



Metodika optimalizovaného způsobu zapojení agrofotovoltaiky v agrolesnických systémech pro diverzifikaci zemědělského hospodaření

Průhonice, Srpen 2024

AUTOŘI:

Ing. Kamila Vávrová, Ph.D.¹, Ing. Ladislava Černá, Ph.D.², Ing. Jan Weger, Ph.D.¹, Ing. Lukáš Janota¹, Ing. Jana Jobbiková, prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.², Ing. Tomáš Králík, Ph.D.², Ing. Jiří Bím², Ing. Tomáš Jícha³,

ORGANIZACE PODÍLEJÍCÍ SE NA ZPRACOVÁNÍ

¹ Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v. v. i. Květnové náměstí 391, 252 43 Průhonice

² České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Jugoslávských partyzánů 1580/3, 160 00 Praha 6

³ Euroenergy, spol. s r.o., Švédská 22, 150 00 Praha 5

PODĚKOVÁNÍ

„Metodika optimalizovaného způsobu zapojení fotovoltaiky do zemědělských a agrolesnických systémů“ byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci **Programu THĚTA TK04010166**.

Název projektu: **Komplexní řešení lokální a regionální energetiky jako součást opatření GreenDealu pro dosažení udržitelného zemědělského a lesnického hospodaření**

Doba řešení: 01/2022 – 12/2024.

UŽIVATEL VÝSLEDKU

Ministerstvo životního prostředí Odbor energetiky a ochrany klimatu, Vršovická 1442/65, Praha 10, 100 10

APLIKAČNÍ GARANT PROJEKTU

Ministerstvo průmyslu a obchodu Odbor strategie a mezinárodní spolupráce v energetice, Na Františku 32, 110 15 Praha 1

OPONENTI

Ing. Jiří Jungr, Mgr. Jan Krčmář

CERTIFIKACE

Osvědčení o uznání „metodiky schválené příslušným orgánem státní správy“ NmetS

(MPO 112210/2024)

Obsah

Zadání.....	6
Využití metodiky, její uplatnění a ekonomické aspekty.....	6
Novost metodiky.....	6
Používané zkratky.....	7
1 Úvod	8
2 Motivace.....	10
2.1 Energetické potřeby státu a společnosti.....	10
2.1.1 Cíle snižování emisí.....	10
2.1.2 Cíle rozvoje obnovitelných zdrojů.....	11
2.1.3 Bilance zdrojů, výroby a spotřeby.....	11
2.2 Diverzifikace zemědělské činnosti.....	14
2.3 Průzkum zájmu o agrovoltaiku v ČR.....	14
2.4 Analýza legislativní úpravy.....	16
2.4.1 Legislativa AgPV v ČR.....	16
2.4.2 Legislativa AgPV ve vybraných zemích EU.....	17
Literatura - kapitola 2.....	18
3 Technologie.....	20
3.1 Druhy agrovoltaických konstrukcí.....	20
3.1.1 Horizontální agrovoltaické výrobní.....	20
3.1.2 Vertikální agrovoltaické výrobní.....	22
3.2 Rizikové faktory agrovoltaiky.....	27
3.2.1 Rizika AgPV systémů z hlediska zemědělského hospodaření a plodin.....	27
3.2.2 Pohyb osob.....	28
3.2.3 Organické látky.....	28
3.2.4 Postupy pro obhospodařování a sklizení plodin.....	29
3.3 Vhodné komponenty.....	30
3.3.1 Typy fotovoltaických článků a modulů z pohledu materiálu.....	30
3.3.2 Konstrukce PV modulů.....	31
3.3.3 Vhodné typy modulů pro horizontální agrovoltaiku.....	33
3.3.4 Vhodné typy modulů pro vertikální agrovoltaiku.....	33
3.3.5 Další komponenty.....	34
3.4 Vhodná topologie z pohledu připojení k síti.....	35
3.4.1 Trendy v oblasti návrhu Agrovoltaických systémů.....	35
Literatura – kapitola 3.....	36
4 Vzájemná interakce agrovoltaiky a zemědělství.....	37
4.1 Zkušenosti z provozu agrovoltaických výroben.....	37
4.1.1 Existující systémy v ČR.....	37

4.1.2	Existující systémy v Evropě.....	43
4.2	Vliv AGPV na produkční podmínky zemědělské výroby	44
4.2.1	Zhodnocení produkčních podmínek konvenčních plodin ve vertikálních AgPV systémech	45
4.3	Vliv proměnlivého stínění na výnosy a chování AgPV systémů	47
4.4	Možnosti využití elektřiny v konvenční a agrolesnické zemědělské výrobě	48
4.4.1	Modelový experiment s využitím elektřiny AgPV k vysoušení energetické štěpky..	49
5	Ekonomické posouzení provozu AgPV	53
5.1	Zásadní aspekty ovlivňující ekonomiku agrovoltaiky	53
5.1.1	Technicko-energetické aspekty ekonomiky agrovoltaiky	53
5.1.2	Zemědělské aspekty ekonomiky agrovoltaiky	53
5.1.3	Ostatní aspekty ovlivňující ekonomiku agrovoltaiky	53
5.2	Metodika ekonomického posouzení AgPV	54
5.2.1	Ekonomika horizontálního agrovoltaického systému.....	54
5.3	Ekonomika vertikálního agrovoltaického systému	55
5.4	Cost-benefit analýza (FEL).....	58
6	Závěr - shrnutí	59

Zadání

Metodika optimalizovaného způsobu zapojení agrofotovoltaiky v agrolesnických systémech pro diverzifikaci zemědělského hospodaření bude obsahovat (viz návrh projektu TK04010166):

- doporučené postupy instalací PV panelů z hlediska optimalizace jejich výkonu,
- využití elektřiny a minimalizace rizik pro jejich provoz v konvenční a agrolesnické zemědělské výrobě včetně vlivu na prostředí zemědělských porostů,
- doporučení způsobů využití pro zemědělské farmy, zlepšení stavu krajiny a podporu dalších služeb zemědělce.

Metodika je součástí řešení projektu TK04010166, který je zaměřen na zhodnocení možného příspěvku biomasy k pokrývání lokálních a regionálních energetických potřeb při respektování kritérií udržitelného hospodářství. Cílem projektu je i komplexní aktualizace potenciálu biomasy vzhledem k měnícím se faktorům ovlivňujícím užití půdy a výnosy biomasy včetně aktualizace potenciálu biomasy z lesní půdy zohledňující dopady kalamit v poslední dekádě. V rámci projektu jsou posouzeny i možnosti využití biomasy jako paliva pro transformaci teplárenství. Součástí projektu je i analýza nových perspektivních oblastí pro využití zemědělské půdy tzv. agrovoltaikou (AgPV). Na experimentálním AgPV systému ve VÚKOZ, v.v.i. byly prováděny experimenty s cílem určit vhodnou konfiguraci a technologii PV modulů v kombinaci s dřevinami a vliv na zemědělskou výrobu.

Využití metodiky, její uplatnění a ekonomické aspekty

Metodika je určena primárně jako metodický podklad pro činnost aplikačního garanta projektu pro rozhodování a řízení v odvětví energetiky a pro uživatele výsledku pro posuzování environmentálních aspektů AgPV. Dále se předpokládá použití metodiky hospodařícími zemědělci, kteří uvažují o dvojitě využití půdy a sekce jejich organizací (ASZ, AK, ZS). Metodika je dále určena dalším orgánům státní správy, kterým může posloužit jako zdroj informací z oblasti fotovoltaiky relevantních agrárním záměrům.

Novost metodiky

Nejvýznamnější nové znalosti a poznatky získané v rámci výzkumných činností projektu a použité v metodice:

- Zmapování legislativy z pohledu agrovoltaiky
- Ověření možnosti využití agrovoltaiky v agrolesnických systémech
- Na základě české legislativy řešící agrovoltaiku jsou navrženy typické systémy a diskutovány vhodné komponenty i využití.
- Poloprovodní ověření možností využití elektřiny z AgPV v zemědělských činnostech (sušení apod.)
- Na základě vlastních experimentálních měření jsou diskutovány vlastnosti technologií PV modulů s ohledem na složité podmínky stínění v agrolesnických systémech.

Podle autorů dostupných informací se jedná o první ucelenou publikaci zabývající se možnostmi využití agrovoltaiky v českém prostředí a využívající výsledky poloprovodních instalací.

Používané zkratky

AgPV	Agrovoltaický systém, agrovoltailka
AK	Agrární komora
ALS	Agrolesnické systémy (pěstování dřevin v konvenční zemědělské produkci)
ASZ	Asociace soukromého zemědělství
BPEJ	Bonitační půdně ekologické jednotky
ČEPS	Česká elektroenergetická přenosová soustava
ČSN	Česká státní norma
DPZ	Dálkový průzkum země (dron, UAV)
DZEZ (GAEC)	(Standardy) Dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Energetická soustava/Evropská směrnice
EU	Evropská unie
EU ETS	Systém pro obchodování s emisemi skleníkových plynů
HPKJ	Hlavní půdní a klimatická jednotka
KZ	konvenční zemědělství (stanoviště)
LPIS	Land parcel identification systém (evidence zemědělských pozemků)
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry (odvětví využívání půdy a lesnictví)
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
MŽP	Ministerstvo životního prostředí ČR
NCEP/NKEP	Národní klimaticko-energetický plán, Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu
NV	Nařízení vlády
OOP	Orgán ochrany přírody
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PEO	Protierozní opatření
RRD	Rychle rostoucí dřeviny (zejm. topoly, vrby, ale i jiné dřeviny)
SZP	Společná zemědělská politika
TAČR	Technologická agentura ČR
TTP	Trvalý travní porost
ÚZEI	Ústav zemědělských informací
WAM3	Výsledný scénář
ZPF	Zemědělský půdní fond
ZS	Zemědělský svaz

1 Úvod

Během posledních desítek let dochází k průběžnému nárůstu spotřeby elektrické energie. K tomuto dochází i navzdory snižování náročnosti průmyslové výroby i provozu domácností (energeticky úsporná opatření na budovách, úsporná svítidla, apod.). Jednak je tomu z důvodu rostoucího komfortu domácností, kdy tak tyto sice pořizují energeticky úsporné spotřebiče, ale zároveň se zvyšuje počet spotřebičů a celková vybavenost domácností, a jednak také přechodem k jiným formám vytápění a ohřevu vody (obvykle výměna plynových kotlů a kotlů na tuhá paliva za tepelná čerpadla nebo elektrokotle).

Kromě tradičních spotřebitelů elektřiny se však prosazují i další nové směry, které budou znamenat další nárůst spotřeby, zejména pak elektromobilita, vytápění na bázi fosilních paliv tepelnými čerpadly (decentrální vytápění) a obecný přechod konečné spotřeby od fosilních paliv na elektřinu z obnovitelných zdrojů energie, resp. dalších nízko uhlíkových či bezuhlíkových technologií (tzv. koncept „sector coupling“).

Vzhledem ke končící éře uhlí a nejisté jaderné budoucnosti – Česká republika aktuálně není v takové fázi výstavby/dostavby jaderného zdroje, aby bylo možné dosáhnout potřebného objemu výroby elektrické energie, který by zajistil dostatek energie tak, aby Česká republika zůstala z pohledu roční bilance exportní zemí; je potřeba soustředit se na racionální výstavbu obnovitelných zdrojů, které mohou alespoň do jisté míry celkové bilanci pomoci. Mezi zajímavé koncepty patří agrovoltaika, která kombinuje zemědělskou výrobu a výrobu elektrické energie pomocí fotovoltaiky v rámci jednoho území (tzv. dvojí užití půdy, nebo také „sunsharing“). Racionální agrovoltaikou však není „systém na poli kdykoliv a kdekoliv“, ale takový systém, který vzniká buď jako podpůrný prostředek pro zemědělskou výrobu (např. vhodným zastíněním, které prospívá plodinám) nebo je využit jako protierozní opatření. Zároveň však nelze postavit takový systém všude, ale je potřeba se zaměřit na taková místa, kde je k dispozici potřebná infrastruktura anebo potenciální odběratel elektřiny.

Předkládaná metodika vznikla jako výsledek výzkumného projektu TAČR Théta TK04010166, jehož cílem bylo zhodnocení možného příspěvku biomasy k pokrývání lokálních a regionálních energetických potřeb při respektování kritérií udržitelného hospodářství. Součástí projektu bylo také možné využití fotovoltaiky v zemědělství – konvenčním (agrovoltaika) a agrolesnickém. Právě tato část by měla sloužit jako jisté vodítko k tomu, jak by mohla vypadat vhodná fotovoltaika pro zemědělství a jaké aspekty je při plánování potřeba vzít v potaz.

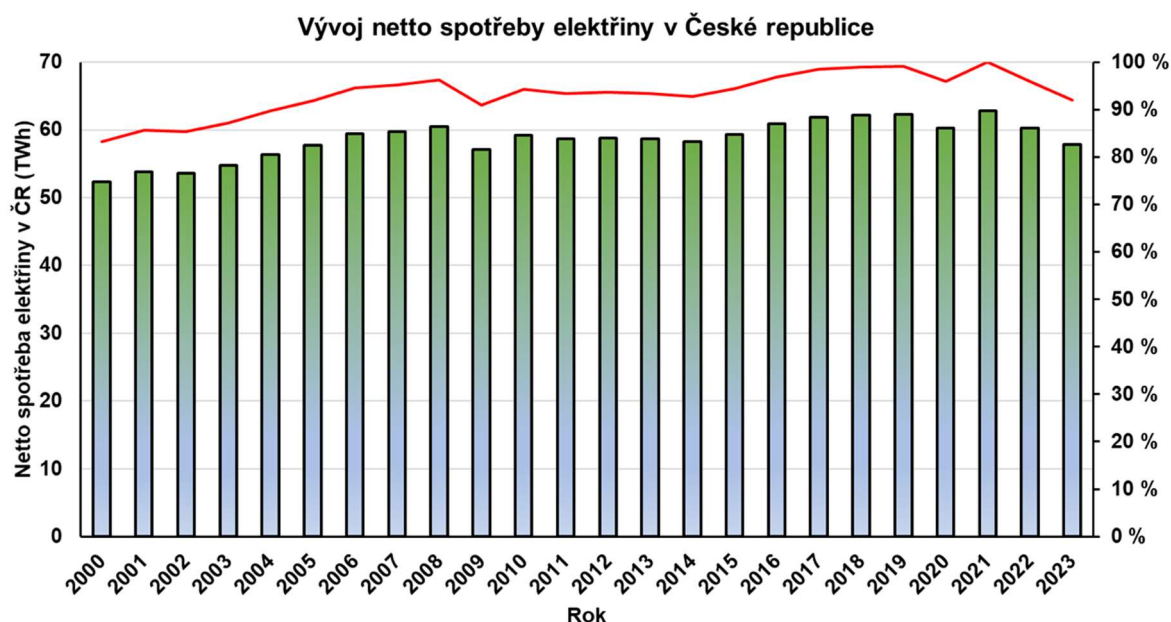
Agrovoltaika (AgPV) nebo přesněji moderní agrovoltaické systémy, mají potenciál diverzifikovat možnosti farmářů na půdě a rozšířit sortiment jejich produktů (Dupraz et al., 2011). Dále může být významným přínosem zvýšení energetické soběstačnosti při provozu farem a v širším měřítku zvýšení odolnosti venkovských a sociálně slabších regionů vůči výkyvům cen energií v rámci rozvoje komunitní energetiky (Janota et al., 2023). Citlivým tématem v podmínkách České republiky i některých dalších zemí CEE – v důsledku „prvního fotovoltaického boomu“ (2009-2011), je otázka vhodného využití kvalitní zemědělské půdy pro instalaci fotovoltaických modulů. Aktuální zájem zemědělců o agrovoltaiku jsme proto zjišťovali provedením dotazníkového šetření, kterého se zúčastnilo okolo sta hospodařících zemědělců, a její výsledky uvádíme v samostatné kapitole.

Experimentální výzkum v rámci projektu jsme následně zaměřili na výzkum takových typů AgPV, které by minimalizovaly zábor obhospodařované zemědělské půdy a zachovaly prioritu produkce potravin před produkcí energie – jako jsou například agrolesnické systémy. K tomu byla využita experimentální instalace fotovoltaických modulů v agrolesnickém systému na pokusném pracovišti VÚKOZ Průhonice — Michovky, na kterém probíhaly kromě sledování produkce elektřiny a hodnocení vlivu PV modulů na produkční podmínky zemědělských plodin (zejména klimatické, hydrické) také experimenty s využitím elektřiny z AgPV na vysoušení zemědělských produktů, konkrétně energetické štěpky z rychle rostoucích dřevin (RRD).

