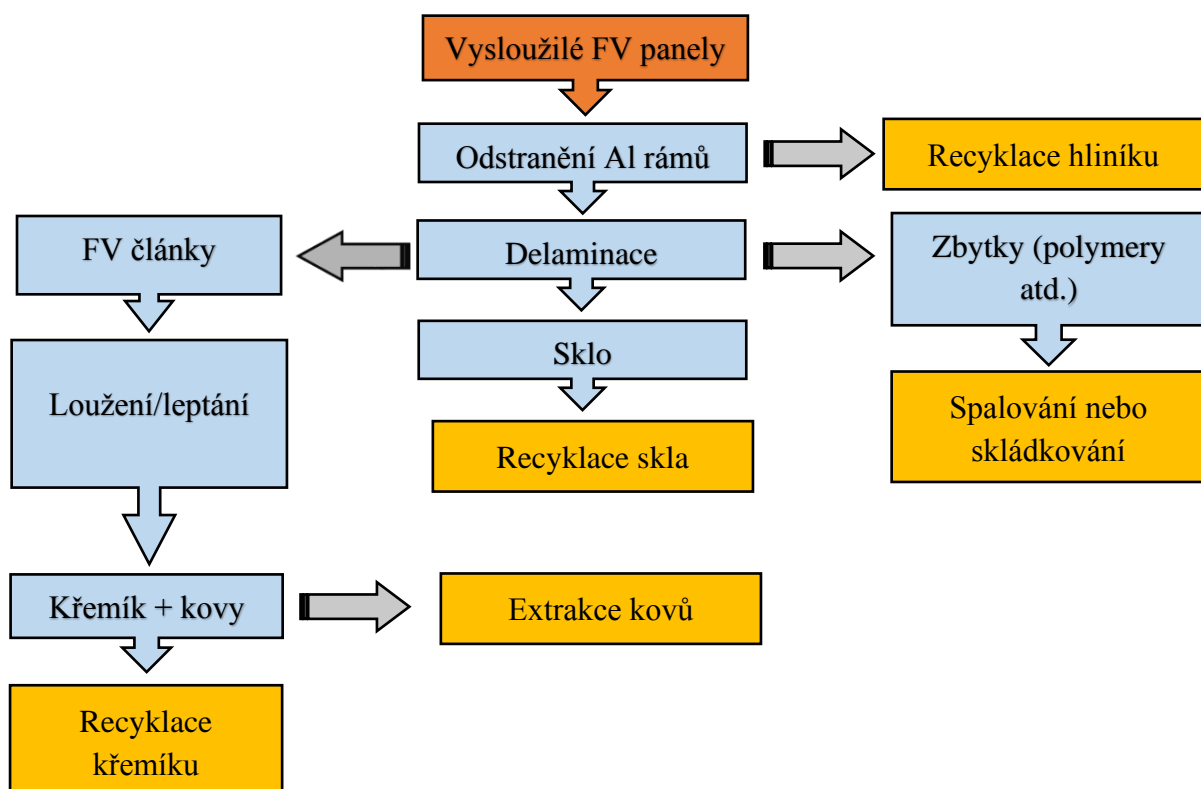
Delaminaci můžeme dělit na:

- mechanickou
- tepelnou
- chemickou

2. fází je recyklace fotovoltaických článků

Ta zahrnuje:

- loužení/leptání – k oddělení křemíku a kovů
- extrakce kovů



Obrázek 3.29: Schéma likvidace panelů metodou recyklace s vysokou hodnotou

Mechanická delaminace

Může probíhat několika způsoby:

- rozdrčení panelu pomocí dvou rotorového motoru následovaného frézováním kladivem
- kryogenní proces delaminace panelu
Po ochlazení na teplotu cca 196 °C dochází k oslabení mezifázového propojení sendvičových struktur. Brusný stroj poté může články oddělit od polymerových fólií.
- proces oddělení skla za hydrotermálních subkritických podmínek pomocí oksličovadla (představeno firmou Trina Solar)
- řezání horkým nožem
Tuto metodu představil projekt FRELP. Lze jí získat 98 % hmotnosti skla a má výhodu v tom, že se sklo oddělí v jednom kroku.

Tepelná delaminace

U tepelné delaminace se sklo od článku odděluje tepelným rozkladem enkapsulační vrstvy, která je většinou z EVA.

EVA může být:

- pyrolyzován v prostředí inertního plynu
EVA se pyrolyzuje při teplotě okolo 500 °C na kyselinu octovou, propan, propen, ethan, metan a další hořlavé plyny. Optimalizovaný proces by dokázal získat zpět všechnu hmotnost tvrzeného skla z panelu a vysoce čistý solární křemík.
- spálen v kyslíkové atmosféře
EVA se spaluje v peci a poskytuje pro ni zároveň energii

Chemická delaminace

Adhezivní zapouzdřovací vrstvu lze rozpustit v:

- anorganických rozpouštědlech (v kyselině dusičné po dobu 24 hodin)
- organických rozpouštědlech (trichlorethylen, toluen + ultrazvuk)

Loužení

Po předchozím mechanickém zpracování během delaminace panelu se prášek a popel z fotovoltaických článků rozpustí v kyselině dusičné nebo lučavce královské, aby se vyluhovaly kovy a separovaly se zbytky křemíku. Takový křemík ještě není ale dostatečně čistý, aby se dal použít opět na výrobu fotovoltaických článků.

Některé z recyklačních procesů jsou zaměřeny na regeneraci čistých křemíkových waferů (disk z polovodiče). Při takových procesech články podléhají leptání, včetně stripování elektrody, anti-reflexního povlaku, fosforem dopovaného emitoru a zadní hliníkové vrstvy. To vše vede k zisku waferu téměř identického s novým, což naznačuje cenné příležitosti pro opětovné použití při výrobě nových solárních článků. Toto selektivní leptání však vyžaduje více chemikálií a času než pouhé loužení v HNO₃. Kromě HNO₃ jsou v procesech selektivního leptání používány chemikálie jako HF, HCl, H₃PO₄, KOH, NaOH, CH₃COOH a další.

Extrakce kovů

Kov lze extrahovat třemi základními postupy dobře známými v hydrometalurgickém průmyslu:

- elektrolýza
- substituce
- srážení

Proces extrakce kovu obnovuje materiály jako je stříbro, měď, indium, gallium nebo germanium. Např. metoda nahrazování stříbra práškem zinku dokáže regenerovat až 99,5 % Ag. Zároveň tento proces odstraňuje nebezpečné prvky z odpadu, např. Pb. [34]

3.9.4 Nejběžnější metody recyklace FV panelů

Termická metoda

Tato metoda byla navržena a odzkoušena firmou Deutsche solar AG. Panely jsou nejprve zavezeny do pece, kde jsou zahřáty nad teplotu 500 °C. Při této teplotě dojde k pyrolýze plastových materiálů, které jsou v další komoře řízeně spalovány. Separace zbylých materiálů probíhá mechanicky a jsou-li panely nepoškozené lze zpět dostat až 85 % článků pro nové

využití. Použitím takto recyklovaných článků lze spotřebu energie na výrobu nových panelů snížit o 70 %. Termická metoda se používá pro všechny typy krystalických křemíkových článků. [45]

V roce 2003 začala krystalické panely formou termického procesu recyklovat firma SolarWorld, jejíž metoda dosahuje návratnosti z 90 % u skla, 95 % u polovodičů a 84 % všech materiálů z celkové váhy panelu. [54]

Mechanicko-chemická metoda

Tato metoda se skládá, jak název napovídá, ze dvou procesů, z procesu mechanického a následně z procesu chemického. Je to podobný postup, který je navrhován např. na recyklaci LCD televizorů. Prvně se ručně demontuje z panelů hliníkový rám, poté následuje drcení a třídění velikostních frakcí. Kovy jako stříbro, indium, galium apod. se získávají chemicky a pyrometalurgicky. Plasty v panelech obsažené se likvidují spálením s možností využít teplo. Tato metoda je vhodná pro recyklaci panelů tenkovrstvých (CIS, CdTe). [45]

Firmy FirstSolar vyvinula vlastní proces recyklace CdTe panelů. Po drcení panelů následuje odstranění polovodičů loužením a zbylé sklo je vystaveno směsi kyseliny sírové a peroxidu vodíku s cílem vytvořit optimální poměr látka-kapalina. Dále je sklo odděleno od EVA, vyčištěno a odesláno k recyklaci. Poslední fází procesu je vysrážení kovových materiálů. Těmito procesy jde znovu dostat až 90 % skla a 95 % polovodičových materiálů z recyklovaných panelů. Firma ANTEC Solar GmbH oddělené články převádí pomocí atmosféry obsahující chlór na CdCl_2 a TeCl_4 . [54]

FRELP metoda

Nedávný výzkumný projekt italské společnosti SASIL S.p.A. ve spolupráci s PV Cycle Italy nazvaný FRELP (Full Recovery End-of-Life Photovoltaic), je projekt financovaný EU a má za cíl maximalizovat recyklaci všech materiálů křemíkových FV panelů. V rámci projektu vznikla inovativní metoda (později nazvaná FRELP proces) pro recyklaci křemíkových panelů. Cílem projektu je vyvinout funkční pilotní zařízení na recyklaci panelů a následně navrhnout závod v průmyslovém měřítku, který ročně dokáže zpracovat 7000 tun FV odpadu. Projekt FRELP si zároveň klade za cíl určit optimální místo pro sběr, recyklaci i skládkování.

Nejprve jsou panely shromažďovány na optimálním místě s ohledem na dopravu. Demontáž panelů zajišťuje automatizovaný robot, který odstraní hliníkový rám, kabeláž, fotovoltaické články, sklo a plastové komponenty. Sklo je oddělováno mechanicky s předchozím ošetřením infračerveným zářením s krátkou a střední délkou vln. Sklo je pomocí prosévání a optické separace čištěno od nečistot. Dále je použitou spalovacího procesu, který je zde použit na separaci materiálů jako křemík a hliník z FV článků. Materiál ze spalovacího procesu je poté zpracován vyluhováním v HNO_3 . Tento proces oddělí kov a křemík od popela ze spalování. Tímto procesem lze získat až 95 % křemíku. Nakonec je elektrolyticky získáváno stříbro a měď z vyluhovacího roztoku. Odpadní kal je shromažďován a skládkován. [55,56]

3.9.5 Dopady na životní prostředí

V minulosti několik studií analyzovalo dopady recyklace fotovoltaických panelů na životní prostředí. Bylo zjištěno, že existují výhody a nevýhody různých metod, s přihlédnutím ke všem fázím, od sběru panelů až po konec procesu recyklace. Z environmentální studie vypracované pro projekt FRELP vyplynulo, že environmentální dopady recyklačních procesů krystalických panelů pocházejí ze spalování plastů a některých chemických a mechanických úprav na konci recyklace (prosévání, vyluhování, elektrolýza, neutralizace). U recyklačního procesu krystalického panelu bylo však prokázáno, že dochází k významnému snížení dopadů globálního oteplování (až o 20 % ve srovnání s procesem výroby článků). Bylo také prokázáno, že dopady recyklace panelů jsou menší než při jejich skládkování, za předpokladu že se materiály vracejí opět do výroby FV panelů.[57]

Fotovoltaický odpad může mít následující negativní dopady na životní prostředí (je-li s ním špatně naloženo):

- a) vyluhování olova
- b) vyluhování kadmia
- c) ztráta konvenčních zdrojů (sklo a hliník)
- d) ztráta vzácných kovů (stříbro, indium, gallium, germanium)

Olovo je těžký kov s vysokým potenciálem akumulace v lidském těle a životním prostředí. Vyluhování olova je spojeno s první generací krystalických křemíkových fotovoltaických panelů. Vyluhováním by se mohlo do půdy potenciálně dostat 1,64 až 11,4 g z jednoho panelu. Kadmium je taktéž těžkým kovem a jeho biologický poločas rozpadu je 30 let. Vykazuje vysokou akutní toxicitu a zároveň je karcinogenní. Znečištění kadmiiem se týká tenkovrstvých CdTe a CI(G)S panelů. Bylo určeno, že potenciál vyluhování kadmia je 0,32 až 1,84 g na jeden panel. Vyluhování těchto dvou těžkých kovů závisí také na pH půdy, přičemž je-li pH kyselější jsou úniky kovů větší, ale jsou-li panely vystaveny neutrálnímu pH začíná se olovo imobilizovat až k jeho luhování vůbec nedochází. Ztráta skla a hliníku z nerecyklovaných panelů by představovaly ztrátu znovupoužitelných materiálů k výrobě dalších FV panelů a ztráty finanční díky jejich hodnotě. Ještě větší hodnotu mají vzácné kovy, ačkoliv zastupují většinou pouze 1 % hmotnosti celého panelu. [58]

LCA

LCA je tradičně definována jako metodika pro posouzení dopadu produktu nebo služby na životní prostředí během všech etap jeho života (výrobní fáze, fáze používání, fáze konce životnosti).