2 Motivace

2.1 Energetické potřeby státu a společnosti

Jak již bylo řečeno v úvodu, spotřeba elektrické energie prakticky stále roste, i když je do jisté míry vyrovnávána energetickými opatřeními. Tento trend je dobře patrný z následujícího grafu, který je do jisté míry ovlivněn konfliktem na Ukrajině, který vedl ke snížení spotřeby nejen plynu, ale i elektrické energie. Další snižování spotřeby však bude již velmi náročné, v podstatě nemožné. Evropa by se chtěla stát znovu více průmyslovou, to však s sebou nese další nároky na výrobu/spotřebu elektrické energie, která v souvislosti s klimatickými cíli vede spíše k jejímu přesunu mimo starý kontinent. S rozvojem elektromobility a dekarbonizací sektoru vytápění a celého průmyslu lze naopak očekávat tzv. elektrifikaci konečné spotřeby (v principu náhrada fosilních paliv elektřinou z OZE nebo jaderných elektráren, resp. palivy z této elektřiny vyráběných, jako je např. vodík). To lze dokumentovat např. na scénářích zpracovaných ČEPS v rámci „Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040“¹.



Obr. 2.1-1: Vývoj netto spotřeby elektřiny v ČR (TWh) – sestaveno na základě ročních bilancí ERÚ

Klimatické cíle ČR vychází z klimatických cílů Evropské unie a jsou implementovány v Národním klimaticko-energetickém plánu (resp. v Aktualizaci Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu) – dále jen NKEP, který byl vládou akceptován 18.10.2023 a v současné době prochází dalšími úpravami [2.1]. Následující část je přímo vyňata z metodiky.

2.1.1 Cíle snižování emisí

V oblasti snižování emisí skleníkových plynů je nařízením EU č. 2021/1119, kterým se stanoví rámec pro dosažení klimatické neutrality, stanoven celoevropský cíl na úrovni alespoň 55 %

¹ Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ 2022 – viz <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>)

snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030 v porovnání s rokem 1990 a dosažení klimatické neutrality do roku 2050. V sektorech spadajících do systému obchodování s emisemi (EU ETS) by dle směrnice 2003/87/ES ve znění pozdějších novel (směrnice č. 2023/959) mělo dojít ke snížení emisí o 62 % v porovnání s rokem 2005 a v sektorech mimo EU ETS dle revidovaného nařízení (EU) 2018/842 v novelizovaném znění (Effort sharing regulation) (ve znění č. 2023/857) o 40 %, respektive 26 % na úrovni ČR.

Cílem ČR je dosáhnout snížení emisí v souladu se závazky vyplývajícími z balíčku Fit for 55 a přispět k dosažení klimatické neutrality EU do roku 2050. Strategickým cílem ČR je snížit podíl fosilních paliv (využívaných bez technologie zachytávání) na spotřebě primární energie na 50 % do roku 2030 a 0 % do roku 2050 a zcela utlumit využití uhlí pro výrobu elektřiny a tepla do roku 2033. Modelovaný scénář ukazuje reálnost splnění těchto cílů, ovšem při nastavení ambiciózních politik a opatření. Celkové emise v něm k roku 2030 poklesnou o 63 % oproti 1990, v rámci ETS1 pak o 68 % oproti 2005 a mimo tyto sektory (ESR) o 32 % oproti 2005. Model směřuje k emisní hodnotě 6,3 Mt v roce 2050, nicméně další snížení se předpokládá ze sektorů LULUCF a odpadů, které nejsou dostatečně podrobně modelovány. Scénář také potvrzuje předpoklad úplného odstoupení od využití uhlí pro výrobu tepla a elektřiny do roku 2033 s významným poklesem už mezi lety 2025 až 2030. [2.2]

2.1.2 Cíle rozvoje obnovitelných zdrojů

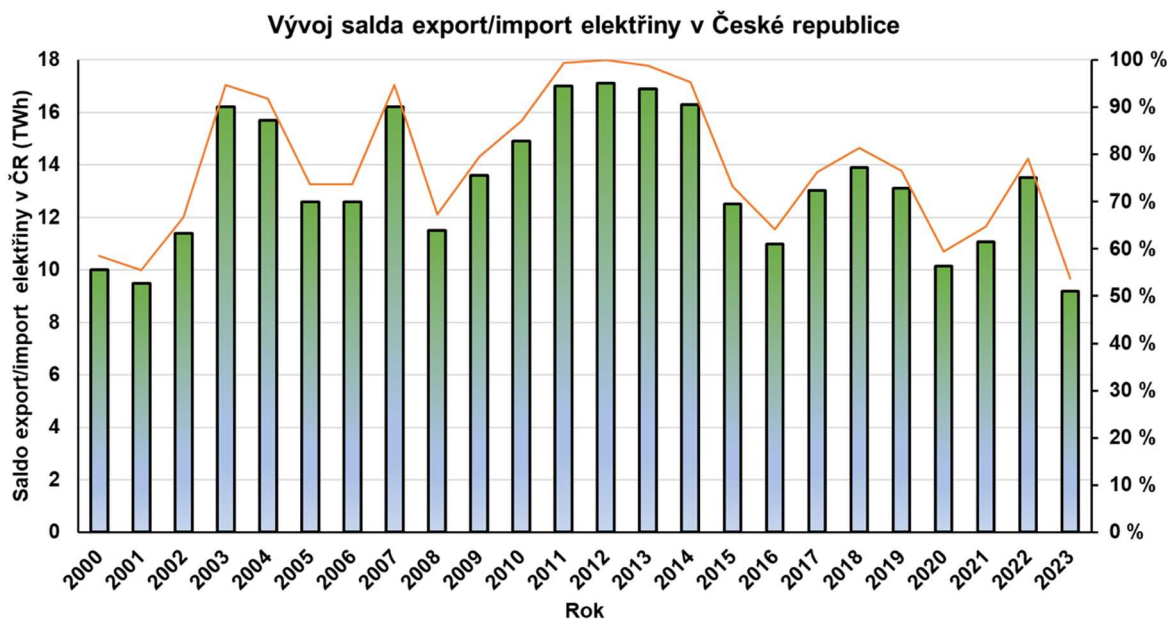
Revidovaná směrnice č. 2018/2001 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, jejíž formální schválení a vstup v platnost lze očekávat do konce roku, stanovuje celkový cíl EU do roku 2030 na úrovni 42,5 % využití OZE na hrubé konečné spotřebě energie a dalšího dobrovolného navýšení na úrovni EU o 2,5 p.b. nad uvedenou hodnotu. Revidovaná směrnice dále stanoví řadu dílčích podcílů pro OZE zejména v sektorech průmyslu, dopravě, vytápění a chlazení a budov.

Pro celkový národní cíl ukazuje scénář WAM3 dosažitelnost podílu OZE na konečné spotřebě ve výši 30 % do roku 2030 jako příspěvku k celoevropskému cíli (nárůst ze 17,7 % v roce 2021). V dopravě je pak splněn závazný cíl snížení emisí skleníkových plynů o 14,5 % dosažený zvýšením podílu obnovitelných zdrojů do 2030. U některých dílčích cílů pak ukazuje jejich těžkou splnitelnost (a některé nemodeluje). [2.2]

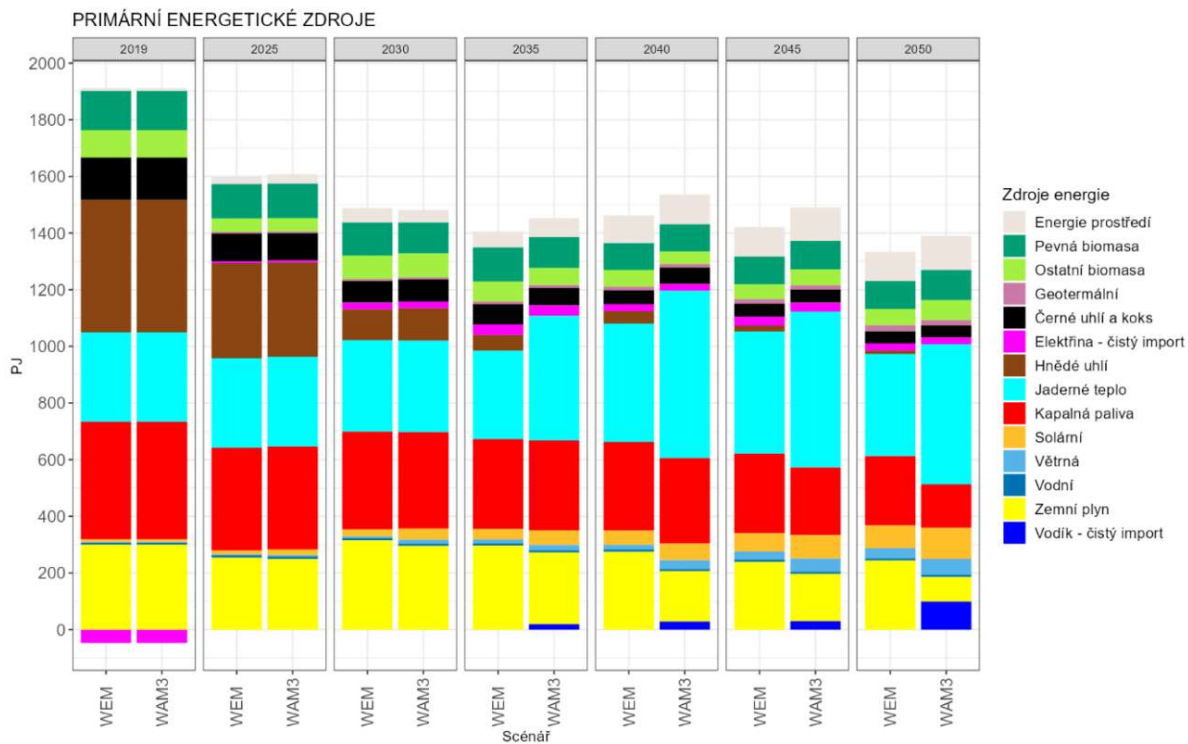
2.1.3 Bilance zdrojů, výroby a spotřeby

Uvedené cíle snižování emisí a rozvoje obnovitelných zdrojů jdou ruku v ruce také s decentralizací výroby. Česká republika je státem, který historicky prosazoval vždy spíše centralizované koncepty energetiky a teplárenství, tudíž je pro ni přechod na decentrální systém velkou výzvou. Zatímco průmyslové podniky budou prakticky vždy závislé na dodávce z distribuční soustavy, u menších podnikatelů a domácností je možné alespoň v oblasti elektřiny dosáhnout výrazně lepší bilance.

S rozvojem intermitentních zdrojů bude stále náročnější řídit centrální toky elektřiny, jelikož i z tradičních exportních zemí bude s odklonem od uhlí docházet k jejich importnímu charakteru. Nejinak je tomu i v případě České republiky, jak ukazuje vývoj salda export/import v letech i odhady uvedené v NKEP – viz Obr. 2.1-2 a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Scénáře počítají s poklesem spotřeby elektrické energie a také s rozšířením výroby elektřiny z jaderných elektráren v České republice.



Obr. 2.1-2: Vývoj salda export/importu elektřiny v ČR (TWh) – sestaveno na základě ročních bilancí ERÚ



Obr. 2.1-3: Scénáře bilance primárních energetických zdrojů v ČR [2.2]

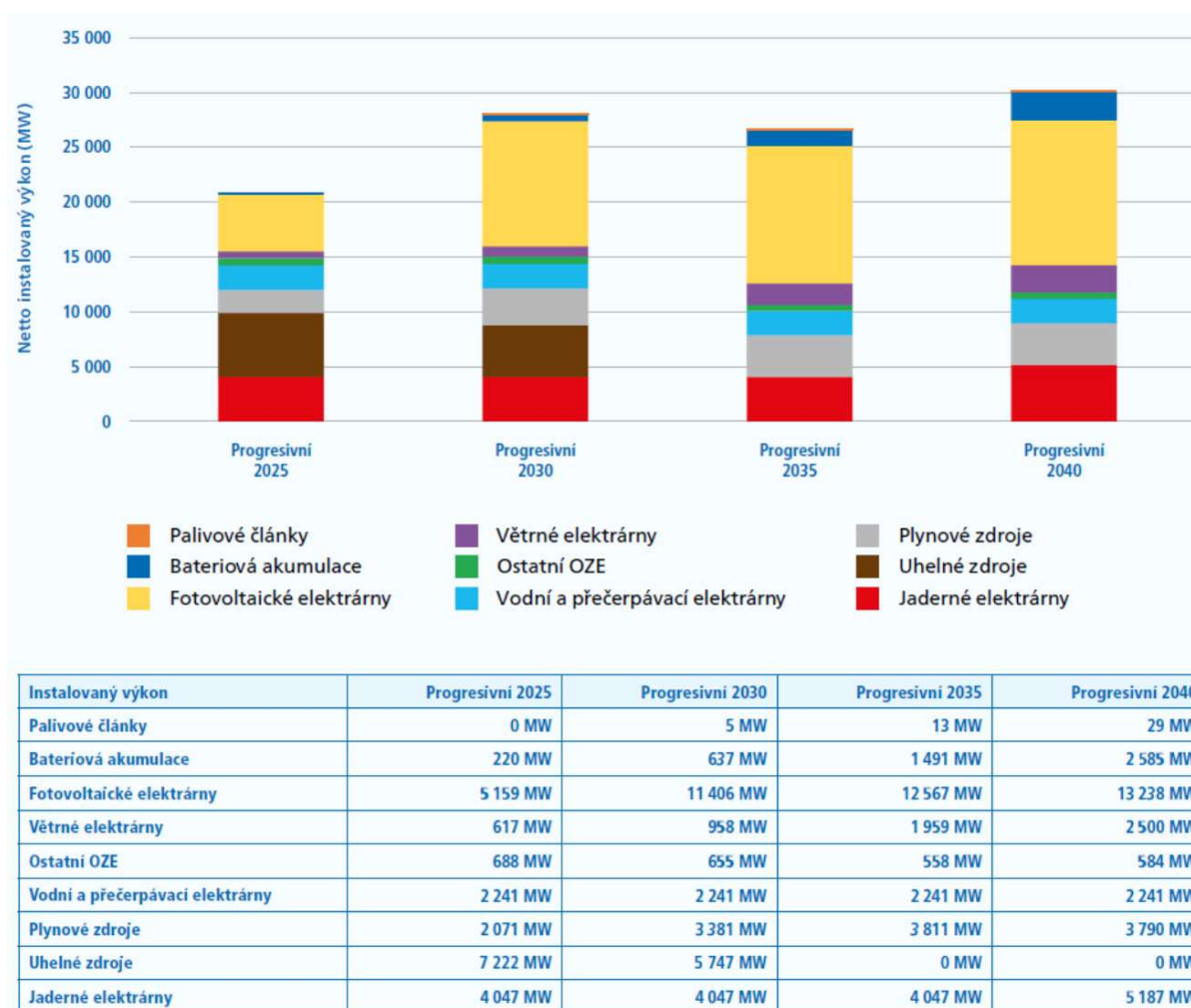
V každém případě však počítají s čistým importem elektrické energie, a to již od roku 2025 a od roku 2035 také s importem vodíku.

K podobným závěrům došel ve svých analýzách také ČEPS: v rámci MAF CZ 2022 (Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040) byly provedeny výpočty, ze kterých v Progresivním scénáři (který ČEPS považuje za nejpravděpodobnější trajektorii vývoje českého energetického

mixu) vyplývá, že po roce 2030 dochází situacím, kdy není dostatek elektřiny pro pokrytí spotřeby. [2.2]

Progresivní scénář reprezentuje zrychlený útlum uhelných zdrojů do roku 2033 a vyšší úroveň penetrace obnovitelných zdrojů s využitím finančních zdrojů Modernizačního fondu a dalších nástrojů podpory jejich rozvoje. Scénář je založen na takové predikci rozvoje, která bere do úvahy ambiciózní cíle EU v oblasti snižování emisí a předpokládá navyšování spotřeby elektřiny v důsledku rozsáhlé elektrifikace. Kompletní dokončení transformace teplárenství (CZT) a závodních energetik z uhlí na zemní plyn, biomasu, odpad, popřípadě jiná alternativní paliva je uvažováno do konce roku 2030. [2.2]

V souvislosti s modelováním bilance v energetické soustavě došlo také na odhady instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren, které by v progresivním scénáři (viz Obr. 2.1-4) měly být v roce 2040 cca 13 GW_p. Přestože je v České republice dostatek průmyslových ploch, které mohou sloužit pro výstavbu centrálních fotovoltaických elektráren, jak již bylo zmíněno dříve, klíčovým problémem bude zejména výroba a spotřeba v daném místě, a tedy i čase, a to jak z technického, tak z ekonomického hlediska.