V minulosti byla metodika LCA použita k vyhodnocení dopadů každé fáze životního cyklu fotovoltaických technologií. Byla hodnocena spotřeba energie na výrobu nového panelu ve srovnání s výrobou panelu z již recyklovaných článků. Při této studii bylo zjištěno, že recyklační proces ušetří až dvě třetiny potřebné energie pro nový FV článek. Je tak jisté, že dopady recyklačního procesu na životní prostředí jsou kompenzovány hlavně díky opětovnému použití regenerovaných článků. Ukázalo se také, že recyklační proces má mnohem menší dopad na životní prostředí ve srovnání se spalováním nebo skládkováním. [59]

Dopad	Jednotka	Proces	Návratnost	Celkem
Abiotické vyčerpání	kg Sb eq	4.36E-03	-4.34E-05	4.32E-03
Energie	MJ	3.15E+03	-3.74E+02	2.78E+03
Toxicita – vodní prostředí	CTUe	1.33E+03	-2.15E+01	1.31E+03
Eutrofizace – moře	kg N	1.09E+00	-4.18E-02	1.05E+00
Eutrofizace – vodní prostředí	kg P eq	5.58E-02	-1.02E-02	4.56E-02
Eutrofizace – půdy	molc N eq	1.21E+01	-4.43E-01	1.17E+01
Acidifikace	Molc H ⁺ eq	2.68E+00	-2.63E-01	2.41E+00
Fotochemická tvorba ozonu	kg NMVOC eq	3.00E+00	-1.37E-01	2.86E+00
Ionizující záření – ekosystém	CTUe	9.42E-05	-2.46E-05	6.96E-05
Ionizující záření – člověk	kg U ₂₃₅ eq	3.05E+01	-7.67E+00	2.29E+01
Prachové částice	kg PM 2,5 eq	9.81E-02	-1.62E-02	8.19E-02
Toxicita – nekarcinogenní	CTUh	1.95E-05	-1.06E-06	1.84E-05
Toxicita – karcinogenní	CTUh	2.95E-05	-1.26E-06	2.83E-05
Poškozování ozonové vrstvy	kg CFC-11 eq	3.21E-05	-8.66E-06	2.35E-05
Změna klimatu	kg CO ₂ eq	4.46E+02	-7.59E+01	3.70E+02

Tabulka 3.7: Dopady recyklace 1000 kg FV odpadu na životní prostředí [59]

3.9.6 Systém současného sběru v ČR

Od 1. ledna 2013 nabyl účinnosti zákon č. 165/2012 Sb., který novelizuje zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve kterém je obsažena i problematika solárních panelů jakožto elektroodpadu. Tato úprava zákona o odpadech zavedla povinnosti týkající se všech výrobců a provozovatelů fotovoltaických elektráren určených pro výrobu elektřiny. Povinnosti zejména spočívají v nakládání s panely po konci jejich životnosti. Jedná se hlavně o transport a recyklaci vysloužilých panelů. [60]

Odpovědnost výrobce za své zboží po konci jeho životnosti se také nazývá rozšířená odpovědnost výrobce (angl. Extended Producer Responsibility – EPR). Výrobce může své povinnosti, vyplývající z rozšířené odpovědnosti výrobce, plnit sám, tzv. individuálně, nebo prostřednictvím specializované společnosti, které vysloužilé výrobky sbírají a recyklují. Tyto společnosti jsou označovány jako kolektivní systémy. Jsou to soukromé firmy, kterou mohou vlastnit pouze výrobci elektrozařízení a pro jejich založení jsou v ČR zapotřebí minimálně čtyři výrobci elektrozařízení. Kolektivním systémem může být i právnická osoba, nejčastěji jako společnost s ručením omezeným nebo akciová společnost. Činnost těchto kolektivních systémů je regulována zákonem o odpadech a v případě obalů samostatným zákonem o obalech. Kolektivní systém panely sbírá a recykluje ve velkém objemu a dosahuje tak velkých úspor finančních nákladů. Mimo to kontroluje legislativu a právní regulaci rozšířené odpovědnosti výrobce, která se neustále mění a vyvíjí, své účastníky o těchto změnách informuje a vše potřebné za ně zařídí. Poctivý kolektivní systém je pro výrobce velmi přínosný a užitečný. Proto je třeba věnovat výběru toho správného zvýšenou pozornost s přihlédnutím k jeho pověsti a dodržování právních předpisů. Příjem kolektivních systémů tvoří pouze příspěvky jeho účastníků (výrobci, provozovatelé). Stát bohužel na sběr a recyklaci nepřispívá a celou odpovědnost ponechává na výrobcích. [61]

Recyklační poplatky na zpracování panelů uvedených na trh do 1. ledna 2013 byly uhrazeny dle zákonných povinností během let 2014–2019. Minimální výše tohoto příspěvku byla určena dle přílohy č. 10 k Vyhlášce tak, aby byly pokryty veškeré náklady na zajištění veškerých úkonů s recyklací souvisejících. Výše příspěvku se odvíjí od hmotnosti elektroodpadu ze solárních panelů. U solárních panelů uvedených na trh po 1. lednu 2013 se údaj o jejich hmotnosti určí dle jejich skutečné hmotnosti. U panelů uvedených na trh do 1. ledna 2013 a následně instalovaných na FVE se údaj o hmotnosti určí dle vzorce:

$$M = P \times K$$

ve kterém:

- M představuje hmotnost solárních panelů instalovaných v solární elektrárně pro účely výpočtu minimální výše příspěvku uvedenou v kg.
- P představuje výkon solární elektrárny podle licence na výrobu elektřiny v této solární elektrárně vydané Energetickým regulačním úřadem uvedený ve wattech (Wp).
- K představuje průměrnou hmotnost solárního panelu připadající na jednotku výkonu; tato průměrná hmotnost činí 0,11 kg.

Výše příspěvku je stanovena na 8,50 Kč/kg elektroodpadu ze solárního panelu. Např. střešní FVE o výkonu $0,007\text{MW} = 7.000\text{Wp} \times 0,11 = 770 \text{ kg} \times 8,50 \text{ Kč} = 6\,545,- \text{ Kč}$ na příspěvcích za pět let. [62]

Na území České republiky začaly kolektivní systémy nabízet recyklaci fotovoltaických panelů díky výše uvedeným změnám v legislativě v roce 2013. Jako první čtyři firmy dostaly souhlas k nakládání s fotovoltaickými panely ASEKOL Solar, s. r. o., REMA PV Systém, a. s., Retela, s. r. o. a Resolar, s. r. o. První dva případy jsou dceřiné firmy společností, které se již recyklací elektroodpadu zabývaly. REMA PV Systém, a. s. se zabývá recyklací všech druhů elektrozařízení a taky spolupracuje s celoevropským systémem PV Cycle. Firma Resolar, s. r. o. byla založena vlastníky a výrobcí fotovoltaických panelů ve spolupráci s Českou fotovoltaickou průmyslovou asociací a Aliancí pro energetickou soběstačnost. [63]

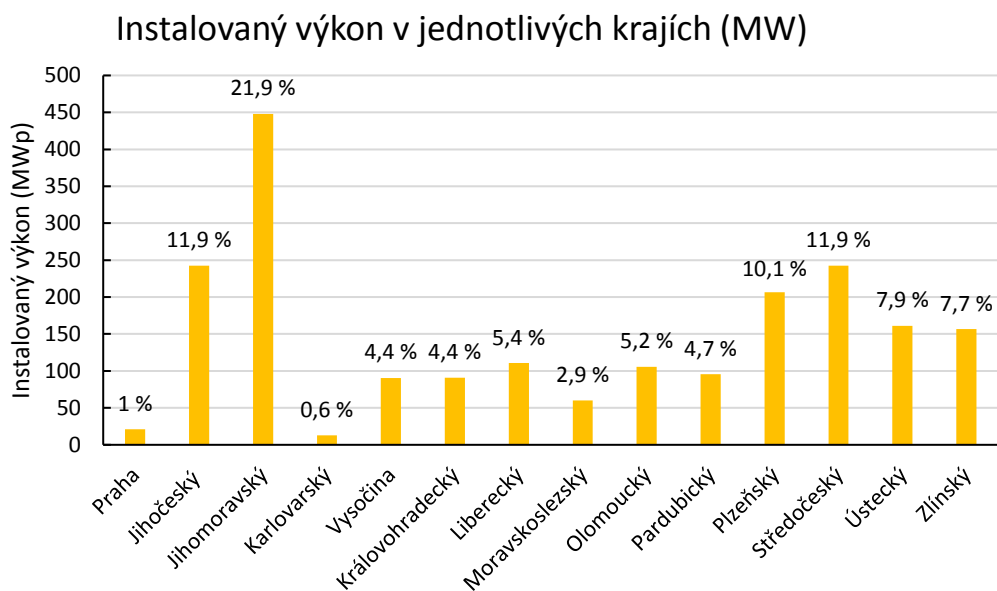
Kolektivní systém	Počet smluv	Registrovaný výkon [MW]
ASEKOL Solar, s.r.o	5181	743
RETELA	4290	360
REMA PV Systém, a.s.	3000	400
Resolar	2832	603
PV Recovery	stovky	100
ECOPARTNER	200	10
ELEKTROWIN	110	5
FitCraft Recyklace	99	75
MINTES Solutions	není známo	není známo
ČEZ Recyklace	není známo	není známo

Tabulka 3.8: Kolektivní systémy věnující se zpětnému odběru FV panelů na území ČR [ČFA]

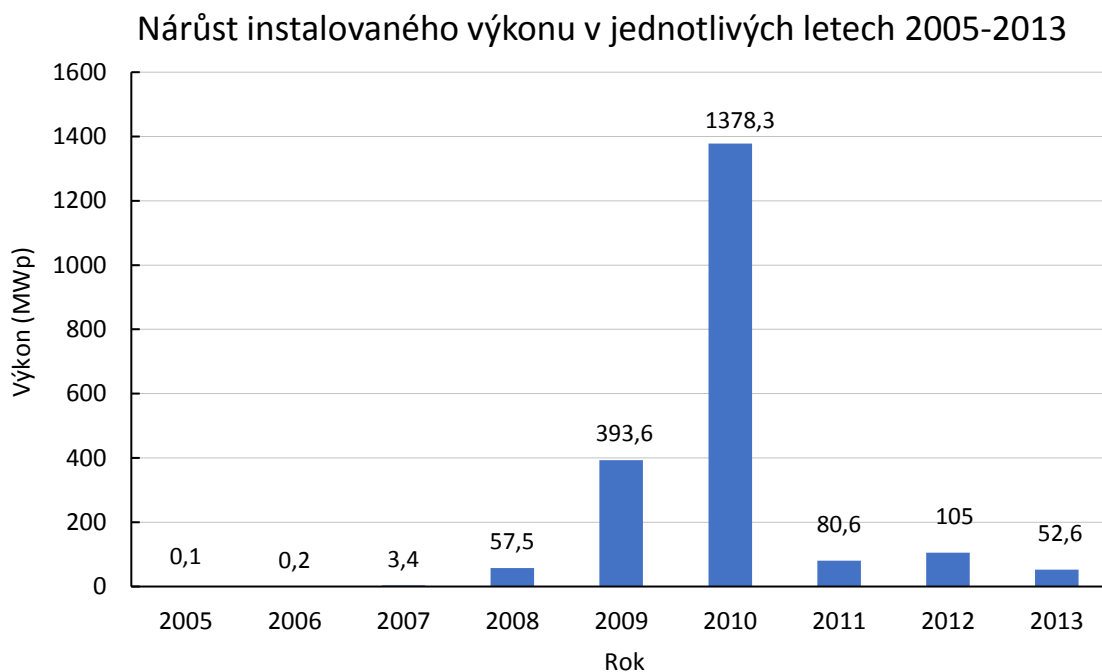
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Projekce toku množství fotovoltaických panelů určených k recyklaci v čase

Ke dni 31.prosince 2019 činil celkový instalovaný (licencovaný) výkon na území ČR 2044,3 MWp. Největší podíl na instalovaném výkonu má s 21,9 % Jihomoravský kraj, následován krajem Středočeským a Jihočeským, které mají shodně 11,9% podíl. [ERÚ]

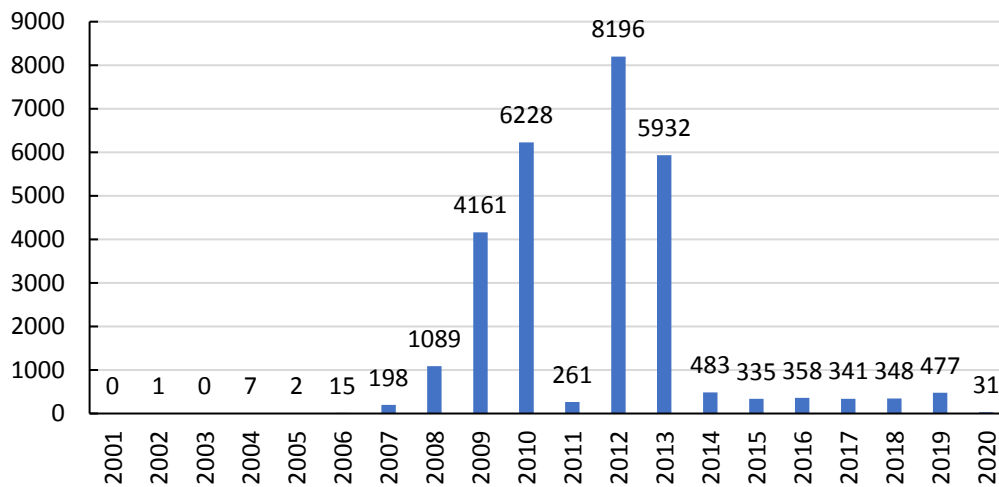


Graf 4.1: Míra a podíl instalovaného výkonu FVE v jednotlivých krajích [ERÚ]