Obr. 2.1-4: Netto instalovaný výkon v Progresivním scénáři pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů dle ČEPS [2.2]

Počátkem roku 2024 představil ERÚ novou tarifní strukturu (zatím ještě není ve finální podobě²), která v každém případě bude znamenat výrazné zvýšení nákladů na přenos a distribuci pro koncové zákazníky, a tudíž přestože se cena silové energie bude pohybovat s největší pravděpodobností na úrovni okolo 70 EUR/MWh (tedy cca 1,75 Kč/kWh), celkové náklady na energii budou i v případě připojení na hladině vysokého napětí okolo 5-6 Kč/kWh. V případě LCOE fotovoltaických elektráren na úrovni 0,9-2 Kč/kWh (podle složitosti systému a případné dotace) je tak evidentní, že pro decentralní výrobu musí nutně existovat decentralní spotřeba, a to ideálně na úrovni odběrného místa, jelikož i komunitní energetika s sebou nese náklady na distribuci pro spotřebitele (zatím není jasné, zda bude existovat pro komunitní energetiku výhodnější tarif pro distribuci). Tato bilance tak dává velkou příležitost lokálním výrobcům, kteří zároveň mohou sloužit jako spotřebitelé v místě. Mezi takové patří jistě i sektor zemědělství, který v případě umístění u aglomerací disponuje i potřebnou infrastrukturou pro výstavbu a připojení.

2.2 Diverzifikace zemědělské činnosti

Diverzifikace zemědělské výroby a zlepšování uhlíkového hospodaření je významným tématem zemědělské politiky v EU. Například ve Francii, která je významným zemědělským státem, se plánuje instalace 100 000 ha AgPV v příštích 25 letech. Obě dvě témata jsou také více než aktuální pro české farmáře a zemědělství, které se v posledních třech dekadách vyprofilovalo jako silně zaměřené na produkci několika málo plodin na velkých rozlohách farem a lánů, které jsou mezi největšími v Evropě. To s sebou nese zvýšená produkční a environmentální rizika jako je erozní ohrožení půd, kolísání výnosů anebo snižování biodiverzity a zásoby půdního humusu.

I z těchto důvodů přikročila Česká republika k hledání vhodného způsobu začlenění agrovoltaiky do zemědělského hospodaření, a to i přesto, že zkušenost z tzv. solárního boomu (2009-2011) způsobila negativní postoje některých zemědělců a veřejnosti vůči využití zemědělské půdy pro instalaci fotovoltaických panelů.

Zemědělské farmy, které by agrovoltaiku využívaly, by tímto způsobem mohly také výrazně a poměrně rychle přispět ke snížení použití fosilních zdrojů energií a v budoucnu také usilovat o uhlíkově neutrální hospodaření bez nutnosti poklesu finančních příjmů (Dupraz, 2024).

Zajímavou variantou je také kombinace agrolesnických systémů s agrovoltaikou, které jsme začali experimentálně ověřovat na našem pracovišti Michovky. Naše první výsledky ukazují možnosti kombinace agrovoltaiky se zemědělskými potřebami například sušení biomasy nebo dalším provozem, ale také možnost finančního příspěvku do rozpočtu farem v případě propojení s fungováním energetických komunit.

2.3 Průzkum zájmu o agrovoltaiku v ČR

V rámci optimalizace způsobu zapojení AgPV v ALS jsme provedli anonymní dotazníkové šetření pro ověření současného postoje zemědělců k AgPV na zemědělské půdě. Ve spolupráci se sekretariátem Asociace soukromých zemědělců (ASZ) bylo osloveno 1 000 respondentů, z nichž dotazník (vytvořený v prostředí MS Forms) vyplnilo 118 osob, což odpovídá obvyklé návratnosti dotazníků v praxi (10 % dle zkušeností ASZ). Zvolili jsme kombinaci uzavřených a polootevřených

² V srpnu 2024 ERÚ oznámil odložení zahájení tarifní reformy pro velké odběratele z počátku roku 2025 na rok 2027 – viz <https://ekonomickydenik.cz/eru-to-vzdalo-cenove-rozhodnuti-je-bez-podpory-pro-nove-zdroje-tarifni-reforma-se-odklada-o-dva-roky/>

otázek, které nám umožnily rychlou a jasnou orientaci v dobře strukturovatelných a/nebo kvantifikovatelných oblastech (např. zájem o off-grid využití AgPV nebo výše a doba návratnosti investice atd.), a otevřených otázek, které měly za cíl rozšířit naše znalosti o konkrétních provozech, technologiích a činnostech, kde by zemědělci pro AgPV našli uplatnění, ale také o stinných stránkách a bariérách její instalace a provozu.

Vybrané výsledky

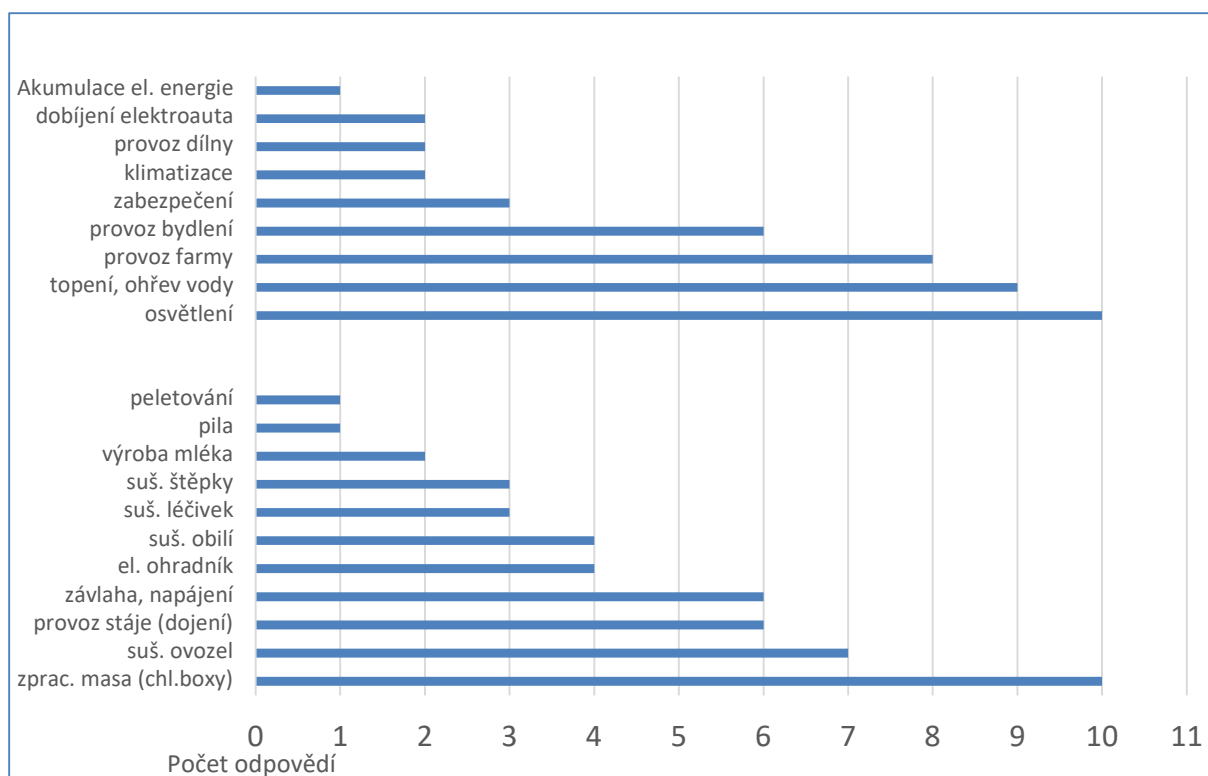
Zájem o využití AgPV v rámci svého hospodaření mělo 104 dotázaných, 53 by ji využilo v autonomním provozu a 72 by volilo jako nejvhodnější kombinaci vlastního využití energie a její dodávání do el. sítě. Jako přijatelná se v 77 odpovědích jevila návratnost investice 5–10 let.

Nejvíce by zemědělci energii z AgPV využili pro osvětlení a ohřev vody, ovšem zmiňovali i zabezpečení objektů či dobíjení elektroauta. Vedle nejčastějších technologií využití (zpracování masa, závlaha, sušení — obilí, ovoce, zeleniny, bylin, štěpky) se objevily i velmi inovativní nápady, jak začlenit PV moduly do samotného charakteru zemědělské činnosti — svislé moduly jako ohrada pro ovce a kozy, závětrří pro mláďata nebo AgPV v podobě protikroupových sítí v sadech.

Výhody AgPV ilustrují např. následující odpovědi: „*Vidím v tom budoucí nutnost včetně elektromobility*“ nebo „*spojení dodávky energie do podnikání a do domácnosti*“.

Ti, kteří na zájem o AgPV odpověděli negativně (8), uváděli zejména, že AgPV na zemědělskou půdu nepatří. Pouze v jedné odpovědi se objevilo, že je PV neekologická. Negativní postoje k PV vykazovaly různou míru důrazu od „*Ale ne! Na zemědělské půdě ne!*“ přes „*Jsem proti umístění na orné půdě*“ až po „*Upřednostňuji umístění na střeše*“.

Respondenti položili v rámci dotazníkového šetření také celou řadu otázek týkajících se např. vlivu AgPV na ráz krajiny, možnosti nebo nutnosti akumulace el. energie nebo případných možností kombinování s jinými zdroji získávání energie atd.



Obr. 2.3-1 Způsoby využití energie z AgPV dle výsledků dotazníkového šetření mezi členy ASZ

2.4 Analýza legislativní úpravy

Legislativa v oblasti agrovoltaiky je v jednotlivých státech EU i ve světě velmi různá. Zatímco některé země mají ohledně podpory agrovoltaiky jasno, jiné jsou zdrženlivější. Obecně lze přístup k agrovoltaice rozdělit do tří skupin:

- agrovoltaika je na stejné úrovni jako fotovoltaika klasického typu (instalace na volné ploše),
- jsou stanovena pravidla pro kontrolu zemědělských výnosů, nebo maximální podíl půdy, který může být záměrem ovlivněn,
- záměr musí být primárně založen na pozitivním ovlivnění zemědělské produkce.

2.4.1 Legislativa AgPV v ČR

Kompromisní, i když do jisté míry konzervativní, přístup zvolila Česká republika, která má nyní prakticky jednu z nejnávštěvnějších legislativ v oblasti agrovoltaiky³. Novela zákona 334/1992 o ochraně zemědělského půdního fondu zavedla do českého právního řádu definici agrovoltaiky. Tento zákon umožňuje povolit agrovoltaickou výrobu na zemědělské půdě bez nutnosti změny územního plánu a bez vyjímání půdy ze zemědělského půdního fondu. Samotnou implementací agrovoltaiky se zabývá připravovaná vyhláška (řešená Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem životního prostředí⁴), která definuje obdobné parametry jako DIN SPEC 91434:2021-051, i když s některými odlišnostmi. V dalším textu je tato vyhláška označována jako Vyhláška AgPV. Tato vyhláška (její návrh) zatím povoluje agrovoltaiku na pozemcích s trvalými

³ Konstatování se vztahuje k 8/2024.

⁴ K datu 9/2024 bylo ukončeno připomínkové řízení.

kulturami - vinice, chmelnice, ovocné sady, školky, plochy s kontejnery a plochy s lanýži. V další aktualizaci vyhlášky se počítá s povolením instalací i na pozemcích osázených jinými plodinami, např. trvalých travních porostech nebo ve spojení se zeleninou. Praktické aspekty Vyhlášky AgPV z pohledu konstrukcí a rozmístění PV technologií jsou řešeny v další části této metodiky.

2.4.2 Legislativa AgPV ve vybraných zemích EU

2.4.2.1 Německo

V Německu se tato oblast primárně řídí zákonem o obnovitelných zdrojích energie (EEG - Das Erneuerbare-Energien-Gesetz) [2.4], který zavádí speciální fotovoltaické systémy instalované na vodě (plovoucí FV) a zemědělské půdě (včetně pozemků, na kterých se pěstují trvalé nebo víceleté kultury nebo trvalé travní porosty). Legislativa umožňuje žádat pro agrovoltaiku i o podporu formou energetických aukcí, které jsou rovněž ukotveny v zákoně o EEG. Zároveň došlo i k novele nařízení o přímých platbách CAP (Verordnung zur Führungszimmer der GAP-Direktzahlungen) [2.5], která nově definuje v §12 Agrovoltaickou výrobu a také přesně definuje, co Agrovoltaická výroba je a co nikoliv, a to prostřednictvím normy DIN SPEC 91434:2021-051 [2.6]. Přes uvedené úpravy není agrovoltaika stále privilegovanou stavbou, a proto podléhá změnám územního plánu, případně mohou převažovat jiné zájmy. Vytvoření výše zmíněné normy lze považovat za pozitivní počín, protože vznikl dokument, který lze využít a odkazovat se na něj v jiných zemích při definování požadavků na výstavbu AgPV systémů.

2.4.2.2 Itálie

V Itálii existují směrnice pro AgPV systémy, které rozdělují systémy do 4 kategorií dle požadavků a 3 kategorií založených na míře splnění požadavků, na které jsou navázány dotace:

- základní systémy bez nároku na podporu,
- pokročilé systémy umožňující podporu z italské energetické agentury GSE,
- nejpokročilejší systémy umožňující financování z Národního plánu obnovy a resilience (PNRR).

Dotiční systém tak pozitivně motivuje k vytváření co nejšetrnějších AgPV systémů, které řeší nejen podobu PV systémů, ale i komplexní opatření (úspory vody, kontinuita zemědělství,...). Z hlediska povolování staveb lze zmínit zejména vyhlášku č. 13/2023, která zavedla výrazně zjednodušené povolovací procesy pro AgPV [2.7]. Pro nejpokročilejší systémy AgPV je v Itálii alokováno 1,2 miliardy EUR s mírou dotace až 90 % [2.8].

V současné době však zároveň probíhá novelizace legislativy, zejména v souvislosti se zákonem č. 63/2024, který zakazuje až na výjimky pozemní instalace. Mezi výjimky zatím patří nejpokročilejší systémy. Zda se omezení týká ostatních agrovoltaických systémů v současné době stále není zcela jasné, jelikož v legislativě chybí přesná definice agrovoltaiky. [2.9]

2.4.2.3 Francie

Francouzská legislativa, na rozdíl od některých jiných členských států, nespécifikuje kvantitativní kritéria pro agrovoltaiku a návrhy, které zahrnují pojmy jako minimální zajištěný výnos plodin, maximální možné pokrytí pomocí PV modulů nebo minimální výroba elektřiny. Všechny tyto parametry jsou ověřovány případ od případu v průběhu povolovacího řízení. Hlavním důvodem jsou různé a specifické potřeby, předpisy a charakteristiky každého regionu. Přesněji řečeno, stavba na zemědělské půdě vyžaduje dodatečné povolení od CDPENAF (Commission

départementale de preservation des espaces naturels, agricoles et forestiers). Francie je zástupcem zemí, které agrovoltaiku vnímají primárně z pohledu přínosů pro plodiny a až sekundárně z pohledu možného energetického zisku, případně dvojího využití půdy. [2.10]

2.4.2.4 Nizozemsko

Nizozemsko je již dlouho považováno za průkopníka v oblasti AgPV díky instalacím na sklenících, kde se pěstují ovocné kultury. Nizozemsko preferuje střešní systémy, nicméně v případě agrovoltaiky je možné dvojí využití půdy. Legislativa je spíše jen v obecné rovině, v současnosti hovoří spíše proti AgPV. [2.11]

2.4.2.5 Ostatní evropské země

Jiné země, jako Polsko nebo Španělsko, v současnosti nemají legislativu, která by zakazovala nebo zvýhodňovala agrovoltaiku. Evropská komise doporučuje všem členským zemím zavádět kromě klasické fotovoltaiky i další druhy, jako jsou právě agrovoltaika, plovoucí fotovoltaika, fotovoltaika integrovaná do budov nebo aut. Každá země se tak může rozhodnout, která z forem je pro ni tou ideální. Například ve Španělsku, kde existuje mnoho ploch, kde lze instalovat klasickou fotovoltaiku a také nároky na statiku krytých parkovacích stání (carportů) jsou vzhledem k očekávané sněhové pokrývce minimální, lze očekávat větší podporu těmto instalacím, než přípravu legislativy pro agrovoltaiku. Česká republika, společně například s Nizozemskem, je omezena vhodnými plochami pro instalaci obnovitelných zdrojů elektrické energie a je zde proto kladen mnohem větší důraz na kombinované využívání ploch.