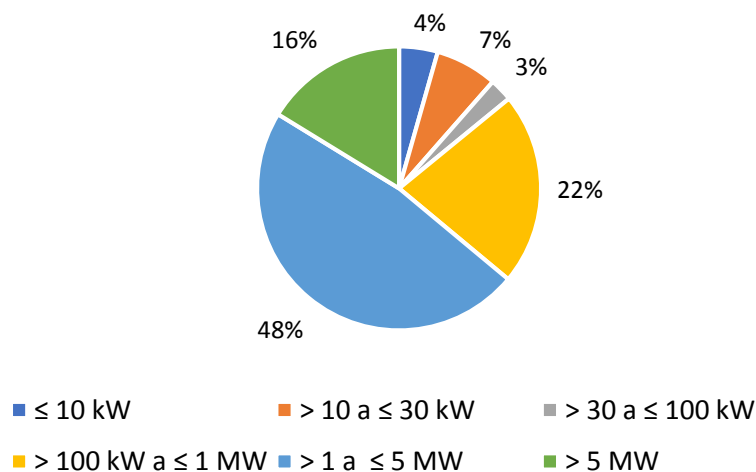
Graf 4.2: Nárůst instalovaného výkonu v letech provozní podpory [ERÚ]

Počet FVE dle termínu zahájení licence (2001-2020)



Graf č. 4.3: Zahájení činnosti FVE v letech 2001-2020 [ERÚ]

Podíl kategorií FVE v ČR na instalovaném výkonu



Graf 4.4: Podíl kategorií FVE v ČR na instalovaném výkonu [ERÚ 12/2019]

Projekce likvidace (délka provozu 25 let)

K výpočtu odhadovaného množství panelů k recyklaci byl použit průměrný výkon a průměrná hmotnost krystalických a CdTe panelů (tabulka 4.1). Projekce počítá s provozem každého FV panelu po dobu 25 let. Při dlouhodobější projekci byl předpokládán instalovaný výkon 3000 MW během let 2020–2030 a zároveň bylo uvažováno o průměrném výkonu panelu 250 Wp v letech 2021–2024 a 275 Wp v letech 2025–2030. Projekce likvidace zahrnující i panely instalované od roku 2020 počítá s jejich postupným navyšováním životnosti až na 40 let. To znamená, že panely instalované v roce 2030 se budou likvidovat v roce 2070 a později.

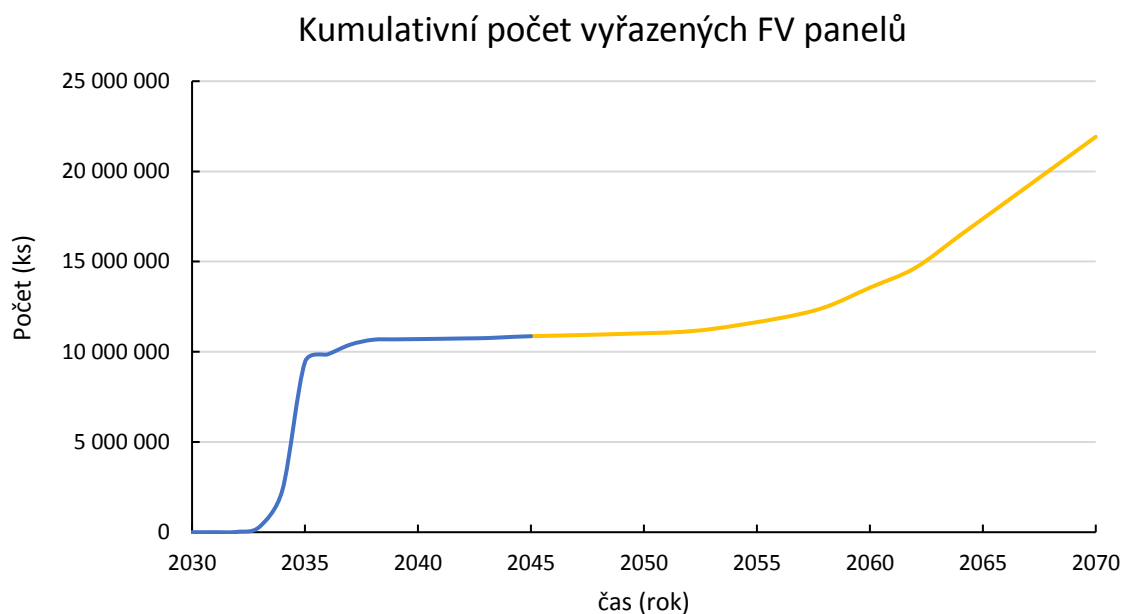
Typ panelu:	Podíl (%)	Hmotnost (kg)	Výkon (Wp)
Monokrystalický	30	15,7	188
Polykrystalický	65	18,6	217
CdTe	2	12	75
Amorfní (s rámem)	3	18,5	100
Amorfní (bez rámu)		24	105
Panel 2021–2024	100	17,68	250
Panel 2025–2030	100	17,68	275

Tabulka 4.1: Hmotnost, výkon a podíl jednotlivých typů FV panelů uvažovaný při projekci [64]

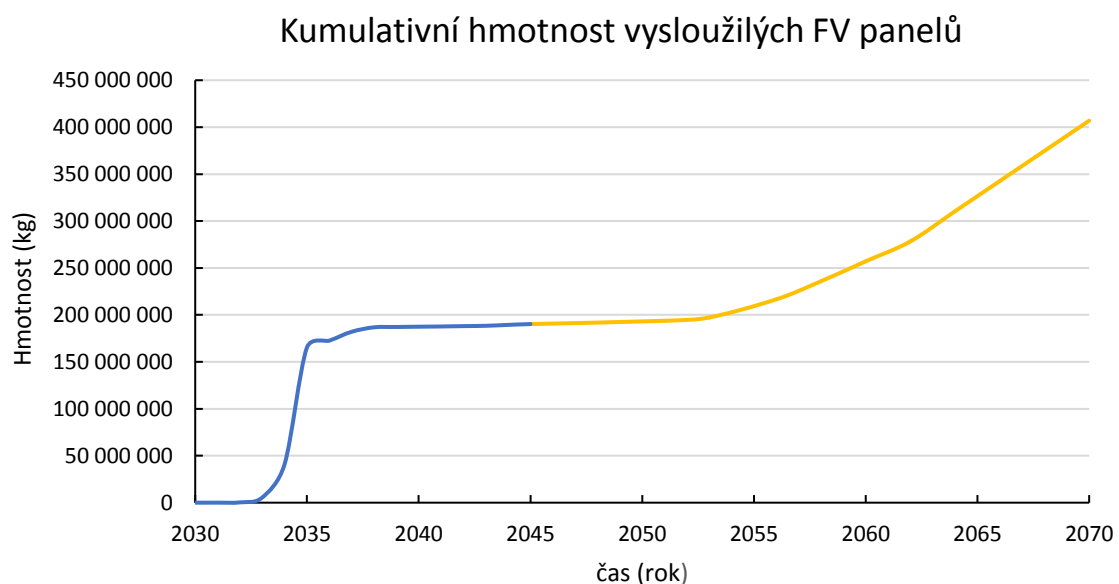
Rok instalace	Instalovaný výkon (MWp)	Odhadovaný rok recyklace	Odhadované množství vyřazených panelů (ks)	Hmotnost panelů (kg)
do 2005	0,1	2030	515	9 019
2006	0,2	2031	1 030	18 037
2007	3,4	2032	17 512	306 636
2008	57,5	2033	296 153	5 185 752
2009	393,6	2034	2 027 231	35 497 599
2010	1378,3	2035	7 098 915	124 304 728
2011	80,6	2036	415 129	7 269 071
2012	105	2037	540 801	9 469 634
2013	52,6	2038	270 916	4 743 836
2014	4,1	2039	21 054	368 670
2015	3,0	2040	15 292	267 768
2016	3,1	2041	15 887	278 194
2017	3,9	2042	20 052	351 126
2018	3,8	2043	19 358	338 968
2019	10,9	2044	56 331	986 380
2020	9,3	2045	47 995	840 403
2021*	50	2051	200 000	3 536 000
2022	50	2053	200 000	3 536 000
2023	150	2056	600 000	19 287 273
2024	150	2058	600 000	19 287 273
2025	300	2060	1 090 909	21 216 000
2026	300	2062	1 090 909	21 216 000
2027	500	2064	1 818 182	32 145 458
2028	500	2066	1 818 182	32 145 458
2029	500	2068	1 818 182	32 145 458
2030	500	2070	1 818 182	32 145 458

Tabulka 4.2: Odhadované množství vyřazených panelů v budoucnu a jejich hmotnost pro jednotlivé roky instalace (2005–2030); *od roku 2021 je instalovaný výkon odhadovaný

Grafy 4.7, 4.8 a 4.9 znázorňují likvidaci FV odpadu v čase v různě velkých recyklačních linkách (7000, 14 000 a 21 000 tun/rok). Grafy 4.8, 4.10 a 4.12 znázorňují i likvidaci předpokládaných 3000 MW instalovaných v letech 2020–2030, zároveň uvažují o rovnoměrné deinstalaci panelů instalovaných v letech 2009, 2010 a v letech 2025–2030, tak aby došlo k menším nárokům na skladování. Pozn. modrá část křivek v následujících grafech patří stávajícímu reálnému výkonu a žlutá znázorňuje likvidaci dalšího předpokládaného výkonu 3 000 MW.



Graf 4.5: Grafické znázornění nárustu likvidovaných panelů od počátku likvidace (likvidace +25 let)

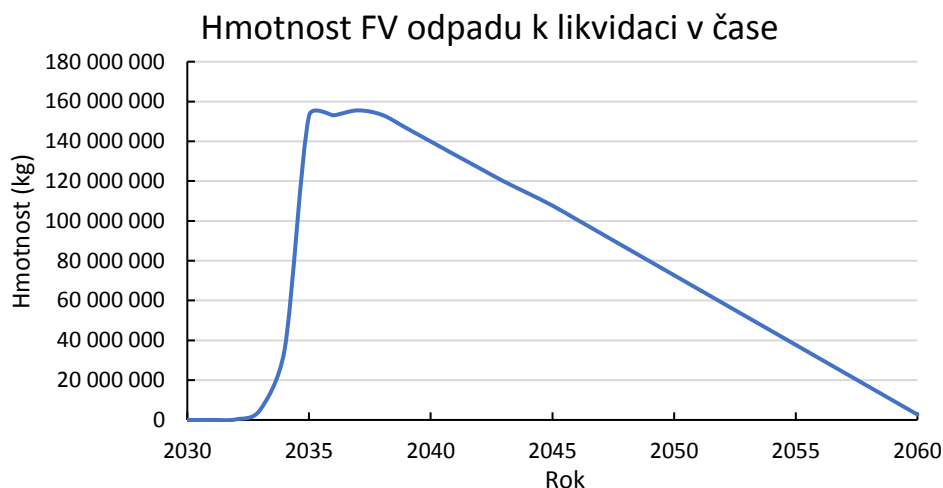


Graf 4.6: Nárůst hmotnosti panelů s koncem životnosti v recyklačním období

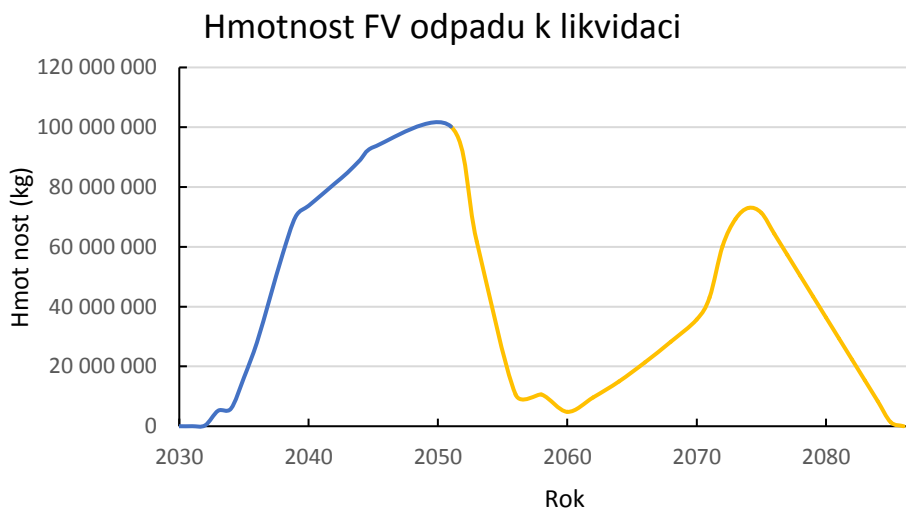
Pro vhodnou projekci likvidace panelů v čase můžeme zauvažovat nad několika možnými scénáři velikosti kapacity sběrných míst a velikosti recyklačních linek na území ČR:

- 7 000 tun/rok

Likvidace FV odpadu ze všech momentálně instalovaných FVE by se protáhla do roku 2060 a to ve scénáři neuvažujeme o instalaci dalšího výkonu po roce 2020.



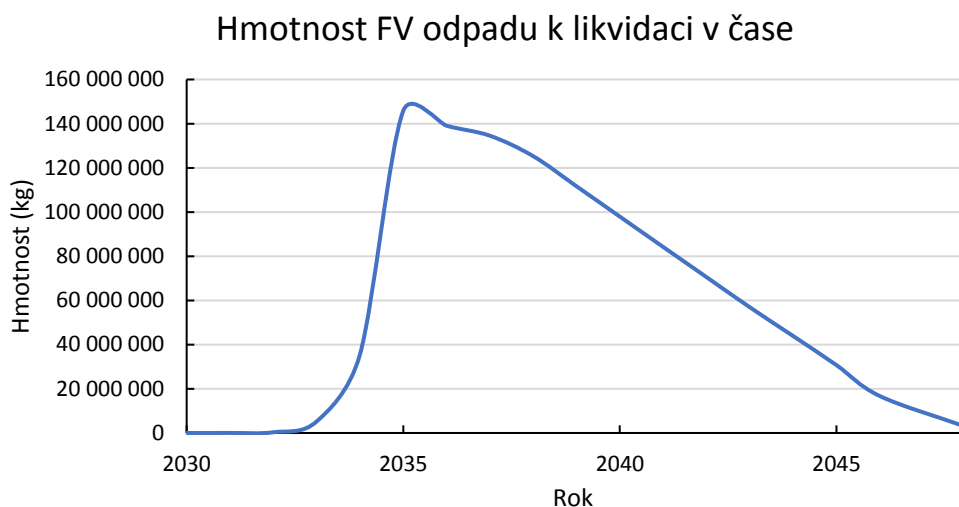
Graf 4.7: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 7 000 tun/rok



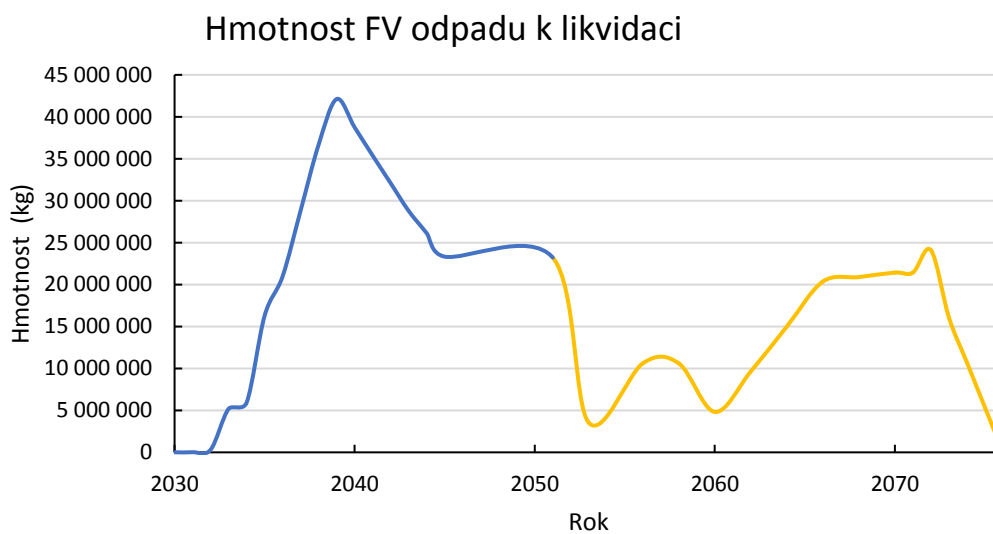
Graf 4.8: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 7 000 tun/rok a postupným nárůstem výkonu na 5 GW do roku 2030

- 14 000 tun/rok

Při likvidaci 14 000 tun ročně by likvidace dosavadního výkonu trvala do roku 2048 (neuvažujeme-li o nárůstu dalšího výkonu v budoucnosti).



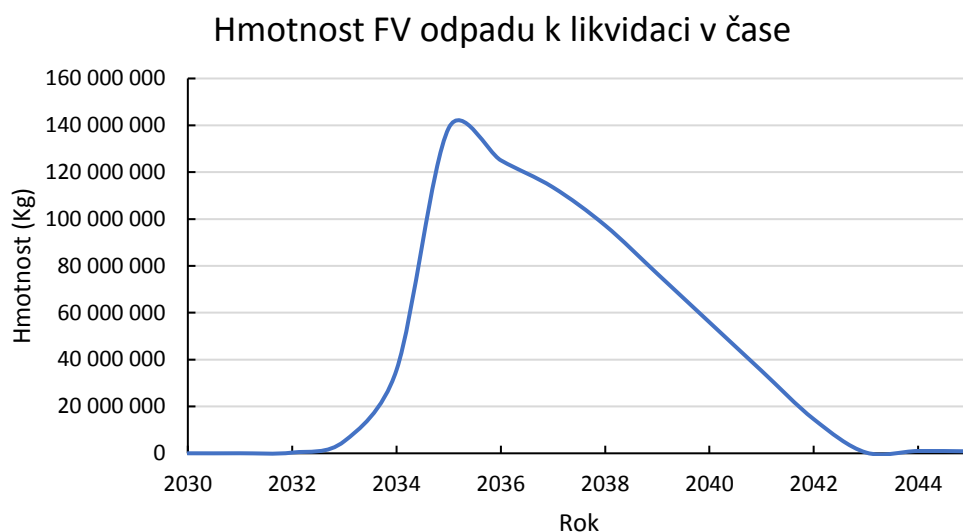
Graf 4.9: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 14 000 tun/rok



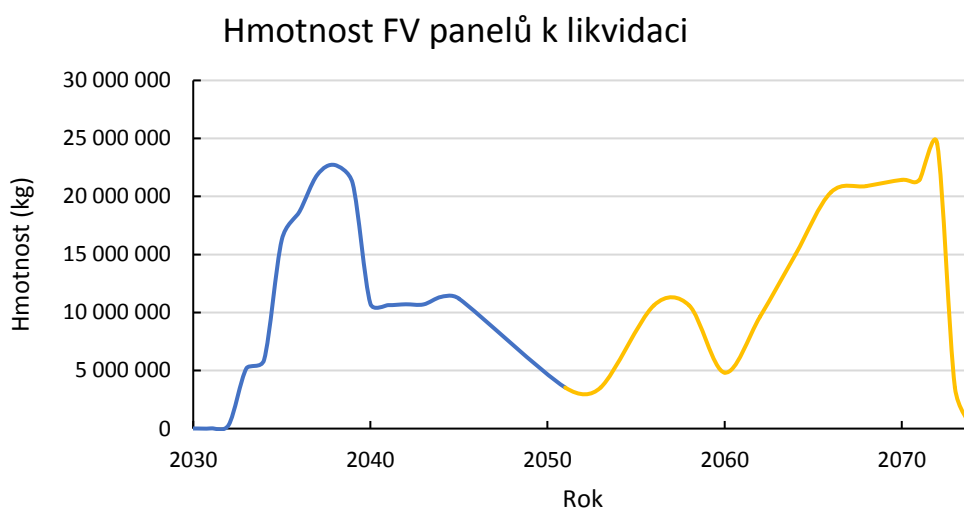
Graf 4.10: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 14 000 tun/rok a postupným nárůstem výkonu na 5 GW do roku 2030

- 21 000 tun/rok

Při velikosti kapacity recyklace 21 000 tun/rok se panely nahromaděné v letech okolo roku 2035 zlikvidují za cca 8 let.



Graf 4.11: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 21 000 tun/rok



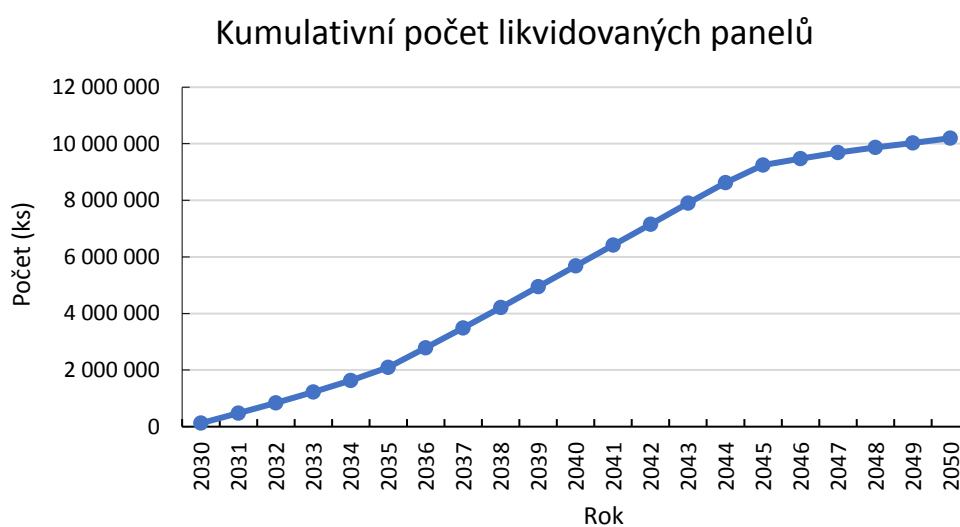
Graf 4.12: Hmotnost FV odpadu k likvidaci v čase za předpokladu fungování recyklačních linek s maximální kapacitou 21 000 tun/rok a postupným nárůstem výkonu na 5 GW do roku 2030

Projekce dle NKEP

Projekce dle NKEP uvažuje o průměrné hmotnosti panelů 202,5 Wp a průměrné hmotnosti panelu 17,68 kg.

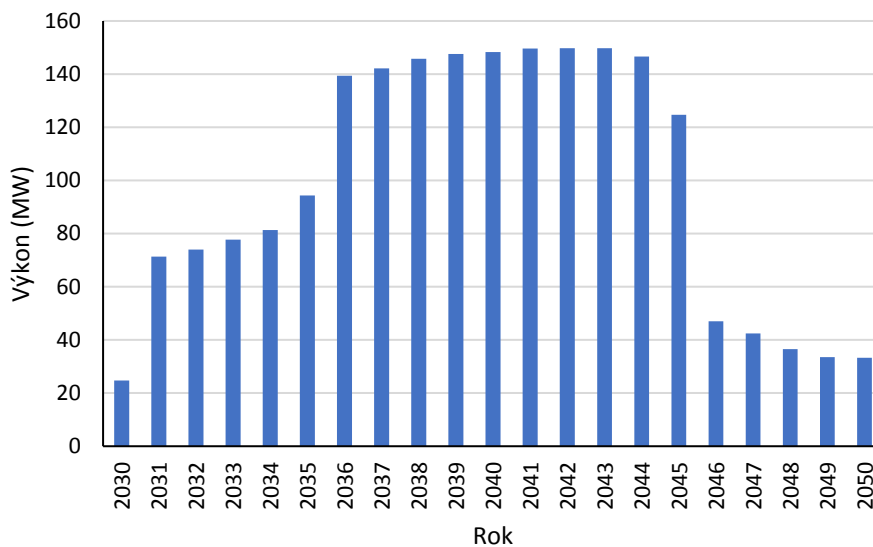
Rok	Likvidovaný výkon (MW)	Počet panelů (ks)	Hmotnost (kg)
2030	24,8	122 720	2 169 694,9
2031	71,3	353 022	6 241 424,2
2032	74	366 521	6 480 085,4
2033	77,7	384 614	6 799 967,4
2034	81,3	402 696	7 119 662,5
2035	94,3	466 998	8 256 521,9
2036	139,4	690 274	12 204 041,8
2037	142,2	703 818	12 443 493,5
2038	145,7	721 450	12 755 229,5
2039	147,6	730 750	12 919 665,7
2040	148,4	734 408	12 984 324,9
2041	149,6	740 510	13 092 221,6
2042	149,7	741 192	13 104 278,4
2043	149,7	741 181	13 104 075,1
2044	146,6	725 833	12 832 728,7
2045	124,7	617 327	10 914 342,5
2046	47	232 645	4 113 165,8
2047	42,4	210 070	3 714 043,4
2048	36,5	180 661	3 194 088,2
2049	33,5	165 934	2 933 710,5
2050	33,3	164 821	2 914 034,1