Literatura - kapitola 2

- [2.1] <https://www.mpo.gov.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/aktualizace-vnitrostatniho-planu-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--277532/>
- [2.2] *Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu*, 2023. Dostupné z: https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2023/10/Aktualizace_NKEP_10_2023_final.pdf
- [2.3] Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) v platném znění
- [2.4] *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*. 2023. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- [2.5] *EEG - Das Erneuerbare-Energien-Gesetz*. 2023. <https://www.gesetze-im-internet.de/gapdzv/>
- [2.6] "DIN SPEC 91434:2021-05: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung." DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (German Institute for Standardization), Berlin, Germany, 2021.
- [2.7] "New Law Decree in Italy to boost the renewables market", *Allen&Overy*, 2023. <https://www.allenoverly.com/en-gb/global/news-and-insights/publications/new-law-decree-in-italy-to-boost-the-renewables-market>.
- [2.8] "Italy's €1.2 Billion Agrovoltaic Scheme Approved: European Commission Clears Italy's €1.2 Billion Solar PV For Agriculture Support Plan", *Taiyang news*, 2022. <https://taiyangnews.info/italys-e1-2-million-Agrovoltaic-scheme-approved/>.
- [2.9] *Clouds over solar PV in Italy?* Online. In: Dentons. 2024. Dostupné z: <https://www.dentons.com/en/insights/articles/2024/may/23/clouds-over-solar-pv-in-italy>.

[2.10] Chatzipanagi, A., Taylor, N. and Jaeger-Waldau, A., *Overview of the Potential and Challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/208702, JRC132879.

[2.11] "Dutch government mulling PV ban on agricultural sites", *pv magazine*, 2023.
<https://www.pv-magazine.com/2023/07/07/dutch-government-mulling-pv-ban-on-agricultural-sites/>.

3 Technologie

Primární motivací pro výstavbu agrolvoltaiky není využití orné půdy k výstavbě fotovoltaiky, která může stát jinde, ale:

- využití konstrukcí, které by nad pěstovanými plodinami v nějaké podobě stály (např. pro ochranu před kroupami),
- využití orné půdy, která nemůže být využita k pěstování plodin z důvodu protierozních opatření,
- umožnění přístupu k elektrické energii tam, kde se díky tomu zvýší efektivita zemědělské činnosti.

Následující přehled technologií a topologií vychází z požadavků aktuálně platné (resp. připravované) české legislativy, konkrétně:

- vyhlášky o agrolvoltaické výrobě (v přípravě) [3.1] (dále jen „vyhláška“),
- zákona o ochraně zemědělského půdního fondu č. 334/1992 Sb. v platném znění⁵ [3.2], a
- normy ČSN P 73 0847:2024 Požární bezpečnost staveb – Fotovoltaické (PV) systémy [3.3].

3.1 Druhy agrolvoltaických konstrukcí

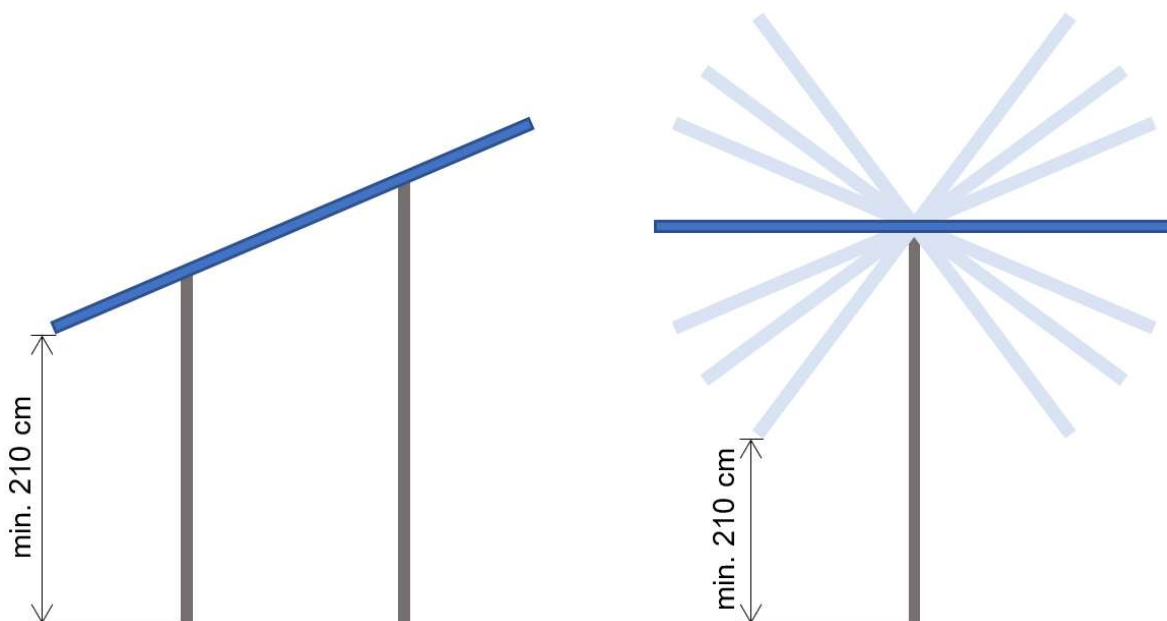
Agrolvoltaické konstrukce vychází z plánovaného využití půdy, tzn. zejména z charakteru plodin, které jsou na ní pěstovány. Česká legislativa zatím neuvažuje jako agrolvoltaickou výrobní území, kde jsou chovány ovce, přestože tyto systémy jsou z pohledu chovatele velmi vhodné, jelikož poskytují ovčím stín a farmáři elektrickou energii potřebnou pro jeho další činnost. V zahraničí (např. Rakousko) jsou tyto systémy mezi agrolvoltaické výrobní počítány a dotace na ně pamatují (byť v nejnižší míře). V ČR převažuje obava nad zneužitím takových systémů jako brány k výstavbě jinak běžných fotovoltaických systémů na orné půdě, a tudíž nejsou dále zmíněny. Agrolvoltaické konstrukce v ČR tak mají v zásadě dvě podoby – konstrukce umístěné nad plodinami (horizontální) a vedle plodin (vertikální).

3.1.1 Horizontální agrolvoltaické výrobní

Z definice dle Vyhlášky AgPV se jedná o „vysoké energetické zařízení s fotovoltaickými moduly rozmístěnými nad zemědělsky využitelnou plochou“, za kterou je považována taková plocha, nad kterou jsou PV moduly umístěny ve světlé výšce min. 210 cm a která musí zabírat min. 95 % celkové plochy [3.1].

To v principu znamená, že všechny PV moduly musí být umístěny tak, aby pod nimi byla výška min. 210 cm a technologická zařízení nutná pro provoz, zejména trafostanice a zázemí pro servis a údržbu, zabíralo nejvíce 5 % celkové plochy. Nižší výška je možná, ale v takovém případě je půda pod těmito systémy počítána mezi zemědělsky nevyužitou plochu. Znázornění konstrukce je patrné z Obr. 3.1-1.

⁵ Legislativní proces ukončen podpisem prezidenta dne 17.6.2024.



Obr. 3.1-1: Světlná výška u vysokého zařízení

Při návrhu výroby je nutné respektovat také požadavky ČSN P 73 0847:2024 (dále jen H-norma), kde jsou definovány požadavky na provedení výroben z pohledu vedení požárního zásahu. Jedná se zejména o uličky mezi řadami fotovoltaických modulů, které musí splňovat požadavky normy z pohledu vedení hasebních zásahů uvedené v kapitole 5.4 H-normy. Uličky lze rozdělit do dvou kategorií:

- Uličky pro vedení protipožárního zásahu bez nutnosti průjezdu techniky.
- Uličky pro vedení protipožárního zásahu včetně jízdy techniky a vozidel požární ochrany.

Uličky bez nutnosti průjezdu musí být min. 1,5 m široké a musí být umístěny alespoň v jednom směru každého PV pole se vzdáleností nejvýše 10 m. V praxi toto znamená, že v případě, že existují mezi plodinami uličky s šířkou 1,5 m, není nutné se dále těmito uličkami zabývat, jelikož min. světlná výška je zároveň minimální podchodnou výškou dle norem třídy 7308 - Požární bezpečnost staveb. V případě, kdy nelze zajistit bezpečný pohyb osob, je nutné zajistit, aby byly splněny požadavky norem třídy 7308 i kapitoly 5.4 H-normy.

Uličky pro vedení zásahu včetně jízdy techniky je nutné dodržet vždy. Jedná se o uličky, které mají šířku min. 4 m a jsou umístěny tak, aby byl každý bod instalovaného PV systému v dosahu max. 160 m. H-norma připouští i variantu s nezavodněným požárním potrubím, nicméně instalace takového potrubí je v přímém rozporu s požadavky §5 Vyhlášky AgPV, jelikož v takovém případě dochází k většímu zásahu do půdy, než záměr vyžaduje (tzn. není upřednostněna méně invazivní varianta). Dosah 160 m tak v podstatě znamená souvislé uličky s roztečí 324 m (rozteč od osy 4m uličky) mezi řadami modulů zakončené navíc zatáčkou s vnitřním poloměrem min. 12 m nebo obratištěm dle vyhlášky č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb v platném znění.

V případě horizontálních výroben je kromě výše zmíněných požadavků nutné uvažovat také požadavky kapitoly 5.7 H- normy, jelikož horizontální výrobnu lze považovat za samostatný přístřešek (norma nehovoří o přesné definici, nicméně z logiky věci lze uvažovat, že se jedná o zařízení podobné přístřešku). Norma tak vyžaduje také požárně bezpečnostní řešení, které



Obrázek 2 – Možný příklad výřezu PV systému s omezeným vývinem tepla mimo stavební objekty

Obr. 3.1-2: Příklad rozložení uliček na PV systému – převzato z [3.3]

prokáže, že charakter přístřešků neovlivňuje požární bezpečnost materiálů, zařízení, technologií apod. pod nimi [3.3].

3.1.2 Vertikální agrovoltaické výroby

Z definice dle Vyhlášky AgPV se jedná o „nízké energetické zařízení s fotovoltaickými moduly umístěnými v blízkosti země v souvislých řadách, které se střídají se zemědělsky využitelnou plochou“, za kterou je považována plocha ve vzdálenosti 50 cm po obou stranách fotovoltaických modulů. Zemědělsky využitelná plocha musí představovat min. 80 % celkové plochy [3.1].

Zde je situace oproti horizontálním výrobnám poněkud komplikovanější. Jelikož vyhláška hovoří pouze o řadách v blízkosti země a nekvantifikuje uvedené parametry (např. co je blízkost země a co je nízké zařízení) a naopak nedefinuje pohyblivá zařízení (solární trackery), ale na druhou stranu je ani nevylučuje, lze jako vertikální agrovoltaický systém uvažovat i trackery a moduly s klasickou konstrukcí. Zároveň vyhláška hovoří o souvislých řadách, tudíž lze vyloučit dvousé a vertikální jednoosé trackery a uvažovat pouze horizontální jednoosé trackery. V podstatě tak lze vertikální výrobu rozdělit do 3 skupin:

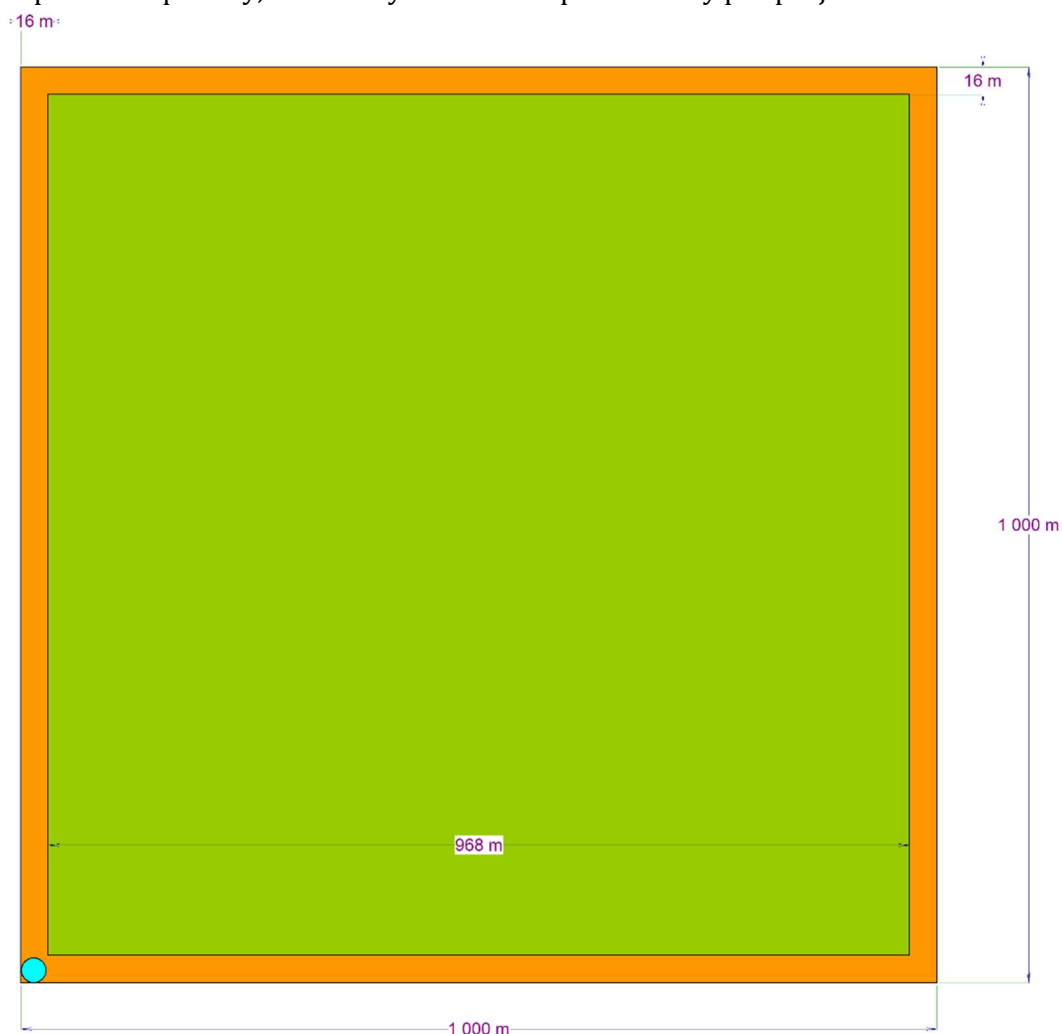
- Systém s pevnou konstrukcí se sklonem.
- Vertikální systém – systém s moduly orientovanými východ-západ se sklonem 90° vůči horizontální rovině.
- Systém se sledovačem slunce v horizontální ose (HSAT - Horizontal single-axis solar tracker).

Jelikož se jedná o zemědělskou půdu, nelze uvažovat nad přivedením sítě v podzemních kabelech, ale přívod na nejbližší sloupy s nadzemním vedením také vzduchem. V obou variantách je potřeba upozornit na požadavky energetického zákona, který zakazuje (§46) v ochranném pásmu nadzemního vedení vysazovat chmelnice a nechávat růst porosty nad výšku 3 m a v případě podzemního vedení vysazovat trvalé porosty a vedení bez ochranných prvků přejíždět mechanismy o celkové hmotnosti nad 6 t. V případě nadzemního vedení bude nutné přivést vodiče (zpravidla hladina 22 kV) a umístit sloup a trafostanici. Dále je nutné dodržet odstupové vzdálenosti od oplocení (nebo obvodové zdi), a to v případě 22kV připojení 7 m vně oplocení (vyplývá taktéž z §46 energetického zákona). Ochranné pásmo však lze využít jako komunikaci pro vedení hasebních zásahů.

Ochranu osob ve smyslu přístupu k měničům, string boxům a rozváděčům lze řešit místními provozními předpisy a ponechat je tak přístupné bez dalších zvláštních opatření.

V následujících odstavcích jsou popsány a zobrazeny příklady jednotlivých kategorií vertikálních výroben tak, aby splňovaly podmínky pro vertikální výrobu. Pro všechny případy je nutné dodržet podmínku max. 20% pokrytí celkové plochy včetně 50cm odstupů od modulů a plochy dalších nezbytných zařízení (zázemí, trafostanice,...). Díky podmínce omezující maximální rozlohu PV instalace je zároveň prakticky vždy splněn i požadavek H-normy.

Pro příklad byla zvolena čtvercová plocha 100 ha⁶. Umístění technologií je pro příklad uvažováno (včetně ochranných pásem) do obvodové části pozemku, nicméně řešení je samozřejmě celá řada a vždy budou plynout z konkrétního záměru. Následující rozmístění má za cíl pouze uvést možnou variantu a ukázat, jak má prostorové omezení vliv na výslednou podobu instalace. Je potřeba vzít v potaz, že tam, kde jsou umístěny technologie, nelze umístit zemědělské plodiny a z praktického hlediska je vhodnější, pokud místa, kde jsou trafostanice, zůstanou bez zemědělských plodin (např. při výměně transformátoru bude vhodné mít přístup ke kiosku ze všech stran bez nutnosti řešit okolní plodiny). 16m odstup od hrany pozemku byl zvolen právě s ohledem na technologie a případné maximální délky (šířky) řad, pokud by nebylo další omezení. V tomto pásmu se jistě mohou pěstovat i plodiny, zachovány musí zůstat pouze uličky pro průjezd hasební techniky.