Tabulka 4.3: Předpoklad likvidace vytvořený dle NKEP



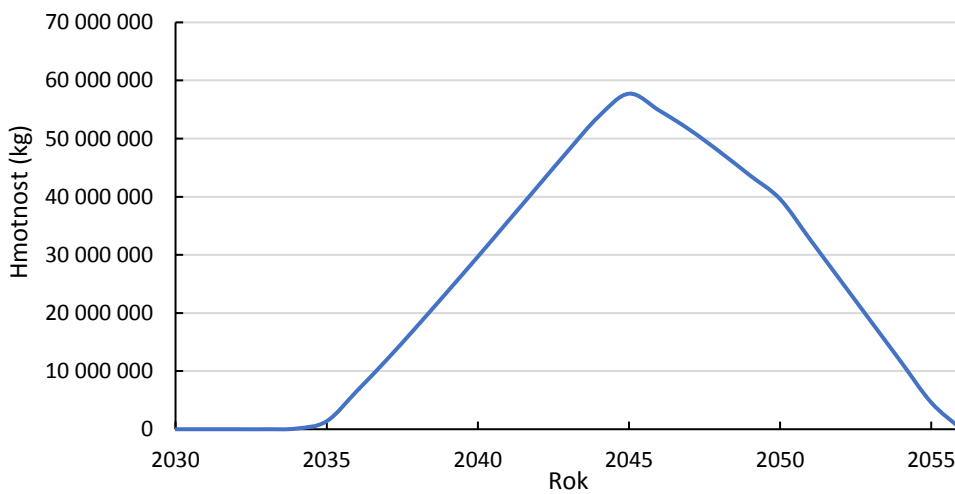
Graf 4.13: Bodový graf vyjadřující nárůst počtu likvidovaných panelů

Výkon likvidovaných FVE v jednotlivých letech



Graf 4.14: Výkon likvidovaných/recyklovaných FVE v jednotlivých letech

Průběh recyklace v čase (hmotnost FV odpadu)



Graf 4.15: Hmotnost FV odpadu k recyklaci v čase

4.2 Materiálová analýza

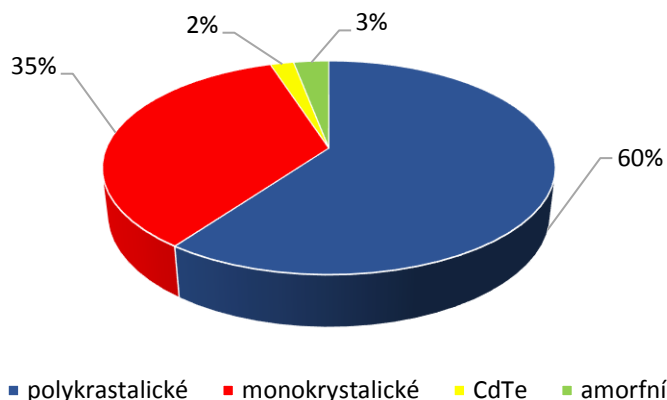
Předpokládá se, že náklady na likvidaci fotovoltaického odpadu budou pokryty ziskem z prodeje recyklovaných materiálů, zejména stříbra, mědi, hliníku, křemíku a skla. Pro odhad materiálové výnosnosti byl použit průměrný obsah materiálů v používaných typech FV panelů u nás.

Průměrné složení materiálu fotovoltaických panelů (krystalických i tenkovrstvých) v ČR je uvedeno v tabulce:

Obsah materiálů				
Typ panelu:	Monokrystalický		Polykrystalický	
Sklo	11,6 kg		13,7 kg	
Hliník	1,19 kg		1,73 kg	
Křemík	0,36 kg		0,51 kg	
EVA	1,2 kg		1,4 kg	
Tedlar	13 g		15 g	
Stříbro	20 g		20 g	
Měď	0,7 kg		0,75 kg	
Cín	6,7 g		7,7 g	
Olovo	3,8 g		4,3 g	
Ostatní	cca 0,5 kg		cca 0,5 kg	
Typ panelu:	CdTe (bezrámový)	CI(G)S (bezrámový)	Amorfnní (bezrámový)	Amorfnní (s rámem)
Sklo	10,9 kg	13,9 kg	22,6 kg	15,6 kg
Hliník	< 1 %	0,3 g	0,8 g	1,35 kg
Křemík	-	-	5 g	4,5 g
EVA	0,3 kg	0,3 kg	0,6 kg	0,6 kg
Tedlar	-	-	-	13 g
Měď	0,27 kg	0,33 kg	0,33 kg	0,47 kg
Vzácné kovy	Te – 4,5 g	Mo – 3,9 g Sb – 0,05 g In – 2,7 g Ga – 1,7 g Se – 3,7 g	-	-
Toxické látky	CdTe – 8,42 g CdS – 0,2 g (4,1 g Cd)	CdS – 0,046 g (0,035 g Cd)	-	-
Další látky	SnO ₂ – 1,7 g	ZnO – 4,3 g (3,5 g Zn)	SnO ₂ – 13,3 g	SnO ₂ – 12,5 g
Ostatní	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg	cca 0,5 kg

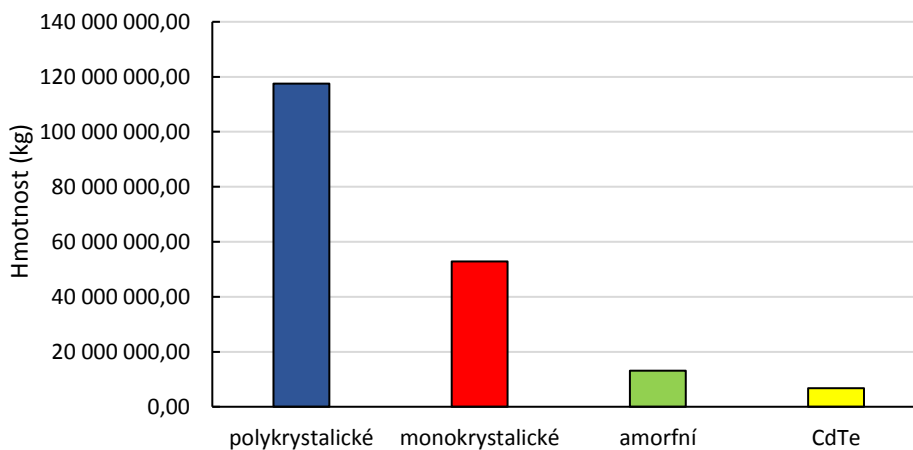
Tabulka 4.4: Tabulka udávající průměrné složení různých typů fotovoltaických panelů na území ČR [64]

Podíl jednotlivých technologií na FVE v ČR



Graf 4.16: Podíl jednotlivých technologií článků v ČR (články CIS/CIGS mají zanedbatelný podíl na celkovém výkonu) [64]

Hmotnost recyklovaného FV odpadu



Graf 4.17: Souhrnná hmotnost různých typů likvidovaných panelů v předpokládaném období průběhu likvidace

Druhotná surovina	Účinnost recyklace (%)	Vstup (kg)	Výstup (kg)
stříbro	65	193 686,2	125 896,0
měď	90	7 493 753,3	6 744 377,9
hliník	100	15 420 693,8	15 420 693,8
křemík	85	4 437 032,3	3 771 477,5
sklo	97	143 529 407,0	139 223 524,8
cín	90	71 203,2	64 082,9
olovo	90	39 959,5	35 963,6
telur	95	2 531,2	2 404,7

Tabulka 4.5: Účinnost recyklačního procesu, vstupní a výstupní hmotnosti materiálu při recyklaci; *účinnost recyklace dle [64]

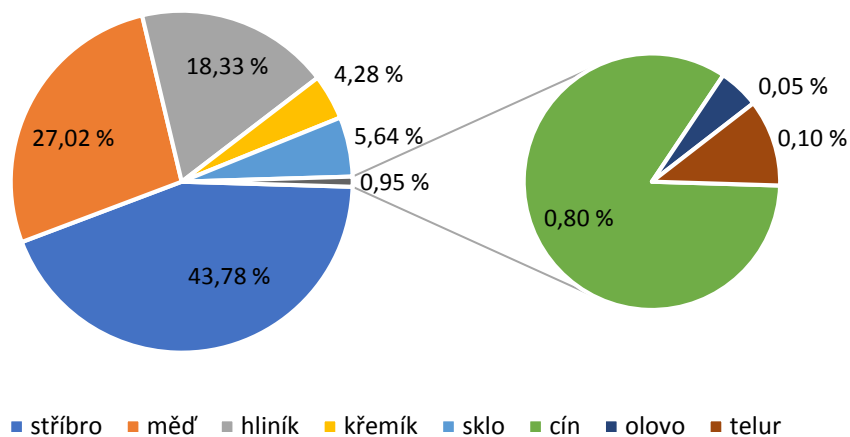
Komodita	Cena -20 % (Kč)	Aktuální cena (Kč)	Cena +20 % (Kč)
stříbro	10 299,2	12 874	15 448,8
měď	118,64	148,3	177,96
hliník	35,2	44	52,8
křemík	33,6	42	50,4
sklo	1,2	1,5	1,8
cín	368	460	552
olovo	40	50	60
telur	1 280	1 600	1 920

Tabulka 4.6: Ceny komodit použitých při odhadu výnosu z recyklovaných materiálů; * cena dle [65]

Komodita	Výnosy -20 % (Kč)	Výnosy (Kč)	Výnosy +20 % (Kč)
stříbro	1 296 628 140	1 620 785 175	1 944 942 210
měď	800 152 997	1 000 191 246	1 200 229 495
hliník	542 808 422	678 510 527	814 212 633
křemík	126 721 643	158 428 454	190 082 465
sklo	167 068 230	208 835 287	250 602 345
cín	23 582 497	29 478 121	35 373 745
olovo	1 438 543	1 798 179	2 157 81
telur	3 077 961	3 847 452	4 616 943
Celkem	2 961 478 434	3 701 874 442	4 442 217 650

Tabulka 4.7: Výnosy jednotlivých materiálů za celou dobu recyklace (uvažuje se o jejich nejvyšší čistotě)

Výnos z prodeje recyklované druhotné suroviny



Graf 4.18: Graf vyjadřující podíl jednotlivých materiálů na celkovém výnosu z prodeje recyklovaných materiálů

4.3 Odhad potřeb realizátora

Potřeby budoucích zřizovatelů recyklace lze rozdělit na lidské zdroje, logistické potřeby a technicko-ekonomické potřeby. Potřeby technické (související s elektřinou, chemikáliemi a emisemi) jsou uvedeny pro recyklační proces projektu FREL P (tabulky 4.10, 4.11 a 4.12).

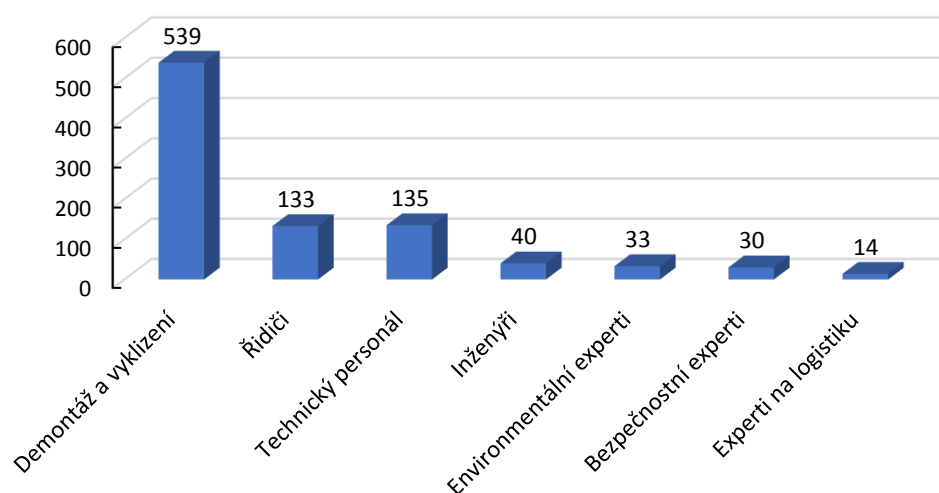
4.3.1 Lidské zdroje

Z dat IRENA byly odhadnuty lidské zdroje na likvidaci/recyklaci dosavadního instalovaného výkonu v ČR. Potřebná práce byla vyjádřena v tzv. člověkodnech (angl. person-day). Člověkoden vyjadřuje práci odvedenou jedním člověkem za jeden pracovní den (zpravidla 8 hodin). Odhadované množství práce je rozděleno dle zaměstnání a dle jednotlivých fází procesu.

	Plánování	Demontáž	Likvidace	Vyklizení	Celkem
Dělníci	-	84 372	31 640	42 186	158 198
Řidiči	-	31 218	-	-	31 218
Inženýři (technici)	1 266	6 750	-	1 687	9 703
Environmentální experti	1 055	3 375	1 687	1 687	7 804
Bezpečnostní experti	-	3 375	1 687	1 687	6 750
Experti na logistiku	1 055	-	2 531	-	3 586
Celkem	3 375	129 089	37 546	47 248	217 258

Tabulka 4.8: Odhadované množství práce na procesu likvidace/recyklace dle jednotlivých aktivit a zaměstnání (vyjádřeno v tzv. člověkodnech)

Z tabulky byl dále proveden odhad přesných počtů zaměstnanců, kteří postačí ke zlikvidování celého tuzemského výkonu FVE během jednoho roku (235 pracovních dní).