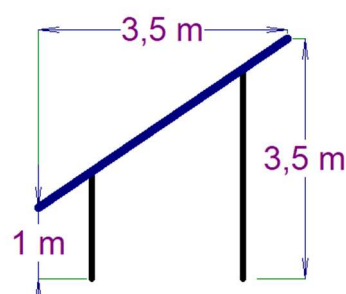


Obr. 3.1-3: Plocha pro instalaci se zobrazením ochranného pásma včetně technologií (oranžově ochranné pásmo, modře umístění sloupu s vedením včetně ochranného pásma, zeleně plocha pro instalaci a zemědělskou činnost)

⁶ U pozemků s rozlohou v jednotkách ha lze řešit uličkou u hranice pozemku, a tudíž by nebylo patrné omezení instalační plochy záměru.

3.1.2.1 Systém s pevnou konstrukcí se sklonem

Tento typ systému je z pohledu záboru zemědělské plochy největší, jelikož je obvykle orientován na jih pod sklonem cca 35° od horizontální roviny. Vzhledem k rozměrům řady a požadavku na umístění modulů v blízkosti země v souvislých řadách, lze uvažovat spíše nad menšími systémy, tzn. v konfiguraci maximálně 2H nebo 2P (2 PV moduly nad sebou orientované na šířku nebo na výšku). Běžný půdorys takových systémů je cca 3,5 m až 4,5 m se vzdáleností od země 0,5 m až 1 m. Vzhledem k charakteru výroby (agrovoltaika) lze uvažovat spíše nad 1 m vzdáleností od země. Díky značným rozměrům je možné dodržet všechna nutná omezení z pohledu H-normy.



Obr. 3.1-4: Rozměr konstrukce pro Agrovoltaickou výrobu s pevnou konstrukcí a sklonem

Při započítání odstupu 50 cm od hrany modulu je vertikální rozměr výsledného PV pole 4,5 m. Při započítání plochy pro umístění technologií (oranžová část) vychází na plochu záměru:

$$S = 1\,000\,000 \cdot 0,2 - (1000 \cdot 16 \cdot 2 + 968 \cdot 16 \cdot 2) = 137\,024 \text{ m}^2$$

Pokud budeme uvažovat zhruba 300 m dlouhé řady s rozestupy, tzn. 3 řady PV polí na délku pole, dostáváme cca 33 trojřad modulů:

$$S_{pole} = 300 \cdot 4,5 \cdot 3 = 4\,050 \text{ m}^2$$
$$\text{Počet trojřad} = \frac{137\,024}{4\,050} = 33,83$$

Při uvažování 4,5 m rozměru řady tak dostáváme rozestupy (počet trojřad - 1) mezi řadami, aby byla dodržena podmínka max. 20% záboru půdy:

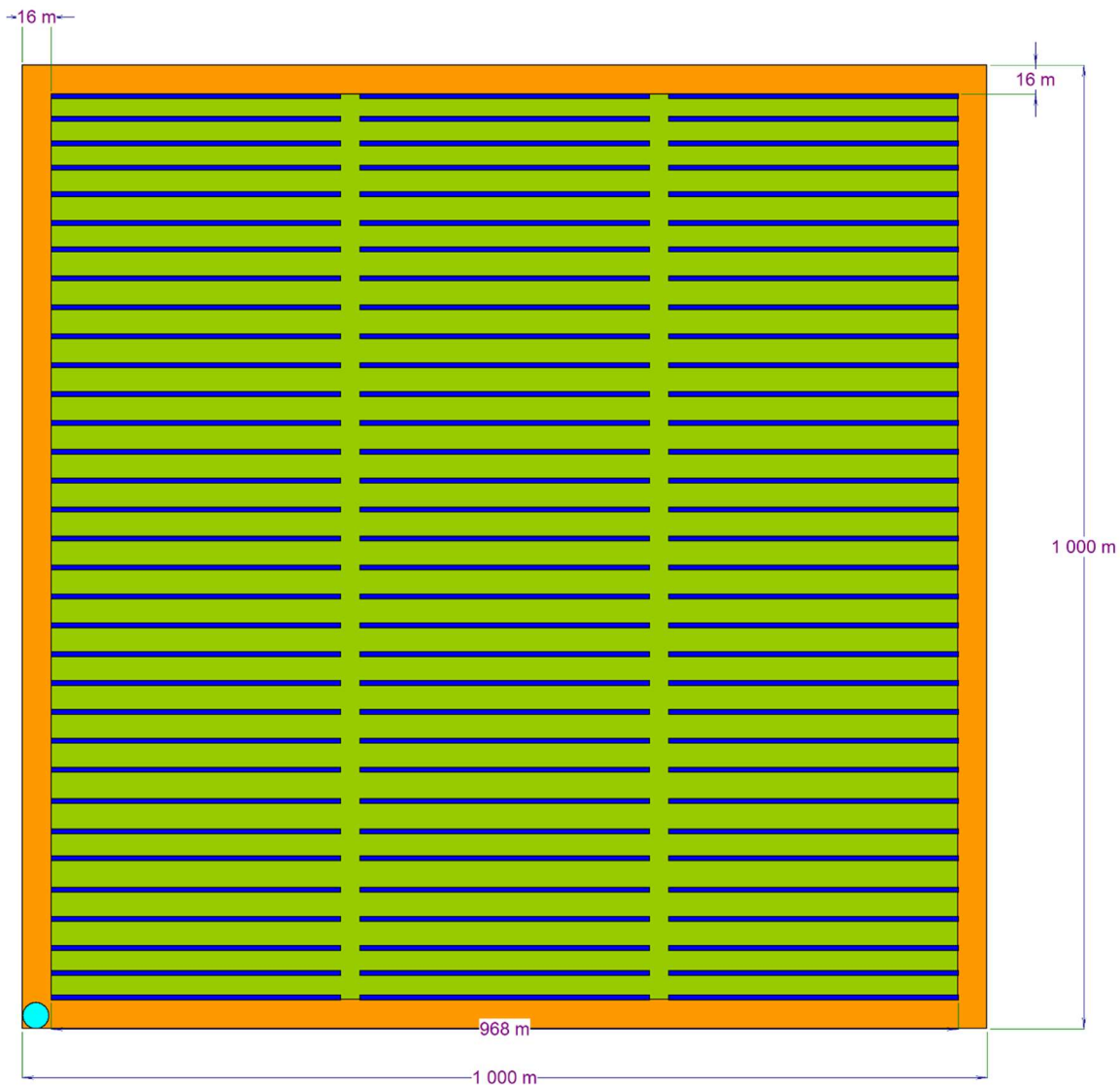
$$\text{Rozestup trojřad} = \frac{968 - 33 \cdot 4,5}{32} = 25,61 \text{ m}$$

Z uvedeného jasně vyplývá, že v případě tohoto typu konstrukcí není nutné řešit 4,5 m uličky z pohledu pokrytí moduly, ale pouze z pohledu existence komunikace, tzn. musí existovat uličky pro průjezd techniky, kde nebudou pěstovány žádné zemědělské plodiny, nicméně je možné je umístit vhodně v souladu se zemědělským záměrem. Příklad rozmístění dle výpočtu výše je patrné z Obr. 3.1-5.

Z pohledu instalovaného výkonu lze dle uvedeného pole tento výkon snadno dopočítat. Při rozměru přibližně dle Obr. 3.1-5 je možné uvažovat s moduly v konfiguraci 2P s rozměrem cca 2,1 m × 1,1 m. To odpovídá modulu s nominálním výkonem přibližně 500 W_p. Do jedné řady je možné tedy počítat s celkem 264 × 2 ks PV modulů. Celkový instalovaný výkon je pak:

$$P_{inst} = (264 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 33) \cdot 500 = 26,14 \text{ MW}_p$$

V přepočtu na plochu celého zemědělského pole lze tedy zhruba počítat s 0,25 MW_p instalovaného výkonu na 1 ha pole.



Obr. 3.1-5: Příklad rozmístění PV modulů (půdorysný rozměr pole 3,5 m)

3.1.2.2 Vertikální systém

U vertikálního systému je významně nižší plocha řady, jelikož půdorysný rozměr je cca 161 mm, tzn. s uvažováním 50cm odstupů od kraje pak vychází půdorysný rozměr na 2,61 m. Pokud budeme uvažovat stejně dlouhé řady jako v předchozím případě (3 × 300 m), vychází celkem cca 58 trojřad modulů:

$$S_{pole} = 300 \cdot 2,61 \cdot 3 = 2\,349 \text{ m}^2$$

$$\text{Počet trojřad} = \frac{137\,024}{2\,349} = 58,33$$

Při uvažování 2,61m rozměru řady tak dostáváme rozestupy (počet trojřad - 1) mezi řadami, aby byla dodržena podmínka max. 20% záboru půdy:

$$\text{Rozestup trojřad} = \frac{968 - 58 \cdot 2,61}{57} = 14,33 \text{ m}$$

Z uvedeného jasně vyplývá, že v případě tohoto typu konstrukcí opět není nutné řešit 4,5m uličky z pohledu pokrytí moduly, ale pouze z pohledu existence komunikace, tzn. musí existovat uličky pro průjezd techniky, kde nebudou pěstovány žádné zemědělské plodiny, nicméně je možné je

umístit vhodně v souladu se zemědělským záměrem. Rozmístění modulů bude prakticky totožné s již uvedeným příkladem, pouze bude namísto 33 trojřad 58 řad.

Z pohledu instalovaného výkonu vychází výpočet z faktu, že obvyklou konstrukcí je 2L, tzn. 2 moduly horizontálně nad sebou. Rozteč konstrukcí je cca 2,28 m, tzn. do jedné 300m řady je možné umístit 131×2 ks PV modulů. Celkový instalovaný výkon je pak:

$$P_{inst} = (131 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 58) \cdot 500 = 22,79 \text{ MW}_p$$

V přepočtu na plochu celého zemědělského pole lze tedy zhruba počítat s 0,2 MW_p instalovaného výkonu na 1 ha pole.

3.1.2.3 Systém se sledovačem slunce v horizontální ose (HSAT - Horizontal single-axis solar tracker)

Systémy se sledovačem slunce jsou z pohledu záboru plochy velmi podobné. Půdorysný zábor plochy je dán krajní pozicí trackeru, která je udávána obvykle ve stupních. Délka trackeru je obvykle omezena, tudíž umístění řad je dáno kromě požadavků H-normy a vyhlášky samotným technickým řešením trackeru. Při uvažování běžného jednořadého trackeru (z důvodu požadavků vyhlášky není prakticky možné použít dvouřadé trackery, které vyžadují spojení dvou řad, a tudíž limitují zemědělskou činnost) lze rozdělit řadu na 6 polí po cca 140 m (dle technických možností jednotlivých trackerů). Jako příklad lze uvést tracker se 700W_p moduly, tzn. cca 100 modulů na 1 řadu. Výška modulu je cca 2,38 m a při krajní pozici (60°) lze pomocí goniometrických funkcí snadno spočítat půdorys jako:

$$\text{půdorysná šířka} = 2,38 \cdot \cos(60^\circ) = \text{cca } 1,2 \text{ m}$$

S uvažováním 50 cm odstupem od kraje pak vychází půdorysný rozměr na 2,2 m. Pokud budeme uvažovat 6 jednotlivých 140 m dlouhých řad, vychází celkem cca 74 šestiřad modulů:

$$S_{pole} = 140 \cdot 2,2 \cdot 6 = 1\,848 \text{ m}^2$$

$$\text{Počet šestiřad} = \frac{137\,024}{1\,848} = 74,15$$

Při uvažování 2,2 m rozměru řady tak dostáváme rozestupy (počet šestiřad - 1) mezi řadami, aby byla dodržena podmínka max. 20 % záboru půdy:

$$\text{Rozestup trojřad} = \frac{968 - 74 \cdot 2,2}{73} = 11,03 \text{ m}$$

Z uvedeného jasně vyplývá, že v případě tohoto typu konstrukcí opět není nutné řešit 4,5m uličky z pohledu pokrytí moduly, ale pouze z pohledu existence komunikace, tzn. musí existovat uličky pro průjezd techniky, kde nebudou pěstovány žádné zemědělské plodiny, nicméně je možné je umístit vhodně v souladu se zemědělským záměrem. Rozmístění modulů bude opět velmi podobné předchozímu případu, pouze bude rozděleno více uličkami z konstrukčních důvodů trackerů.

Z pohledu instalovaného výkonu vychází výpočet z typu 1P, tzn. HSAT s jedním modulem ve vertikální pozici, a to z důvodu výšky záměru (estetika). Jak již bylo diskutováno, do jednoho PV pole je možné umístit cca 100 PV modulů o výkonu 700 W_p. Celkový instalovaný výkon je pak:

$$P_{inst} = (100 \cdot 6 \cdot 74) \cdot 700 = 31,08 \text{ MW}_p$$

V přepočtu na plochu celého zemědělského pole lze tedy zhruba počítat s 0,3 MW_p instalovaného výkonu na 1 ha pole.

3.2 Rizikové faktory agrovoltaiky

Agrovoltaika je relativně velmi mladým odvětvím. Koncept byl poprvé představen v roce 1981 A. Goetzbergerem [3.4] a od té doby se značně rozvinul, a to zejména díky rapidnímu poklesu cen technologií. Zatímco cena fotovoltaických instalací v roce 2010 se pohybovala okolo 3 200 EUR/kW_p, dnešní náklady lze odhadnout na zhruba 600 EUR/kW_p (u velkých solárních parků i na cca 400 EUR/kW_p). Díky snadné dostupnosti se tak začaly o fotovoltaiku zajímat i uživatelé, kteří by o ní dříve neuvažovali. To však s sebou nese i jistá rizika, jelikož do provozu vstupují další rizika, která dříve výrobci fotovoltaických komponent neřešili. Jako rizikové faktory lze identifikovat následující oblasti:

- pohyb osob (nebo zvířat) bez elektrotechnické kvalifikace (dále jen „laici“) v bezprostřední blízkosti výroby,
- organické látky,
- postupy pro obhospodařování a sklizení plodin.

Rizikem AgPV systémů z pohledu farmáře může být i vliv na produkci zejména konvenčních plodin.

3.2.1 Rizika AgPV systémů z hlediska zemědělského hospodaření a plodin

V případě vertikálních i horizontálních agrovoltaických systémů koncipovaných s ohledem na využití jejich stínů a konstrukcí pro cílenou produkci stínomilnějších plodin (maliny, brambory aj.) se nepředpokládají negativní vlivy na výnos těchto plodin, spíše vlivy pozitivní. Pouze v případě, že by došlo k poruše nebo poškození konstrukcí systémů, jako například jejich zlomení nebo pád v důsledku větru apod., byl by negativní vliv na plodiny odstraněn s odstraněním poruchy.

Určité negativní vlivy a rizika pro výnos zemědělských plodin by bylo možné očekávat v případě instalace agrovoltaických systémů do konvenčních zemědělských porostů našich hlavních plodin (pšenice, kukuřice, ječmen, řepka) nebo energetických plodin (plantáže rychle rostoucích dřevin, ozdobnice) a sadů ovocných dřevin, protože většina těchto plodin je výrazně světlo milných. V případě těchto plodin je proto možné fakticky uvažovat pouze o vertikálních systémech, protože navíc dřeviny často dorůstají poměrně vysoké výšky (5-10 metrů). Instalace horizontálních systémů by vyžadovala významnou změnu aktuální agrotechniky a případně i smluvních závazků (pronájmu).

V případě popínavých vytrvalých kultur (chmelnice, vinice) se nabízí možnost využití podpůrných konstrukcí instalace fotovoltaických modulů, přičemž rizikem může být nižší nosnost a trvanlivost konstrukcí dimenzovaných na jiný účel. Zkušenosti s vlivem AgPV na plodiny, tedy chmel a víno, zatím nejsou, a je tedy možné jen obecně očekávat možné snížení výnosu jejich zastíněním, ale zároveň i zvýšenou ochranu před extrémní počasí jako je krupobití nebo extrémní sluneční záření a sucho.

Specifickou problematikou je pak využití agrovoltaiky v zemědělských porostech dřevin – ovocných sadech a agrolesnických systémech (pěstování dřevin v konvenčních polních kulturách).