Graf 4.19: Odhady počtu zaměstnanců, kteří se budou podílet na likvidaci/recyklaci

4.3.2 Logistické potřeby a potřeby na transport

Demontované panely z FVE bude potřeba dopravit na místo jejich recyklace. Na tyto účely bude nutno použít nákladních vozidel. Transport panelů z velkých pozemních FVE budou zajišťovat kamiony, k FVE s menším počtem panelů mohou vyjíždět dodávky typu solo. Na dopravu vyřazených panelů z instalací o nejnižších výkonech (např. střešní instalace na rodinných domech) postačí dodávka.



Obrázek 4.1: Tvar nákladních vozidel používaných k přepravě FV panelů (zleva doprava – kamion, solo, dodávka) [66]

Kamiony mají ložnou plochu 13,6 m a jejich nosnost je v ČR 24 t. Běžný návěs dokáže pojmout 34 europalet a výšku má většinou 2,6 m. Kamiony s výškou návěsu 3 m se označují pojmem mega a jejich objem je 100 m³. Nákladní vozidla označována jako malé solo mají standardní rozměry 6 x 2,5 x 2,5 m (délka x šířka x výška) a nosnost 3,5 t. Velké solo je delší, má délku ložné plochy 9 m a nosnost 12 tun, ačkoli pobere méně nákladu je provozně skoro stejně drahé jako kamion. [66]

Typ nákladního vozidla	Nosnost (t)	Maximální počet panelů (ks)	Hmotnost panelů (kg)
Kamion (klasický)	24	912	16 124
Kamion (mega)	24	1 080	19 094
Malé solo	3,5	180	3 182
Velké solo	12	550	9 724
Dodávka	1,5	79	1397

Tabulka 4.9: Počet standardních krystalických panelů a jejich hmotnost při plném naložení nákladních vozidel [66]

Vyložení materiálu, který bude dopraven na recyklační linku proběhne pomocí vysokozdvížných vozíků. Při každé vykládce kamionu půjde o cca 30 palet s panely.



Obrázek 4.2: FV panely na paletě

4.3.3 Procesní potřeby

Elektřina

Na provoz recyklační linky budou kromě pracovní síly zapotřebí i zařízení ke zpracování všech druhů materiálů, elektřina potřebná k jejich chodu a chemikálie na elektrochemické procesy v závěru celé likvidace.

Proces	Spotřeba (kWh/t)
Odstranění rámu	5,33
Delaminace	48,01
Stříhání	0,25
Rafinace skla	3,2
Elektrochemické procesy	56,76
Celkem	113,55

Tabulka 4.10: Elektřina potřebná k hlavním procesům při recyklaci FV panelu (uvedeny kWh na tunu FV odpadu) [59]

Chemikálie

Při procesech jako elektrolýza, neutralizace nebo kyselé loužení je použito kyseliny dusičné, hydroxidu vápenatého a značného množství vody.

Chemikálie:	Proces	Spotřeba (kg/t)
HNO ₃	Kyselé loužení	7,08
Ca(OH) ₂	Neutralizace	36,5
H ₂ O	Loužení, elektrolýza, neutralizace	309,71

Tabulka 4.11: Spotřeba chemikálií na tunu FV odpadu [59]

Emise a skládkování

Typ emise nebo odpadu	Odpad (kg/t)	Celkem (kg)
Znečištěné sklo	14	2 375 905
Popílek (nebezpečný odpad)	2	339 415
Kapalný odpad	306,13	51 952 559
Kal (nebezpečný odpad)	50,25	8 527 802
NO _x	2	339 415

Tabulka 4.12: Množství odpadu a emisí odpovídající likvidaci nynějšího výkonu FVE dle procesu FRELP [59]

4.4 Socio-ekonomické zhodnocení FRELP procesu

Cena recyklace 1 kg odpadu ze solárních panelů (P) se řídí následujícím vzorcem:

$$P = N_{os} + N_{př} + N_{zpr} + N_{adm} - P_{ds}$$

N_{os} = náklady na zpětný odběr a oddělený sběr 1 kg odpadu ze solárních panelů = deinstalace

$N_{př}$ = náklady na zajištění logistiky 1 kg odpadu ze solárních panelů = přeprava

N_{zpr} = cena na zpracování 1 kg odpadu ze solárních panelů = recyklace

N_{adm} = náklady na administrativu 1 kg odpadu ze solárních panelů = administrativa

P_{ads} = výnosy z prodeje recyklovaných druhotných surovin získaných z 1 Kg odpadu ze solárních panelů = výnos z recyklace

V následujících tabulkách jsou uvedeny procesní náklady (bez investičních nákladů) na likvidaci krystalických panelů v ČR pomocí recyklačního procesu FRELP.

Zhodnocení je provedeno na základě údajů dostupných k FRELP procesu. V tomto zhodnocení je tak uvažováno o 95 % instalovaného výkonu tj. 2003,8 MW a neuvažuje tak podíl tenkovrstvých panelů.

Náklady na zpětný odběr zahrnují náklady na práci zaměstnanců účastnících se demontáže:

Zaměstnání	Demontáž a vyklizení	Počet zaměstnanců (235 pracovních dní)	Plat (Kč/měsíc)	Náklady (Kč)
Dělníci	120 230	512	23 000	141 206 415
Inženýři	8 015	34	33 000	13 506 380
Environmentální experti	4 809	20	40 000	9 822 434
Bezpečnostní experti	4 809	20	40 000	9 822 434
Celkem	137 863	587	-	174 357 664

Tabulka 4.13: Náklady na potřebný počet zaměstnanců podílejících se na demontáži a vyklizení (* výše platů odhadnuta autorem)

Náklady na transport panelů, budou záviset od vzdálenosti uražené nákladními vozy mezi FVE a místem recyklace. Dalším faktorem je cena za km dopravy. Vzdálenosti přepravy jsou odhadované a budou násobně větší, pokud budou recyklační linky rozmístěny neefektivně nebo jich bude málo.

Typ vozidla	Výkon (W)	Počet výjezdů	Cena (Kč/km)	Vzdálenost (km)	Náklady (Kč)
Kamion	184 224	9354	25,5	100	23 852 700
Velké solo	111 100	541	24	80	551 820
Malé solo	36 360	3858	17	60	7 407 360
Dodávka	15 958	5023	12,5	40	2 511 500
Celkem					34 323 380

Tabulka 4.14: Náklady na transport panelů z FVE na místo zpracování; * cena dle [66]

Procesní náklady na zpracování panelů budou zahrnovat náklady na elektřinu a potřebné chemikálie a budou se odvíjet od cen elektřiny a cen chemikálií. V uvažovaných nákladech je počítáno s cenou elektřiny 3,4 Kč/kWh.

Proces	Spotřeba (kWh/t)	Spotřeba celkem (kWh)	Náklady (Kč)
Odstranění rámu	5,33	904 541	3 075 439
Delaminace	48,01	8 147 657	27 702 035
Stříhání	0,25	42 427	144 251
Rafinace skla	3,2	543 064	1 846 418
Elektrochemické procesy	56,76	9 632 598	32 750 834
Celkem	113,55	19 270 287	65 518 977

Tabulka 4.15: Náklady na spotřebu elektrické energie určené na provoz recyklační linky

Výdaje na chemikálie potřebné k elektrochemickým procesům byly určeny dle velkoobchodních cen za tunu kyseliny dusičné a hydroxidu vápenatého. Cena za vodu je průměrná v ČR pro rok 2020.

Chemikálie	Cena (Kč/t)	Spotřeba (kg/t)	Spotřeba celkem (kg)	Náklady (Kč)
HNO ₃	11 550	7,08	1 201 529	13 877 662
Ca(OH) ₂	3750	36,5	6 194 324	23 228 715
H ₂ O	91,2	309,71	52 560 112	4793 482
Celkem	15 391,2	353,29	59 955 965	41 899 859

Tabulka 4.16: Výdaje na chemické procesy v průběhu recyklace; * ceny odhadnuty autorem

Při recyklaci vzniká i značné množství odpadu jako znečištěné sklo, kapalný odpad nebo nebezpečný odpad v podobě kalu a popílku. Při elektrolýze jsou emisemi uvolňující se NO_x plyny.

Typ emise nebo odpadu	Cena za uložení (kč/t)	Odpad (kg/t)	Celkem (kg)	Náklady (Kč)
Znečištěné sklo	1270	14	2 375 905	3 017 399
Popílek (nebezpečný odpad)	9850	2	339 415	1 238 865
Kapalný odpad	1415	306,13	51 952 559	73 512 871
Kal (nebezpečný odpad)	3650 + 6200	50,25	8 527 802	31 126 478
NO _x	-	2	339 415	-

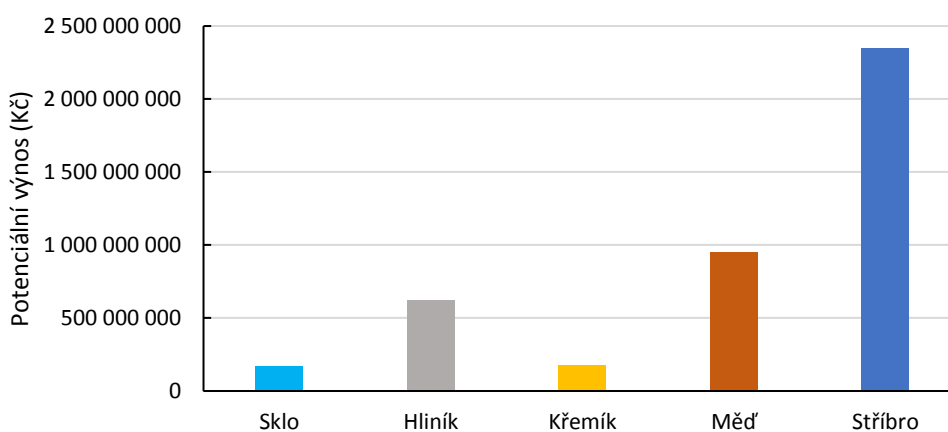
Tabulka 4.17: Náklady na skládkování různých druhů odpadu; *ceny dle [67]

Výpočet výnosu z materiálů obsažených v křemíkových krystalických panelech byl proveden s cenami komodit z tabulky 4.5. Zároveň je uvažováno jen o hlavních materiálech, které lze ve FREL P procesu regenerovat.

Materiál	Výnos/ t FV odpadu (kg)	Výnos celkem (kg)	Výnos celkem (Kč)
Sklo	651,3	110 533 681,9	165 800 523
Hliník	82,7	14 040 049,1	617 762 161
Křemík	24,8	4 212 394,8	176 920 580
Měď	37,6	6 385 438,7	946 960 557
Stříbro	1,1	182 065	2 343 904 679
Celkem	797,6	135 353 629,5	4 251 348 499

Tabulka 4.18: Výnos z recyklovaných materiálů v procesu FREL P

Potenciální výnos materiálů



Graf 4.20: Výnos z recyklace materiálů v procesu FREL P

Položka	Náklady celkem (Kč)	Výše (Kč/kg)	Výše (Kč/panel)
Deinstalace	174 357 664	1	17,6
Recyklace	216 314 449	1,2	21,8
Logistika	34 323 380	0,2	3,5
Výnos z recyklace materiálů	4 251 348 499	25	439

Tabulka 4.19: Celková výše pouze provozních nákladů na deinstalaci, chemikálie, elektřinu (recyklace) a náklady na uložení odpadu v porovnání s výnosem z likvidace 2003,8 MW krystalických panelů procesem FREL P

5 DISKUSE

V první z uvedených projekcí se předpokládá, že recyklace velkých pozemních FVE bude v budoucnu probíhat přibližně přímo úměrně tomu, jak byly v jednotlivých letech kdysi instalovány. Je tak jisté, že okolo roku 2040 budou likvidovány FVE, které byly instalovány v letech fotovoltaického boomu 2009 a 2010. Růst jednotlivých instalací znázorněný grafem 4.3 ukazuje, že v posledních letech provozní podpory (tj. 2012 a 2013) bylo instalováno mnoho FVE s menším výkonem (střešní instalace).

Při výpočtu předpokládaného množství recyklovaného materiálu v budoucnu bylo nutné vycházet z výkon a hmotnosti průměrného panelu v ČR. Krystalické panely dostupné v letech fotovoltaického boomu měly výkon od 120 Wp do 250 Wp a vážily od 11,9 kg do 24 kg. Většina fotovoltaických panelů nainstalovaných v ČR jsou krystalické, je to až 95 % všech panelů. Zbýlých pět procent tvoří panely tenkovrstvé, z toho 2 % jsou zastoupeny panely s CdTe články a 3 % panely s amorfními články. Podíl panelů s články CI(G)S na celkovém výkonu je na našem území zanedbatelný.

To kdy se panely objeví na recyklačních linkách ovlivní jak jejich životnost, tak i kapacita recyklačních linek, které panely budou zpracovávat. Jak již bylo zmíněno, životnost standardních panelů udávaná výrobcí bývá většinou 25 nebo 30 let. Kapacita pro recyklaci panelů v budoucnu je zatím nejistá. Okolo roku 2035 (počítáme-li s životností všech typů panelů 25 let) by mohl nastat začátek soustavné likvidace stávajícího instalovaného výkonu na našem území. První projekce tak počítá s nahromaděním FV odpadu, který by musel být skladován v rozlehlých venkovních prostorách, odkud by byl odvážen na recyklační linku. Kromě životnosti však hraje roli i délka trvání licence ERÚ na výrobu elektřiny, která je u velkých pozemních FVE taktéž 25 let. Po uplynutí této doby už nebude pro provozovatele platit podpora s vysokými výkupními cenami, budou se tak muset rozhodnout, zda svoji FVE zlikvidovat nebo nechat bez rekonstrukce a pokračovat v provozu i přes menší ekonomickou výhodnost.

Projekce dle NKEP počítá s likvidací FVE tak jak vychází z obrázku 3.25. Jde tedy o postupnou demontáž a rovnoměrné rozložení likvidace dnešních FVE na dobu 20 let. Přičemž od roku 2036 do roku 2044 by bylo likvidováno okolo 140 MW instalovaného výkonu ročně, což by vyhovovalo kapacitě recyklačních linek 14 000 tun/rok. Kdyby probíhala likvidace dle této projekce, nevznikaly by tak velké nároky na uskladnění dalších vysloužilých panelů tak jako v první projekci, kde se počítá se zvýšením FV odpadu na více než 140 000 tun v krátkém časovém období.

Pro odhadovaný výnos z prodeje již recyklovaného materiálu byly použity aktuální ceny těchto komodit. Materiálem, kterého zůstane po likvidaci panelů nejvíce bude bez pochyb sklo, které tvoří v průměru cca 74 % hmotnosti standardního krystalického panelu (u CIS panelů dokonce až 93 %). Účinnost recyklace skla je téměř 100 %, přičemž cena čírého již recyklovaného skla je asi 1 500 Kč/t a cena znečištěného skla se pohybuje do 10 Kč/t. Recyklované číré sklo z panelů v ČR by tak mělo dosáhnout hodnoty přes 200 miliard Kč. Prodej znečištěného skla z mechanické likvidace panelů (downcyclingu) lze využít např. jako přísadu do stavebních materiálů.

Nejvýnosnější materiál obsažený ve fotovoltaických panelech je stříbro. Ačkoli je v každém krystalickém panelu v průměru asi jen 20 g stříbra, tak hodnota výnosu z jeho prodeje bude přesahovat 1,6 miliard Kč (při ceně 12 874 Kč/kg a uvažované účinnosti recyklace 65 %), což bude 43,78 % z celkového výnosu. Více než miliardový výnos by měl poskytnout i prodej recyklované mědi (podíl 27,02 % na celkovém výnosu) a třetím nejvýnosnějším materiálem bude hliník z ráků (18,33 % z celkového výnosu). Lze tedy tvrdit, že regenerované materiály na nejvyšší možnou čistotu budou mít hodnotu 3–4,4 miliardy Kč.

Celý proces likvidace a recyklace fotovoltaických elektráren bude probíhat v několika fázích. První fází je demontáž všech panelů z nosné konstrukce u pozemní FVE nebo ze střechy rodinného domu. Demontáž panelů bude obecně nejnáročnější úsek celé likvidace a bude představovat 60 % z celkové sumy práce všech aktivit podílejících se na likvidaci FVE. Kolektivní systémy nebo jiní zřizovatelé recyklace tak budou potřebovat na demontáž zejména velkých pozemních elektráren dostatečné množství pracovníků.

Z analýzy lidských zdrojů vyplývá, že jen demontáž a následné vyklizení by mohlo zvládnout za jeden rok 539 pracovníků v případě že by pracovali 235 dní v roce. Dále by bylo na likvidaci zapotřebí 133 řidičů, 135 pracovníků na recyklačních linkách, 40 inženýrů (techniků), 33 environmentálních expertů, 30 bezpečnostních expertů a 14 expertů na logistiku. Práce technického personálu, inženýrů a dalších expertů bude však rozložena v delším časovém úseku. O tom, jak bude rozložena rozhodnou kapacity recyklačních linek.

Druhá fáze procesu recyklace bude představovat transport vysloužilých panelů na sběrná místa. Ze sběrných míst budou panely přijímány na recyklační linky. Nejlepší variantou se jeví mít sběrné místo poblíž nebo přímo na recyklační lince, aby nedocházelo ke zbytečným nákladům na transport panelů ze sběrného místa na místo jejich zpracování. K odhadnutí náročnosti transportu byly provedeny výpočty týkající se nosnosti vozidel s nákladem FV odpadu. Je zřejmé, že transport panelů bude probíhat z větší části pomocí kamionů, které se podílejí na svozu panelů z velkých pozemních FVE. Kamiony by mohly pojmout okolo 1000 ks panelů nebo i více, kdyby proběhla demontáž hliníkových ráků ještě před naložením panelů do nákladového prostoru. K převozu panelů z menších elektráren by mohla posloužit vozidla typu solo, která mohou vézt cca 200–500 FV panelů ve svém nákladním prostoru.

Třetí fází je recyklace všech možných materiálů z panelu, tak aby dosahovaly požadované čistoty a daly se dodat zpracovatelům. Proces FRELP byl zhodnocen porovnáním procesních nákladů s výnosy z prodaných recyklovaných materiálů. Výnosy z prodaného skla, hliníku, křemíku, mědi a stříbra budou ve výši více jak 4 miliard Kč. Výnos z jednoho kg FV odpadu bude 25 Kč a z jednoho panelu 439 Kč. Procesní náklady jsou oproti výnosu z regenerovaných materiálů nízké, ovšem nejsou zde zahrnuty investiční náklady jejichž výše bude v budoucnu záviset na velikosti (kapacitě) recyklačních linek.

Poslední fází bude vyklizení plochy od konstrukcí po panelech (týká se velkých pozemních FVE), které však bude probíhat pouze pokud se provozovatel rozhodne, že nebude instalovat panely nové. Vyklizení by mohlo proběhnout pomocí skrejprů, které provedou orbu a zeminu rozprostřou. Následně by mohla být na ploše provedena fyto-remediace a to zejména v případě bude-li plocha sloužit k zemědělským účelům.

Na závěr můžeme zhodnotit odlišné přístupy k recyklaci porovnáním nákladů a výnosů (náklady jsou uvažovány pro recyklační linku s kapacitou 7000 tun FV odpadu/rok):

Downcycling je přístupem, který může být použitelný při likvidaci panelů v určité oblasti, tak aby nedocházelo ke zbytečným výdajům na transport. Ze všech přístupů je tento nejméně nákladný a odhaduje se na cca 1 866 750 000 Kč na výkon 2109,3 MW. Při recyklační účinnosti skla 10 %, hliníku 100 % a mědi 72 % by mohl výnos z materiálů činit cca 1 500 192 935 Kč. Čistá cena recyklace by pak byla 366 577 065 Kč (33 Kč/panel).

Mechanicko-chemická recyklace postupem FRELP procesu je jediným směrem recyklace, který by mohl být i rentabilní. Náklady na likvidaci všech krystalických křemíkových panelů (2003,8 MW) by měly být ve výši cca 3 911 757 976 Kč a výnos z recyklovaných materiálů v procesu FRELP byl odhadnut na cca 4 251 348 499. To znamená, že by recyklace vynesla asi 31 Kč za každý zlikvidovaný panel.

Recyklace termickou metodou je nejnákladnější způsob ze všech. Náklady by měly dosáhnout 5,7 miliard Kč, ale výnos nebude o moc lepší jak u varianty s procesem FRELP. Výnos z recyklace materiálů se odhaduje podobný jako u mechanicko-chemické recyklace (FRELP proces). Proto by dosáhla čistá cena recyklace 1,4 miliard Kč (129 Kč/panel).

Zpracování FV panelů	Náklady (Kč/tuna FV odpadu)	Náklady celkem na výkon v ČR (Kč)	Výnos z recyklace materiálů (Kč)	Čistá cena recyklace (Kč)
Downcycling	9 825	1 866 750 000	1 500 192 935	366 577 065
FRELP	23 050	3 911 757 976	4 251 348 499	-339 590 523
Termální recyklace	30 000	5 700 000 000	4 300 000 000	1 400 000 000

Tabulka 4.20: Náklady, výnos a čistá cena odlišných metod recyklace; * náklady dle [34]

6 ZÁVĚR

Byly provedeny potenciální projekce likvidace panelů v čase. První projekce (projekce likvidace po 25 letech) počítá s nahromaděním a postupnou likvidací všech panelů, které dosáhnou stáří 25 let. Zároveň jsou v ní zahrnuty scénáře s různě velkými recyklačními linkami fungujícími od roku likvidace FVE instalovaných v letech 2009 a 2010. Předpokládají se také téměř neomezené kapacity pro skladování před recyklací, jelikož by došlo k nahromadění většiny výkonu během krátké doby. Linka na 7000 tun FV odpadu ročně by recyklovala stávající výkon po dobu 25 let, na 14 000 tun ročně po dobu 13 let a linka s kapacitou 21 000 tun FV odpadu za rok by stávající FVE zpracovala za 8 let. Projekce dle NKEP ukázala scénář rovnoměrného rozložení demontáže a likvidace FVE v čase. Graf 4.15 ukazuje tak možná nejpřesnější projekci likvidace FVE v u nás, v případě že by byla instalována právě linka na 7000 tun/rok.

Na základě dostupných údajů byla provedena analýza výnosu z prodeje již recyklovaných materiálů dle různých recyklačních účinností (různých recyklačních metod). Z provedených analýz vyplývá, že proces FRELP bude k likvidaci po stránce ekonomické ten nejvhodnější způsob. Na výnosu se bude nejvíce podílet stříbro, měď a hliník. Výnos neovlivní jen cena, ale i recyklační účinnost, která se bude v budoucnu jen zlepšovat. Není tak vyloučeno, že v zavedených recyklačních linkách bude návratnost materiálů větší jak 95 %.

Byly odhadnuty potřeby budoucího realizátora na území ČR v oblasti lidských zdrojů, logistiky, energií a potřebných chemikálií pro proces FRELP. Byly provedeny odhady náročnosti práce (dělníků, řidičů, inženýrů a dalších expertů) pomocí přenesení dat IRENA na výkon 2GW. Pro představu náročnosti práce byl vyhodnocen počet zaměstnanců dostačujících k likvidaci dosavadního výkonu za jeden rok (235 pracovních dní). Nejnáročnější úsek práce na procesu likvidace FVE bude demontáž a bude na ni potřeba zhruba 4x více zaměstnanců jak na údržbu zařízení na recyklačních linkách.

Byly určeny náklady na práci při demontáži, na transport, na elektrickou energii recyklačních procesů, na chemické procesy během recyklace a náklady na skladování různého druhu odpadu. Aby se recyklace zaplatila nebo aby byla výdělečnou bude potřeba postavit pouze jednu recyklační linku o kapacitě 7000 tun/rok (nebo 2-3 o stejné celkové kapacitě). Myslet by se mělo i na jejich umístění z hlediska logistiky a transportu. Výhodné se jeví umístění recyklačních linek v oblastech s větší hustotou velkých pozemních FVE např. v Jihomoravském kraji.

Dalším způsobem, jímž bude možno likvidovat panely by mohl být downcycling s důrazem na recyklaci skla, hliníku a většiny mědi. Zpracování těchto materiálů však musí stačit na splnění legislativních požadavků direktivy WEEE (materiálové i energetické využití 85 % FV odpadu). Díky nižším nákladům na recyklační zařízení by downcycling mohl fungovat na regionální úrovni, což by snížilo náklady na přepravu a mělo by kladný vliv na ochranu ovzduší. Ke splnění legislativních požadavků by mohlo pomoci různé využití frakcí z mechanického drcení panelu. Sklo (i s nečistotami) bude moci posloužit jako filtrační materiál nebo jako příměs do stavebních materiálů. Toto využití také pomůže zabránit skládkování tohoto skla i s obsaženými nečistotami (kovy, plasty) a zároveň dramaticky neovlivní čistou cenu recyklace.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHOWDHURY, Md. Shahariar, Kazi Sajedur RAHMAN, Tanjia CHOWDHURY, et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews* [online]. 2020, **27** [cit. 2020-03-28]. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100431. ISSN 2211467X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211467X19301245>
2. Jäger-Waldau, A., PV Status Report 2019, EUR 29938 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12608-9, doi:10.2760/326629, JRC118058.
3. IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels," International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems
4. The first recycling plant in Europe for solar panels! *Living Circular a place to come together on sustainable development – Veolia Environnement* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.livingcircular.veolia.com/en/industry/first-recycling-plant-europe-solar-panels>
5. BECHNÍK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. TZB-info [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiKa/11652-strucna-historie-fotovoltaiKy>
6. The History of Solar. *Department of Energy* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf
7. *History of Solar Energy* [online]. SOLAR TRIBUNE [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://solartribune.com/history-of-photovoltaics/>
8. JAROSLAV, Kusala. Polovodiče: Miniencyklopedie solární energie. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>
9. ZEKRY, Abdelhalim, Ahmed SHAKER a Marwa SALEM. Solar Cells and Arrays. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* [online]. Elsevier, 2018, 2018, 3-56 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/B978-0-12-812959-3.00001-0. ISSN 9780128129593. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128129593000010>
10. QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:cfbe8df0-1677-11e6-ae73-005056827e51>
11. HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.