3.2.2 Pohyb osob

V případě pohybu osob je nutné zvážit rizika spojená s možným úrazem elektrickým proudem. Jelikož všechny technologie jsou zakrytované, lze toto řešit místním provozním předpisem a tato rizika do jisté míry eliminovat. Zde je vhodné upozornit na fakt, že H-norma v případě systémů na volné ploše, tedy i pro všechny agrovoltaické výroby, dává do závaznosti také normu *ČSN EN IEC 62446-2 Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 2: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Údržba PV systému*. Tato norma definuje potřebnou údržbu systému, a to právě v návaznosti na rizika, která musí být individuálně posouzena pro každou výrobu zvlášť. V tomto případě se tedy bude jednat pravděpodobně o častější kontrolu některých částí výroby. Z pohledu úrazu elektrickým proudem se jedná zejména o sledování izolačního stavu celého systému. Limitní hodnoty vyplývají (mimo jiné) z normy *ČSN EN 62446-1+A1 Fotovoltaické (PV) systémy - Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola* a jsou obvykle nastaveny v měniči. V případě, kdy dojde k selhání izolačního stavu systému, je vhodné na toto pamatovat právě v provozních předpisech, které jasně stanoví, že v takovém případě se v okolí systému nesmí pohybovat laici.

3.2.3 Organické látky

Již v případě existujících systémů, které jsou instalovány v běžných podmínkách, lze v některých případech pozorovat zrychlené stárnutí spojené s působením organických látek, rostlin a zejména mechů. Přestože tyto skutečnosti nejsou běžně prezentovány a ani záruční podmínky výrobců PV komponent je explicitně nezmiňují, předpokládá se, že moduly budou udržovány čisté (moduly jsou standardně testovány pouze solnou mlhou a na odolnost vůči korozi způsobené amoniakem). Toto nutně vede opět k plánu údržby, který na toto musí pamatovat. Pro ilustraci je na Obr. 3.2-1 patrný mech prorůstající do rámu modulu, který, pokud není odstraněn, způsobuje nejprve trvalé stínění, ale při prorůstání pak destrukci PV modulu (postupná degradace těsnění způsobí průnik vody dovnitř modulu, následnou delaminaci a ztrátu izolačních vlastností).



Obr. 3.2-1: Mech prorůstající do rámu modulu

3.2.4 Postupy pro obhospodařování a sklízení plodin

Mezi kritické postupy z pohledu provozu fotovoltaiky patří hnojení, sekání trávy, postřiky, sklizeň, a dýmování.

Hnojení v případě horizontálních systémů znamená prakticky pouze zvýšené riziko zašpinění modulů a případné působení korozivních látek. V případě vertikálních systémů však představuje značné riziko ve spojitosti s rozhazováním granulí, které mohou poškodit instalované PV moduly. Při plánování agrovoltaičké výroby je tak nutné toto vždy zohlednit. V souvislosti s hnojením a obecně využíváním chemických látek je také nutné zohlednit toto při ukládání kabeláže – pokud hrozí průnik těchto látek ke kabelům, byť uloženým v zemi, je potřeba již ve fázi projektu řešit jejich uložení tak, aby bylo minimalizováno riziko jejich poškození.

Sekání trávy (resp. obecně jakýchkoliv plodin) je proces, který je kritický i pro klasické PV systémy. Odletující kameny při nárazu na PV modul mohou tento poškodit. Toto je problematické zejména při úderu do zadní strany modulu, jelikož případné poškození fólie vede nejprve ke vzniku hot-spotu a poté obvykle k prasknutí předního krycího skla. V každém případě dochází k destrukci modulu vyžadující jeho výměnu.

Výrazným problémem mohou být postřiky plodin. Postřiky jsou obvykle tekutiny s vysokou adhezí k povrchu a v případě zasažení modulů může být problematické moduly udržet čisté. Přestože z přední strany modulů dochází k poškození pouze minimálně, zadní strana bude na tento typ znečištění pravděpodobně velmi citlivá. V případě využívání postřiků lze tedy doporučit využít dostatečně vysokou konstrukci nebo alespoň moduly se zadní krycí vrstvou ze skla (rozdělení modulů bude předmětem následující kapitoly).

Během sklizně může docházet jednak opět k odlétání kamenů, kusů plodin apod. a jednak k vyšší fluktuaci osob. Fotovoltaika tudíž musí být schopna rychlého vypnutí a veškeré vypínače musí být z tohoto pohledu dobře dostupné i laikům. Dále není vhodné využívat nadzemní vedení pro spojování jednotlivých částí PV systému, a to právě z důvodu rizika jejich poškození (nebo musí být vedeny v dostatečné výšce).

Posledním rizikem jsou specifické postupy využívané v sadech. Přestože agrovoltaičké systémy dokáží v zimě zvýšit v době mrazu teplotu v okolí plodin o cca 1 °C, pro efektivní ochranu před typickými jarními mrazy je potřeba doplňkové opatření. V případě sadů se využívá často zakouření (dýmování), zavlažování a rozprašování vody, víření vzduchu nebo ohřívání. Z pohledu agrovoltaičky je kritické zejména dýmování, kdy se využívají obvykle svíčky proti mrazu a peletové boxy. Ty jsou zapáleny mezi stromy a ohřívají okolní vzduch, který svým prouděním zvyšuje teplotu v okolí květů. Přestože fotovoltaické komponenty jsou testovány i z pohledu odolnosti vůči zapálení a díky retardérům hoření hoří jen velmi neochotně, rozhodně se nejedná o běžný postup, tudíž je potřeba mít k dispozici dostatek protipožárních opatření a uzpůsobit tomu i místní provozní předpisy. Jistým řešením může být technologie, která je využívána v některých oblastech za účelem odtávání sněhu. Jedná se o měnič, který umožňuje jednak výrobu z AgPV a jednak opačný jev, tzn. napájení PV modulů proudem. Je potřeba si uvědomit, že při stavbě AgPV bude k dispozici přípojka elektrické energie, která dosud na poli být nemusela, a tudíž je možné podobnou technologii využít pro ohřev modulů v době největších mrazů (statisticky obvykle mezi 5. a 6. hodinou ranní, tudíž mimo dobu slunečního svitu). Řešení je sice relativně energeticky

náročné, nicméně může být plně automatizováno a dálkově ovládáno v případě skutečné potřeby tepla.

3.3 Vhodné komponenty

3.3.1 Typy fotovoltaických článků a modulů z pohledu materiálu

Fotovoltaický modul je zařízení, které pracuje na principu přímé přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Tato přeměna je realizována prostřednictvím PV článků z nejčastěji polovodičového materiálu, které jsou dále vhodně zapouzdřeny, aby odolávaly environmentálním vlivům.

Vzhledem k dlouhé tradici výroby (první praktické použití PV modulů spadá do 60. let 20. století) a také dostupnosti je v současné době většina fotovoltaických článků vyráběna z krystalického křemíku. Nicméně během rozvoje fotovoltaiky byly s ohledem na relativně vysokou cenu krystalického křemíku patrné mnohé snahy o zlevnění výroby a byly postupně vyvíjeny nové materiály i technologie, zejména pak technologie tenkovrstvé.

Konstrukce PV článků závisí na vlastnostech výchozího materiálu. Pokud má materiál tzv. přímou pásovou strukturu (např. GaAs), je možné sluneční záření plně absorbovat ve vrstvě silné jednotky μm . Pokud je pásová struktura nepřímá (např. křemík), absorpční koeficient roste s energií fotonu pozvolně a pro absorpci dlouhovlnné části slunečního spektra je třeba materiál o tloušťce řádově stovky μm .

3.3.1.1 Články z krystalického křemíku

Výchozím materiálem je destička krystalického křemíku. Podle technologie výroby je možné články rozdělit do tří skupin:

- monokrystalické,
- multikrystalické (polykrystalický Si se zrna o velikosti nad 1 mm),
- páskové – ribbons (dnes už se nepoužívají).

Monokrystalické PV články jsou vyráběny z monokrystalického ingotu křemíku. Ingot je rozřezán diamantovou pilou na destičky. Následuje odleptání zhmožděné vrstvy, texturace povrchu pro snížení odrazivosti materiálu, difúzní procesy pro vytvoření PN přechodu a dále různé procesy dle konkrétního typu (PERC, PERT, TOPCon). Účinnost se pohybuje okolo 25 % v současnosti, v době před 10 lety dosahovala cca 18 %.

Multikrystalické (též nesprávně nazývány polykrystalické) PV články se vyrábějí z multikrystalického ingotu křemíku obdobným způsobem jako monokrystalické. Pro snížení rekombinačních ztrát na hranicích zrn je navíc prováděna tzv. pasivace (volné vazby na hranicích zrn jsou obsazeny vodíkem). Účinnost současných multi c-Si článků je okolo 20 %, před 10 lety byla cca 17 %. Tento typ modulů se již dnes prakticky nevyužívá.

Kromě křemíkových článků existují i články z jiných materiálů, které jsou však pro svou vysokou cenu využívány jen pro speciální účely např. ve vesmírných aplikacích (InP, GaAs) nebo koncentrátorových systémech. Pro články do koncentrátorových systémů jsou často užívány jako výchozí destičky z germania.

3.3.1.2 Tenkovrstvé články

Z důvodu úspory materiálu (a tím i nákladů) byly vyvinuty tenkovrstvé PV moduly. Proti krystalickým modulům často dosahují, díky svým vlastnostem zejména při difúzním ozáření, vyšších ročních výnosů na jednotku instalovaného výkonu. Jejich použití v podmínkách ČR je pak vhodné všude tam, kde není omezení dané plochou pro instalaci. Na druhé straně vzhledem k jejich nižší účinnosti je potřeba větší plocha modulů, a s tím stoupají nároky na BOS (komponenty „balance of system“⁷), takže při současné nízké ceně článků, resp. modulů, z c-Si může být cena celého fotovoltaického systému vyšší. Nezanedbatelným rizikem je i menší spolehlivost tenkovrstvých systémů a častější případy časně degradace způsobené nedodržáním technologické kázně při výrobě modulů. Naopak výhodou je možnost nanesení citlivé vrstvy na více druhů substrátů, což umožňuje výrobu například pružných PV modulů pro střešní krytiny.

V současné době je nízká cena tenkovrstvých článků značně diskutabilní, neboť díky prudkému rozvoji fotovoltaiky v celosvětovém měřítku (zejména v Číně) došlo k tak výraznému snížení nákladů na výrobu konvenčních Si krystalických modulů, že jim tenkovrstvé moduly jen velmi obtížně konkurují. Důvodem je i zvýšení podílu nákladů za sklo a pouzdrící materiály, které jsou u tenkovrstvých i krystalických modulů takřka totožné. V neposlední řadě je nevýhodou tenkovrstvých modulů v současnosti vyšší cena teluru a india.

Z hlediska materiálu je možné dělení PV modulů na:

- Moduly CuInSe_2 (CIS), Cu(In, Ga)Se_2 (CIGS) a CuGaSe_2 (CGS),
- CdTe moduly,
- Moduly z amorfního a mikromorfního křemíku,
- Ostatní tenkovrstvé články:
 - Vícepřechodové,
 - Články využívající nanostruktur,
 - Organické články.

3.3.1.3 Tandemové články

Současným trendem je kromě optimalizace struktury samotného křemíkového článku jeho doplnění o další vrstvu. Vznikají tak tandemové články, které byly dříve označovány jako vícepřechodové a byly chápány spíše jako vysoce účinné struktury využívané z důvodu vysoké ceny prakticky výhradně v koncentrátorových PV systémech. Dnes jsou tak označovány i relativně běžné struktury, např. HJT. HJT je kombinace krystalického křemíkového článku s vrstvou amorfního křemíku. Díky tomu dochází k lepšímu využití slunečního záření. Nejnovějším trendem je pak kombinace krystalického křemíku a perovskitu, která se letos (2024) dočkala již i první výroby v průmyslovém měřítku (čínská společnost GCL), nicméně komerčně dostupné moduly dosud k dispozici nejsou.

3.3.2 Konstrukce PV modulů

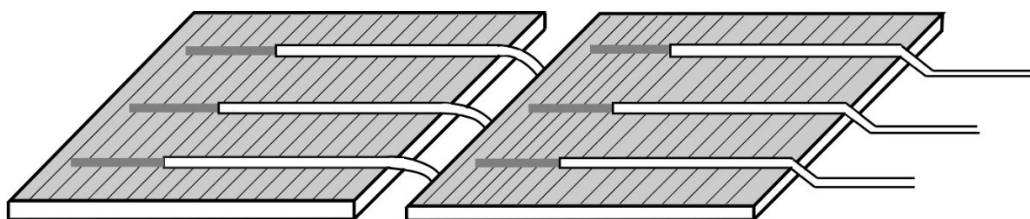
Dalším možným dělením PV modulů je dle konstrukce. Články se obvykle pro praktické aplikace spojují do série, a to z důvodu jejich nízkého napětí (cca 0,6 V na článek). Takto spojené články je třeba uspořádat tak, aby byla maximálně využita plocha a zapouzdřit tak, aby články byly ozařovány s minimálními optickými ztrátami a ochráněny jak proti mechanickému poškození, tak

⁷ BoS komponenty zahrnují všechny součásti projektu kromě solárních fotovoltaických modulů. Terminologie pochází z doby, kdy solární fotovoltaické moduly tvořily většinu výdajů projektu.

nepříznivým účinkům vnějšího prostředí. Výsledný produkt je označován jako fotovoltaický modul. Konstrukce a technologie modulů závisí na typu fotovoltaických článků.

Velmi důležité je využití plochy, proto se v případě krystalických článků používají články čtvercového (obdélníkového) tvaru. Prvním krokem k vytvoření modulu je propojení PV článků do řetězců. K tomu se používá více postupů. Nejběžnější z nich je pájení. Každý článek je vybaven přípojnícemi (busbary), které slouží jak k odběru proudu, tak k propojení článků. Pro připojení se používají měděné pocínované (Sn-Pb) pásky. Tyto pásky jsou připájeny k přípojnícím PV článků pomocí pájky. Zatím se stále používá cín-olověná pájka, a to z důvodu nižší teploty tání, a tudíž nižšího tepelného namáhání, a tím i mechanického napětí, vznikajícího pájením. Propojovací měděné pásky musí překrývat velkou část přípojnice, protože vodivost přípojníc z vypalovaných vodivých past je relativně nízká. Nejběžnější propojení standardních krystalických článků je znázorněno na Obr. 3.3-1.

Pro realizaci modulu jsou vybírány články s malým rozptylem I_{mp}^{p} . Jednotlivé články jsou pospojovány do řetězců a ty jsou následně vodivě spojeny tak, aby vytvořily matici článků, která obvykle obsahuje několik jednotlivých řetězců spojených v sérii, případně paralelně, nebo sério-paralelně.



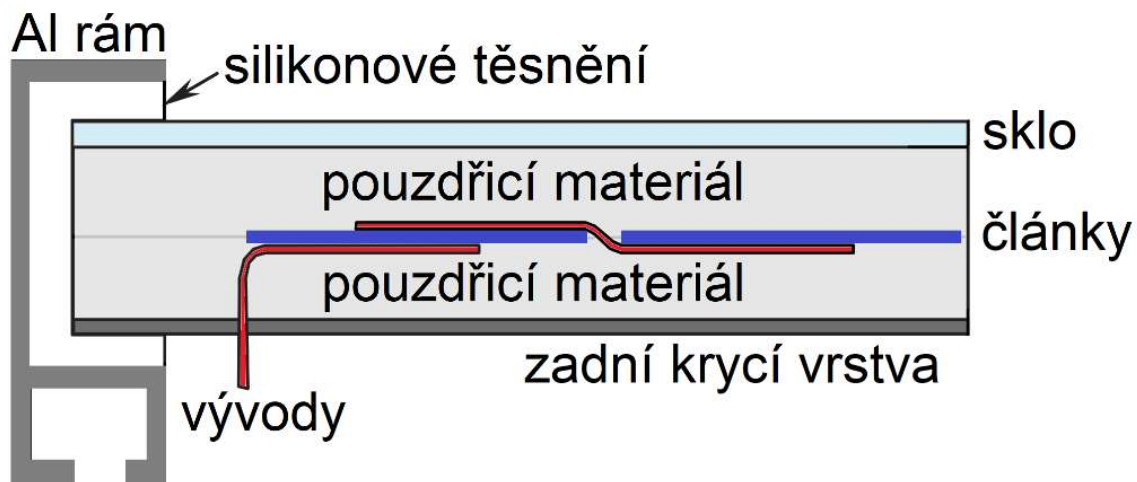
Obr. 3.3-1: Pájené spojení jednotlivých článků

U tenkovrstvých modulů, kde jsou vrstvy nanесeny na nosný substrát (nejčastěji sklo, případně nerezový plech), jsou články vytvářeny drážkováním nanесených vrstev (nejčastěji laserem). Při vhodném drážkování jsou články spojeny přímo do požadované sério-paralelní kombinace bez nutnosti pájení. Kontaktování je u modulů provedeno nanесením vrstvy vhodně dotovaného oxidu s velkou šířkou zakázaného pásu, který funguje jako transparentní vodivá elektroda (TCO). Moduly jsou díky tvaru článků – obvykle úzké dlouhé pruhy, méně citlivé na zastínění než konvenční krystalické moduly (pokud není zastíněn celý proužek).

Samotné pospojování jednotlivých článků však není modulem. Takto spojené články je třeba ještě zapouzdřit do řady vysoce transparentních izolačních materiálů, a tak chránit články před negativními účinky vlhkosti a vzniku zkratů nebo elektrochemické koroze kontaktů. Pronikání vlhkosti (případně jiných látek) krycí vrstvou způsobuje řadu degradačních procesů. Jako krycí transparentní materiál, poskytující rovněž mechanickou ochranu, se používá tvrzené sodnovápenaté sklo s velmi nízkým obsahem železa. Prostor mezi sklem a PV články je třeba vyplnit transparentním materiálem o vhodném indexu lomu (nejlépe stejný index lomu jako sklo), aby nedocházelo k optickým ztrátám na rozhraní materiálů. Zároveň tento materiál musí být v rozsahu pracovních teplot elastický (elastomer), aby vyrovnával mechanické namáhání, vyvolané různou teplotní roztažností skla a křemíku. Rozsah pracovních teplot je omezen zdola

⁸ Proud v bodě maximálního výkonu.

teplotou skelného přechodu, shora teplotou měknutí laminujícího materiálu, případně jeho nevratnou degradací. Výsledná konstrukce modulu je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 3.3-2 Struktura krystalického křemíkového modulu (struktura nerespektuje měřítko)

Zadní krycí vrstva tvořená dříve prakticky výhradně polymerem je dnes tvořena také druhým krycím sklem, podobně jako u tenkovrstvých modulů, kde je konstrukce typu sklo-sklo daleko běžnější. Modul má tak výrazně vyšší mechanickou spolehlivost. Na druhou stranu je potřeba soustředit se také na typ skla, jelikož dříve výhradně tvrzené sklo je dnes nahrazováno sklem polotvrzeným, popřípadě netvrzeným. Konstrukce sklo-sklo také umožnila (spolu s dalšími technologickými úpravami) rozvoj tzv. bifaciálních modulů, tedy modulů schopných absorbovat a využít světlo z obou stran.

Posledním aspektem je přítomnost rámu a jeho vlastnosti. Dnešním trendem je využívání užších rámu, které často nemají dostatečnou mechanickou stabilitu a lze tudíž doporučit fyzickou prohlídku modulu před jeho zakoupením. Toto platí pro všechny systémy a pro agrovoltaické kvůli vyššímu namáhání (umístění ve vyšší poloze, poryvy větru při vertikální orientaci,...) dvojnásob.

3.3.3 Vhodné typy modulů pro horizontální agrovoltaiku

Z pohledu konstrukce a typu se jako vhodné typy jeví takové moduly, které umožní efektivní pěstování plodin v jejich blízkosti. Pokud jsou plodiny pěstovány pod PV moduly, lze se zaměřit na tzv. semi-transparentní PV moduly, které mají velké rozestupy mezi články a stíní tak jen částečně. Obvykle je možné zvolit PV modul s konkrétní mírou přistínění (např. 12% transparence). Jedná se o moduly s konstrukcí typu sklo-sklo. Moduly jsou umístěny ve výšce a obtížně se čistí. Na jejich hranách hrozí během provozu usazování nečistot v blízkosti rámu. Z tohoto důvodu lze doporučit bezrámovou konstrukci. V případě nižších konstrukcí lze využít prakticky jakýkoliv moduly, nicméně stále je vhodná konstrukce typu sklo-sklo.

3.3.4 Vhodné typy modulů pro vertikální agrovoltaiku

Vertikální systémy s nakloněnou konstrukcí (nebo trackery) jsou v podstatě běžné PV systémy. Lze tudíž použít prakticky jakýkoliv PV modul, s výhodou opět modul typu sklo-sklo, ideálně pak bifaciální.



Obr. 3.3-3: Agrovoltaický systém se semi-transparentními moduly

V případě čistě vertikální fotovoltaiky (PV moduly kolmo na horizontální rovinu) je vhodné využít bifaciální moduly s co největší mírou bifaciality. Zde je potřeba upozornit na fakt, že nejnovější technologie nemusí nutně znamenat, že mají největší bifacialitu. Moduly IBC-HJT (tandemové moduly s kontaktním systémem pouze na jedné straně) mají např. bifacialitu pouze cca 35 %, zatímco běžné HJT moduly cca 92 %.

3.3.5 Další komponenty

Mezi další komponenty patří zejména měniče, optimizéry a baterie. Měníče je možné volit prakticky bez omezení, ale je vždy potřeba zvážit, jaké funkcionality mají měniče mít. Pokud bude mít systém vlastní spotřebu, je vhodné využít takové měniče, které lze bez problémů monitorovat a dálkově řídit přes MODBUS⁹ a je k nim poskytována dostatečná podpora (evropské značky, resp. evropské centrály pro servis a údržbu).

Zajímavým komponentem je optimizér, který umožňuje využití PV modulů s různou mírou stínění. Toto je vhodné zejména u systémů se složitým stíněním, kde jsou optimizéry spíše než volbou nutností.

Nejvíce diskutovaným komponentem je bezesporu baterie. Baterií je k dispozici velké množství, nicméně u velkých systémů se jedná spíše o kontejnerová řešení. Při plánování výroby s baterií je nezbytné zaměřit se zejména na funkcionality, které dokáže bateriové úložiště poskytnout. Pokud je plánovaná výroba s vlastní spotřebou, lze o baterii uvažovat.

⁹ MODBUS je standardním průmyslovým protokolem pro komunikaci různých zařízení.

3.4 Vhodná topologie z pohledu připojení k síti

Při návrhu AgPV systému je vhodné kromě samotného rozložení PV modulů, které vyplývá do značné míry z omezení daných H-normou a Vyhláškou AgPV (viz kapitola 3.1) uvažovat také nad využitím energie. Z tohoto pohledu je nutné pochopit rozdíl mezi přímým prodejem, komunitním sdílením a přímým vedením (popřípadě lokální distribuční soustavou).

Pokud je Agrovoltaický systém provozován na místě s velmi malou nebo bez jakékoliv vlastní spotřeby, resp. daleko od objektů (areálů), které elektrickou energii spotřebovávají, bude uplatnění elektrické energie, a tudíž i návratnost celé investice do výroby, značně problematické. Vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům na agrovoltaickou výrobu oproti klasické PV elektrárně lze očekávat návratnost pouze tam, kde představuje agrovoltaika jen část investic, které by stejně musely být vynaloženy (např. v případě konstrukcí sloužících pro ochranu před špačky a kroupami).

V případě komunitního sdílení, tzn. energie bude dodávána do komunity, kterou může představovat vlastní síť odběrných míst, je nutné založit energetické společenství.

Principem komunitního sdílení elektřiny je výroba a odběr v daném časovém úseku společně, tzn. pokud subjekt nespotřebovává, může přebytky dodat do své komunity – energetického společenství. Je potřeba si uvědomit, že společenství není zakládáno za účelem zisku, ale úspor, tzn. je možné dosahovat zisku jen do jisté míry (dle právní formy). Navíc je v tomto případě nutné vždy hradit distribuci, resp. regulovanou složku ceny elektrické energie. Úspora tak vzniká jen a pouze v platbě za silovou elektrickou energii.

V zemědělských areálech a přilehlých objektech lze jako vhodnou topologii doporučit vlastní přímé vedení. Vybudování přímého vedení je sice investičně náročnější, nicméně znamená úsporu za celkovou platbu za energii. Častým omylem při plánování PV systémů obecně (totéž platí i pro AgPV systémy) je právě fakt, že pokud je využíváno sdílení uvnitř jednoho objektu v rámci komunitního sdílení, není odběratelem hrazen distribuční poplatek. Bohužel tomu tak není. I v případě sdílení např. v rámci bytového domu, tzn. výroba i odběrná místa jsou v jednom objektu, je účtována plná sazba za distribuci. Rozhodující je počet odběrných míst.

Při plánování agrovoltaické výroby tak lze doporučit důkladně promyslet způsob vyvedení výkonu, tzn. umístění trafostanice a odběrných míst.

3.4.1 Trendy v oblasti návrhu Agrovoltaických systémů

Zajímavou problematikou spojenou s Agrovoltaickou je samotný návrh systému, resp. modelování výnosů. Kromě klasických SW pro modelování výnosů z fotovoltaických systémů je využíváno také modelování množství dopadajícího záření při různé topologii systémů. Toto záření je možné rozdělit na přímé, difuzní a globální (celkové). Díky funkci, která dobře popisuje účinnost fotosyntézy na ozáření je tak možné modelovat růst plodin v závislosti na ozáření, ale také jej topologií PV systémů ovlivnit [3.5].

Literatura – kapitola 3

- [3.1] vyhláška o agrovoltaické výrobě (v přípravě)
- [3.2] zákon o ochraně zemědělského půdního fondu č. 334/1992 Sb.
- [3.3] norma ČSN P 73 0847:2024 Požární bezpečnost staveb – Fotovoltaické (PV) systémy
- [3.4] A. GOETZBERGER & A. ZASTROW (1982) On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation, *International Journal of Solar Energy*, 1:1, 55-69, DOI:10.1080/01425918208909875
- [3.5] Sánchez, Hugo & Dittmann, Sebastian & Meza, Carlos & Gottschalg, Ralph. (2023). Comparison of different AgriPV layouts in terms of photovoltaic energy yield output. 10.4229/EUPVSEC2023/4DO.2.2.

4 Vzájemná interakce agrolvoltaiky a zemědělství

4.1 Zkušenosti z provozu agrolvoltaických výroben

4.1.1 Existující systémy v ČR

Jelikož legislativa v ČR dosud v podstatě neumožňuje provoz agrolvoltaických výroben ve smyslu definice, tzn. instalaci na orné půdě, jsou všechny systémy dosud pouze ve fázi experimentů. Ve VÚKOZ, v.v.i. existuje malý experimentální systém kombinující fotovoltaiku a agrolesnictví (AGFPV) – viz dále. Dalším příkladem experimentálního AGPV systému je AgPV systém realizovaný MND, který je instalovaný na menší vinici vzniklé na brownfieldu v lokalitě obce Starý Poddvorov. Instalovaný výkon tohoto systému je 99 kWp a veškerá vyrobená elektřina je spotřebovávána v místě.

4.1.1.1 VÚKOZ – AgPV Michovky

Za účelem detailního zkoumání a vyhodnocení agrolvoltaických systémů v reálném provozu byl v lednu roku 2021 instalován a zprovozněn experimentální pokus kombinující agrolesnický systém (AFS) s agrolvoltaickým systémem. Tato polní experimentální AGFPV¹⁰ instalace je umístěna na výzkumné stanici Michovky (49°59'36.31"N, 14°34'8.90"E, AFS-1; 0,6 ha), která je provozována v rámci Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v.v.i. (VÚKOZ, v.v.i.).

Tento experiment je jedinečný právě v tom, že kombinuje agrolesnický systém a agrolvoltaický systém a nabízí široké portfolio provozních variant, stavů k dlouhodobému pozorování a měření. Zároveň jsou mezi stromořadími AFS systému pěstovány variantní konvenční zemědělské plodiny. Na těchto výsadbách lze zkoumat dopady a vlivy přilehlého AgFPV systému, zejména zastínění, retence vody v půdě či změny v kvalitě půdy. Každá řada stromů v agrolesnickém systému je dlouhá přibližně 75 metrů. Šířka pásů plodin mezi stromořadími se pohybuje od 8,8 m do 17,5 m a obhospodařují se stejnými plodinami a podobnou agronomií jako na přilehlém poli. Na pásech plodin byly v posledních čtyřech letech (2020-2023) pěstovány brambory (*Solanum tuberosum* L.), ozimá pšenice (*Triticum aestivum* L.), hrách (*Pisum sativum* L.) a jarní ječmen (*Hordeum vulgare* L.).



Obr. 4.1-1: Experimentální AGFPV systém Michovky VUKOZ

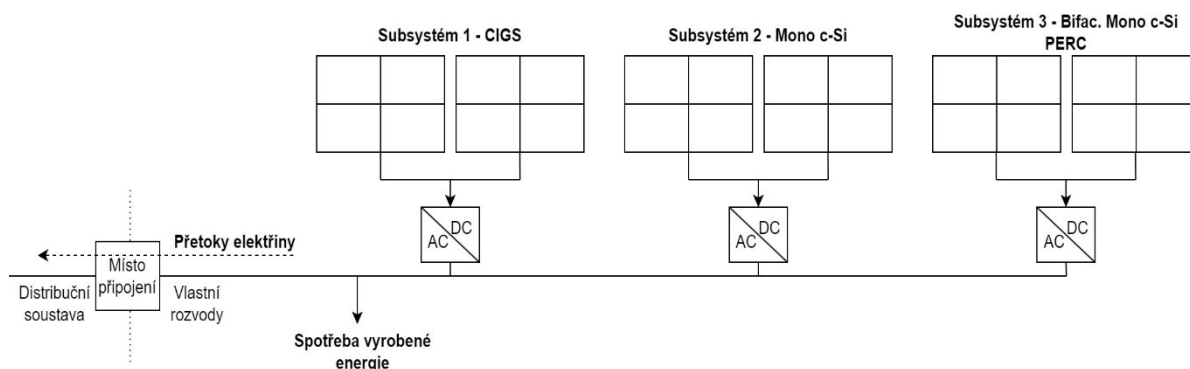
¹⁰ Zkratka je použita pro rozlišení typu AgPV – AgFPV znamená kombinaci fotovoltaiky a agrolesnického systému.

Agrovoltaický systém Michovky disponuje celkovým instalovaným špičkovým výkonem 6,72 kW_p. Agrovoltaický systém disponuje celkem třemi rozdílnými technologiemi fotovoltaických modulů, a to tenkovrstvými (CIGS), monokrystalickými křemíkovými typu PERC a bifaciálními monokrystalickými křemíkovými moduly typu PERC. Experimentální AgFPV systém je složen z celkem 3 subsystémů dle využití technologie PV modulů. Tyto PV subsystémy jsou umístěny na separátních vertikálních konstrukcích s nízkou světlou výškou a s manuálně nastavitelným sklonem panelů v rozsahu 0° až zhruba 175°. Každý subsystém disponuje dvěma konstrukcemi s celkem 4 fotovoltaickými moduly příslušné technologie PV článků. Každý subsystém, tedy celkem 8 PV modulů dané technologie, je připojen na jeden DC/AC měnič. AgFPV systém tedy celkově disponuje 24 kusy PV modulů. Každý PV modul je vybaven optimizérem. Základní technické parametry a specifikace experimentální instalace a zvolených technologií PV modulů jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 4.1. – 1. Technické parametry AGPV systému a využitých FV panelů

Technologie modulů	CIGS	mono c-Si	Bifac. mono c-Si
Jmenovitý výkon [W]	135	325	380
Proud v bodě maximálního výkonu I_{MPP} (A)	2,26	9,89	9,47
Napětí v bodě maximálního výkonu V_{MPP} (V)	59,7	33,13	40,2
Zkratový proud I_{sc} (A)	2,57	10,22	9,97
Napětí naprázdno V_{oc} (V)	78,9	40,94	48,5
Účinnost modulu (%)	12,8	19,4	18,9
Celkový výkon [W_p]	1 080	2 600	3 040

Výsledné zapojení AGPV systému a jeho subsystémů je schématicky zobrazeno na Obr. 4.1-2. Zjednodušené schéma reprezentuje základní toky lokálně vyrobené elektrické energie z AGPV. Celá experimentální instalace je osazena měřením ozářenosti, a to v rovině modulu pomocí PV senzorů a globální ozářenosti v horizontální rovině pomocí pyranometrů. Experimentální AGFPV je dále vybaven monitoringem půdních parametrů a měřením klimatických podmínek (srážky, teplota vzduchu, teplota půdy). Měření je umístěno vždy zhruba 2 metry od příslušného subsystému. Výsledky kontinuálního měření parametrů půdy a klimatických podmínek AgFPV systému jsou uvedeny a shrnuty v kapitole 4.2 Vliv AgPV na zemědělskou výrobu.



Obr. 4.1-2: Schéma zapojení AGPV systému

Obrázky níže reprezentují reálné umístění AgFPV subsystému ve stromořadí AFS systému v zimním období.