12. *Solární (fotovoltaické) články* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
13. KOSMÁK, František. Princip fotovoltaického článku. In: Společnost elektrika.info [online] Praha: Praha, 2018, 2009 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/principfotovoltaickeho-clanku>
14. BECHNÍK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE – fotovoltaika, méně rozšířené technologie. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
15. MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:a12d31b0-7229-11e9-b253-005056827e52>
16. CHMEL, Ladislav a Ivo HAMERNÍK. Fotovoltaika, fototermika [online]. Brno: © Code Creator, 2016 [cit. 2020-04-07]. ISBN 978-80-88058-02-1. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Impresum.html>
17. 4TH GENERATION – 4G SOLAR CELL TECHNOLOGY. *Blackdot Solar / Premier Solar Company in Southern California* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://blvckdotsolar.com/4g-solar-cell-technology/>
18. HASELHUHN, Ralf a Petr MAULE. Fotovoltaické systémy: energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalátéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost. Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017. ISBN 978-80-906281-5-1.
19. JÄGER-WALDAU, Arnulf. Photovoltaics: Status and Perspectives until 2020. *Green* [online]. 2011, 1(3) [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1515/green.2011.027. ISSN 1869876X. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/j/green.2011.1.issue-3/green.2011.027/green.2011.027.xml>
20. AMADOR-BEDOLLA, Carlos, Roberto OLIVARES-AMAYA, Johannes HACHMANN a Alán ASPURU-GUZIĆ. Organic Photovoltaics. *Informatics for Materials Science and Engineering* [online]. Elsevier, 2013, 2013, s. 423-442 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1016/B978-0-12-394399-6.00017-5. ISBN 9780123943996. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123943996000175>
21. Flexible Organic Photovoltaic Cell Market: Latest Report to 2025 | NanoFlex Power Corporation, Jen Research Group, TDK. *Medium* [online]. 2019 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://medium.com/@johnbradly/flexible-organic-photovoltaic-cell-market-latest-report-to-2025-nanoflex-power-corporation-jen-76817dfaebcf>

22. POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Elektro* [online]. 2010, (3) [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu--10310>
23. BECHNÍK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE – fotovoltaika, technologie krystalického křemíku. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5470-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-technologie-krystalickeho-kremiku>
24. *Solární Experti | Vše o solárních panelech* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/>
25. KLIMEK, Petr a Bronislav BECHNÍK. Střídač pro fotovoltaickou elektrárnu. Jakou technologii zvolíte? *TZB-info* [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9555-stridac-pro-fotovoltaickou-elektrarnu-jakou-technologiei-zvolite>
26. Fotovoltaický střídač – účinnost není vše Důležitější je maximální výnos energie. *TZB-info* [online]. 2009 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>
27. Porovnání: Porovnání rozdílů a možností jednotlivých fotovoltaických řešení. *Ostrovní fotovoltaické elektrárny* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.ostrovni-elektrarny.cz/index.php?page=porovnani>
28. POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Vysoce účinné fotovoltaické systémy s trackery a koncentrátory záření. *Alternativní energie* [online]. 2006, (3) [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3542-vysoce-ucinne-fotovoltaicke-systemy-s-trackery-a-koncentratory-zareni>
29. Solární koncentrátory. *Solární panely, solární systémy* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.solar-trackers.com/cz/hrebenove-koncentratory.asp>
30. ZILVAR, Jiří. Agrivoltaika – řešení pro nová solární pole. *TZB-info* [online]. 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/19000-agrivoltaika-reseni-pro-nova-solarni-pole>
31. 28 LEGISLATIVA fotovoltaiky. *CNE Czech Nature Energy, a. s* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/legislativa-fotovoltaiky/>
32. Nová Zelená úsporám – SVP Solar. *SVP Solar* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.svp-solar.cz/dotace-2/nova-zelena-usporam/>
33. BECHNÍK, Bronislav. Legislativa k recyklaci fotovoltaických panelů Srovnání evropské směrnice a českého zákona. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2020-04-18].

Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/8945-legislativa-k-recyklaci-fotovoltaickych-panelu>

34. DENG, Rong, Nathan L. CHANG, Zi OUYANG a Chee Mun CHONG. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, **109**(2), 532-550 [cit. 2020-04-18]. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.020. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119302321>
35. Zpětný odběr světelných zdrojů v rámci kolektivního systému ASEKOL. *Světlo* [online]. 2019, (2), 58 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/zpetny-odber-svetelných-zdroju-v-ramci-kolektivniho-systemu-asekol--3604>
36. Legislativa. *Nezisková organizace ASEKOL* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.asekol.cz/vyrobcu-dovozcu-a-prodejcu/solarni-panely/legislativa/>
37. BECHNÍK, Bronislav. Obnovitelné zdroje: indikativní cíl 8 % elektřiny v roce 2010 splněn. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/energeticka-politika/7240-obnovitelne-zdroje-indikativni-cil-8-elektriny-v-roce-2010-splnen>
38. BECHNÍK, Bronislav. Byly výkupní ceny elektřiny z fotovoltaiky stanoveny přiměřeně? Aneb po bitvě je každý generál. *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9698-byly-vykupni-ceny-elektriny-z-fotovoltaiky-stanoveny-primerene>
39. Stát rozdává lukrativní dotace na fotovoltaiku. *Solární Experti | Vše o solárních panelech* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.solarniexperti.cz/dotace-zelena-usporam-na-fotovoltacke-elektrarny/>
40. Rodinné domy – zdroje energie – Nová zelená úsporám. *Nová zelená úsporám – Dotace pro úsporné bydlení* [online]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/nabidka-dotaci/rodinne-domy-zdroje-energie/>
41. Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu Nová zelená úsporám. In: *Nová zelená úsporám – Dotace pro úsporné bydlení* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí ČR, 2018 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.novazelenausporam.cz/files/documents/storage/2018/09/18/1537271767_NZ%C3%9A_Z%C3%A1vaz%C3%A9%20pokyny%20pro%20C5%BEadatel%20RD%203-v%C3%BDzva_2018-09.pdf
42. Úspory energie – Fotovoltaické systémy s/bez akumulace pro vlastní spotřebu. *OPPIK.cz | Portál operačního programu podnikání a inovace* [online]. Praha [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.oppik.cz/dotacni-programy/uspory-energie-dotace-na-fotovoltaiku>

43. Dotace na fotovoltaiku 2020: Podnikatelé mohou žádat od 13. ledna, domácnosti využijí NZÚ. *Elektrina.cz - vše co potřebujete vědět v oblasti energetiky a technologií* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/dotace-na-fotovoltaiku-2020-a-nova-zelena-usporam>
44. MPO vyhlásilo novou výzvu v programu podpory Úspory energie, podpoří fotovoltaické systémy. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2019 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/aktualni-informace/mpo-vyhlasilo-novou-vyzvu-v-programu-podpory-uspory-energie--podpori-fotovoltaicke-systemy--251519/>
45. BECHNÍK, Bronislav. Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. *TZB-info* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
46. KUTAL, Květoslav a Radek ŠENKAPOUL. Stav FVE v České republice. *Světlo* [online]. 2010, (6) [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42564.pdf>
47. Fotovoltaické elektrárny: Kriteria výběru lokality. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů, z.s.* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/fotovoltaika.htm>
48. STRACHALA, Josef, Dávid HÝLSKÝ a Jiří VANĚK. Nejstarší fotovoltaická elektrárna v České republice Analýza modulů fotovoltaické elektrárny Dukovany. *TZB-info* [online]. 2015 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13447-nejstarsi-fotovoltaicka-elektrarna-v-ceske-republice>
49. KOČ, Břetislav. Nejstarší fotovoltaické elektrárny v ČR vznikaly na střechách a brownfieldech. *TZB-info* [online]. 2019 2015 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18760-nejstarsi-fotovoltaicke-elektrarny-v-cr-vznikaly-na-strechach-a-brownfieldech>
50. Seznam a mapa solárních elektráren v ČR. *Seznam FVE v České republice* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://www.elektrarny.pro/>
51. ČAMBALA, HRUBÝ, MUSELÍK, ŠPAČEK, PROCHÁZKA a HAMÁČKOVÁ. Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE. Solární asociace [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf
52. PV Cycle [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.pvcycle.org/>
53. STRACHALA, David, Josef HÝLSKÝ, Jiří VANĚK, Günter FAFILEK a Kristýna JANDOVÁ. Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. *Acta Montanistica Slovaca* [online].

- 2017, 3(22), 257-269 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_267021.pdf
54. LUNARDI, Marina Monteiro, Juan Pablo ALVAREZ-GAITAN, José I. BILBAO a Richard CORKISH. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Solar Panels and Photovoltaic Materials [online]. InTech, 2018, 2018-07-11 [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.5772/intechopen.74390. ISBN 978-1-78923-434-3. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/solar-panels-and-photovoltaic-materials/a-review-of-recycling-processes-for-photovoltaic-modules>
 55. UPPAL, Bhavesh, Adish TAMBOLI, Nandan WUBHAYAVEDANTAPURAM, W.E. ALNASER a A.A. SAYIGH. Sustainable recycling technologies for Solar PV off-grid system. E3S Web of Conferences [online]. 2017, 23 [cit. 2020-04-29]. DOI: 10.1051/e3sconf/20172301003. ISSN 2267-1242. Dostupné z: <http://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20172301003>
 56. *FRELP* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://frelp.info/the-project/expected-results/>
 57. LATUNUSSA, Cynthia, Lucia MANCINI, Gian BLENGINI, Fulvio ARDENTE a David PENNINGTON. *Analysis of material recovery from photovoltaic panels* [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016 [cit. 2020-04-29]. ISBN 978-92-79-57277-7. Dostupné z: [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC100783/2016.3057_src_en_final_2%20\(002\).pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC100783/2016.3057_src_en_final_2%20(002).pdf)
 58. *Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive: Final Report* [online]. Bio Intelligence Service, 2011 [cit. 2020-04-29].
 59. LATUNUSSA, Cynthia E.L., Fulvio ARDENTE, Gian Andrea BLENGINI a Lucia MANCINI. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. InTech, 2016, 2018-07-11, **156**, 101-111 [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.03.020. ISBN 978-1-78923-434-3. ISSN 09270248. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024816001227>
 60. Solární panely. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/solarni_panely
 61. ČÍHAL, Petr. Rozšířená odpovědnost za výrobky po skončení jejich životnosti. *Světlo* [online]. 2019, (6), 54 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/rozsirena-odpovednost-za-vyrobky-po-skonceni-jejich-zivotnosti--4183>
 62. Příspěvek. MINTES Solutions s.r.o. [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://www.mintessolutions.cz/prispevek/>

63. Kolektivní systémy OEEZ – kontakty. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kolektivni_systemy_oeez/\\$FILE/OODP-kontakty_kol_systemy-20182011_aktualizace.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kolektivni_systemy_oeez/$FILE/OODP-kontakty_kol_systemy-20182011_aktualizace.pdf)
64. ČERNÁ, Ladislava, Ivan KUDLÁČEK, Tomáš FINSTERLE, Pavel HRZINA, Vítězslav BENDA a Jan ŠUTKA. EKONOMICKÁ BILANCE VÝROBY A LIKVIDACE FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ INSTALOVANÝCH V ČR [online]. Praha, 2015. Dostupné z: http://www.solarniasociace.cz/tmp/studie_cvut_bilance_solarni_panely.pdf
65. Preismonitor. *BGR – Deutsche Rohstoffagentur* [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Preisliste/pm_19_12.pdf;jsessionid=6B86BD725CC6358BD4F0FD9ACE7A3C98.2_cid284?__blob=publicationFile&v=5
66. Dopravní terminologie: Nákladní auta. *KLADOS – Vaše dopravní společnost* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <http://kladoc.cz/cs/nakladni-auta/>
67. Ceník – AVE. *AVE CZ odpadové hospodářství s. r. o. - oficiální web společnosti* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.ave.cz/cs/stredocesky-kraj/provozovna-caslav/soubory-ke-stazeni/ceniky>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČR	Česká republika
FRELP	Full Recovery End-of-Life Photovoltaic
OZE	Obnovitelné zdroje energie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
IRENA	International Renewable Energy Agency
ERÚ	Energetický regulační úřad
PN	Positive-negative
FV	fotovoltaický
CI(G)S	copper indium (gallium) selenide (diselenid mědi, india a galia)
ITO	indium tin oxide (cínem dopovaný oxid india)
TCO	Transparent conductive oxide (transparentní vodivý oxid)
EVA	Ethylen-vinyl-acetát
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
MPPT	Maximum Power Point Tracker
HFVE	Hybridní fotovoltaická elektrárna
OEEZ	Odpadní elektrická a elektronická zařízení
WEEE	The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive
EU	Evropská unie
LED	Light-Emitting Diode
EEZ	Elektrické a elektronické zařízení

RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment
ES	Evropská směrnice
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NZÚ	Nová zelená úsporám
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
OPPIK	Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost
MŠMT	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky
ČEZ	České energetické závody
ČFA	Česká fotovoltaická asociace
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
NKEP	Národní klimaticko-energetický plán
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LCD	Liquid crystal display
LCA	Life Cycle Assessment
EPR	Extended Producer Responsibility