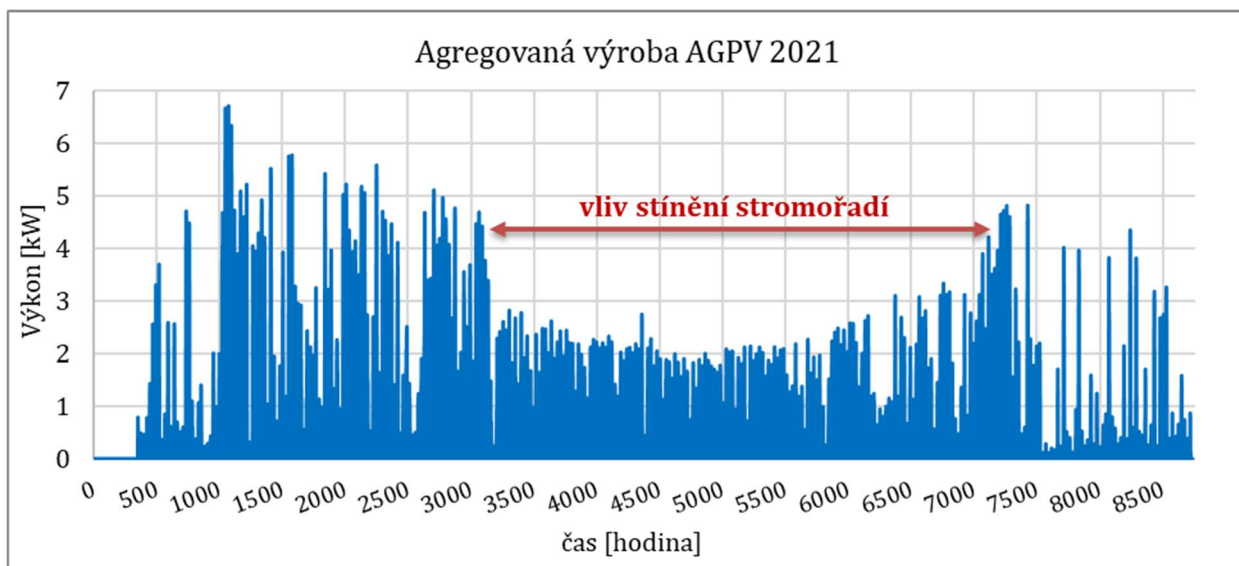
Obr. 4.1-3: Reálná instalace AgFPV systému

AGPV Systém je zapojen do odběrného místa areálu Michovky, ve kterém dochází nad rámec běžné spotřeby energie jako je svícení, čerpání vody pro závlahu, sušení cibulovin atd. k využívání lokálně vyráběné energie pro experimentální sušení dřevní štěpky. Tento pokus byl založen za účelem hledání maximální synergie zemědělských aktivit a lokální AgPV produkce. Pokus spočívá v tom, že pokud je identifikována v čase výroba energie z AgPV nad rámec běžné spotřeby odběrného místa, je aktivováno sušení dřevní štěpky.

Výsledky měření AgPV

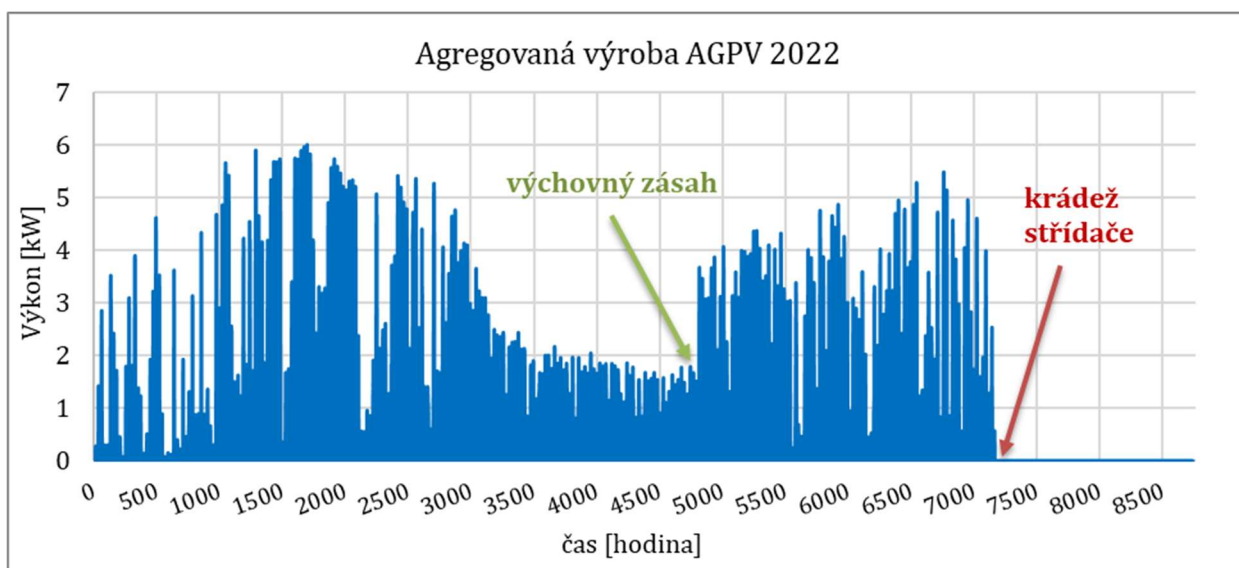
Vyhodnocení provozu AGPV probíhalo v období 2021–2023. Základní hodnocení provozu AgPV se skládá z vyhodnocení celkové agregované výroby AgPV, míry lokální samospotřeby a přetoků do elektrizační sítě, tedy celkové lokálně nevyužitě energie. Je nutno uvést skutečnost, že během provozu AgPV došlo dne 27. října 2022 k odcizení všech třech osazených střídačů. Tato skutečnost vzhledem k nedostupnosti měničů na trhu s fotovoltaickými komponenty v období Q2/2022 – Q2/2023 přerušila kompletně provoz AgPV, a tedy i výrobu energie a měření. Agrovoltaický systém byl znovu zprovozněn dne 25. dubna 2023. Přerušování provozu AgPV má silný vliv na kontinuitu měření vzhledem k harmonogramu experimentálního pokusu a plánované změně sklonů PV modulů jednotlivých subsystémů a výchovných zásahů do stromů AFS systému (prořezy). V návaznosti na tuto skutečnost byl v období 2021–2023 u všech subsystémů zachován sklon 90°. Pro relevantnost měření a vyhodnocení dopadů změny provozních parametrů je vždy zapotřebí disponovat průběhovými měřeními výroby během celého roku.

Následující grafy reprezentují agregovanou výrobu provozovaných subsystémů v období 2021–2023. Z průběhů grafů výroby energie je patrný vliv nastaveného sklonu 90°. Vertikální umístění PV modulů způsobuje vyšší energetické zisky v zimních a jarních obdobích kdy je slunce zpravidla níže na obloze a sluneční záření tak dopadá pod nižším úhlem. V letních obdobích je naopak vertikální nastavení PV modulů z pohledu energetických zisků, tj. výsledné výroby elektrické energie, nevýhodné. Z profilu výroby PV modulů je jasně patrný efekt zastínění PV modulů stromy v příslušném stromořadí.



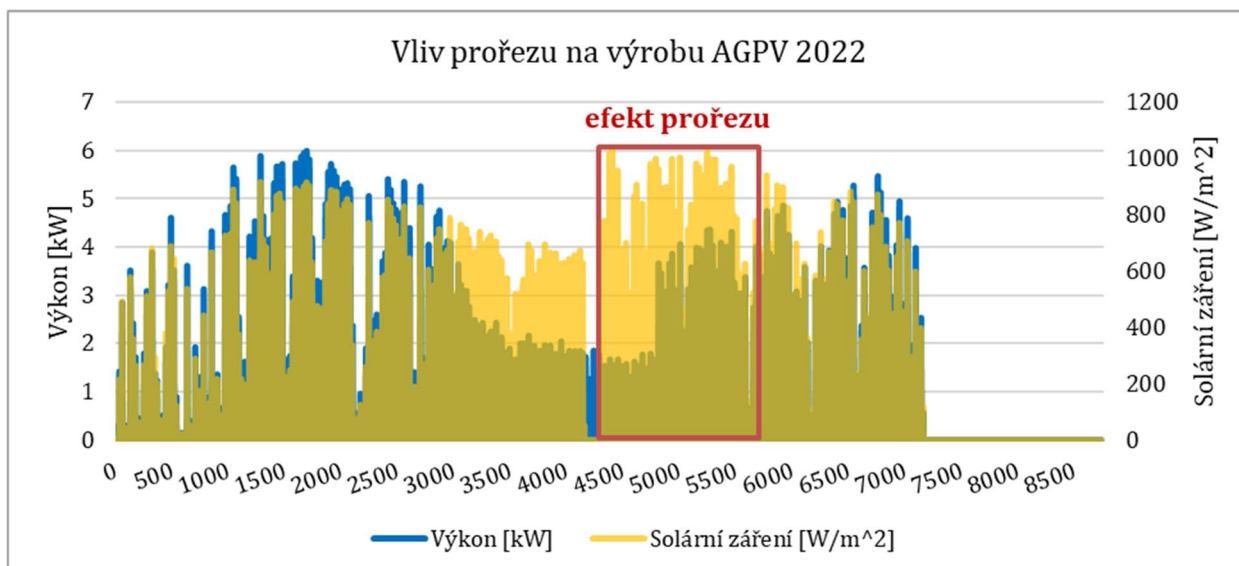
Obr. 4.1-4: Roční agregovaný výrobní profil AgPV, rok 2021

Na grafech níže je podrobně zobrazen agregovaný výrobní profil AgPV v roce 2022, ze kterého je jasně patrný pozitivní efekt arboristických výchovných zásahů – prořezů větví a korun stromů. Tyto zásahy zvýšily téměř dvojnásobně výrobu energie v letním období. Je dobré zmínit, že provedené zásahy nemají negativní dopad na růst stromů a funkci agrolesnických systémů a jejich pozitivní vlivy na okolní prostředí. Z grafu je také patrné odpojení výroby AgPV z důvodu krádeže střídače.



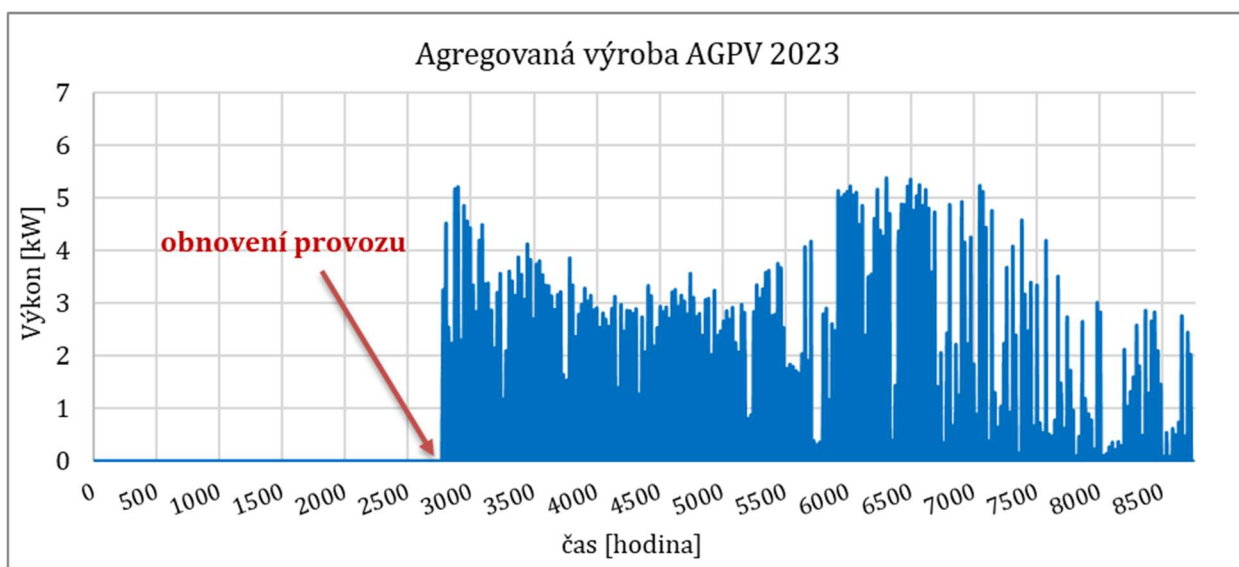
Obr. 4.1-5: Roční agregovaný výrobní profil AgPV 2022

Efekt prořezů korun stromů je patrný při porovnání celkové výroby AgPV a měřeného solárního záření umístěnými čidly ozáření. Výchovné zásahy zvyšují energetické zisky a snižují tak vliv zastínění.



Obr. 4.1-6: Efekt výchovných zásahů do stromořadí na výrobu energie AgPV, rok 2022

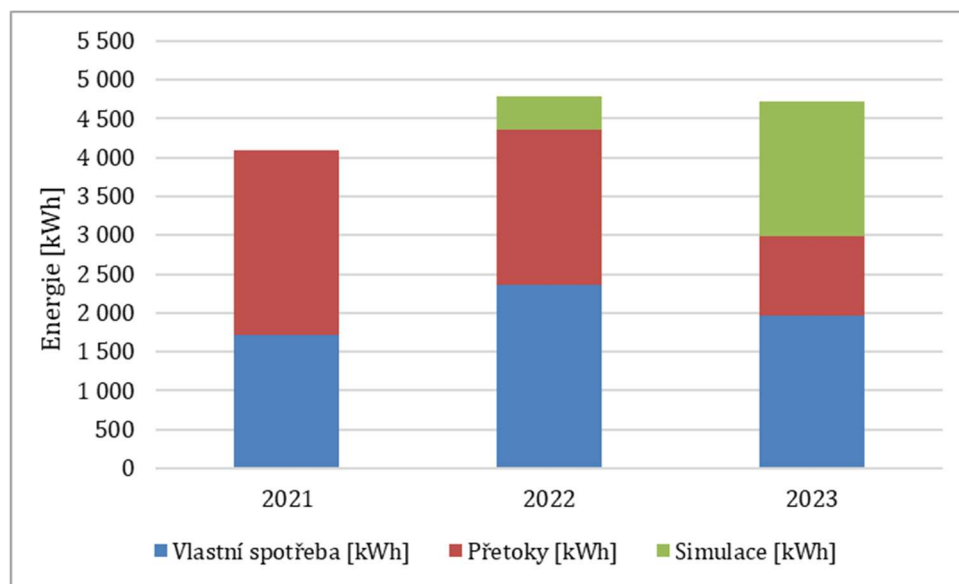
Graf níže zobrazuje profil výroby AgPV po znovuoobnovení provozu a instalaci nových střídačů.



Obr. 4.1-7: Roční agregovaný výrobní profil AGPV 2023

Z důvodu krádeže střídačů byla chybějící průběhová data měření výroby simulována na základě dlouhodobých klimatických dat, průměrného zastínění a sklonu PV modulů. Celkové vyhodnocení je vyneseno na grafu níže. Během roku 2021 bylo vyrobeno celkem 4 092 kWh energie. Z toho 1 719 kWh bylo lokálně spotřebováno a 2 372 kWh přeteklo do sítě. V roce 2022 byla do krádeže naměřena výroba 4 365 kWh. **Celková roční výroba energie by v roce 2022 činila na základě simulace chybějící výroby zhruba 4 800 kWh.** Z reálné výroby bylo celkem 2 364 kWh lokálně spotřebováno a 2 002 kWh přeteklo bez využití do sítě. Zvýšená lokální spotřeba je zapříčiněna instalací lokálního sušení dřevní štěpky s axiálním ventilátorem o příkonu 700 W. Toto zvýšení lokální samospotřeby poukazuje na skutečnost, že AgPV může být vhodnou alternativou pro zemědělce jako lokální zdroj energie při vhodném výběru činností, které budou párovány s profilem výroby AgPV. V roce 2023 bylo sušení štěpky provozováno identicky jako v roce 2022, stejně tak byly realizovány výchovné zásahy stromů. Celková simulovaná výroba v roce 2023

činila cca 4 700 kWh. Reálně byla změřena výroba 2 982 kWh. Z toho 1 959 kWh bylo lokálně spotřebováno a 1 023 kWh přeteklo do sítě.



Obr. 4.1-8: Celkové vyhodnocení provozu AGPV

Účinnost AgPV systému

Účinnost fotovoltaického systému se vypočítá jako poměr dopadajícího záření a měsíční produkce elektrické energie. Účinnost subsystémů dosahuje téměř deklarované účinnosti PV modulů. Průměrná účinnost pro CIGS 1 (subsystém 1) je kolem 11,3 %; pro CIGS 2 (subsystém 2) 10,6 %, zatímco účinnost modulu je 12,8 %. Průměrná účinnost pro mono c-Si 1 (subsystém 1) je kolem 15,2 %; pro mono c-Si 2 (subsystém 2) 14,4 %, zatímco účinnost modulu je 19,4 %. Průměrná účinnost pro bifaciální 1 (subsystém 1) je kolem 15,1 %; pro bifaciální 2 (subsystém 2) 14,3 %, zatímco účinnost modulu je 18,9 %.

Zhodnocení

Z měření experimentální instalace AgPV v letech 2021, 2022 a 2023 byl identifikován silný vliv zastínění stromů AFS. Efekt stínění je patrný zejména od května do října. Zahájení prořezávání stromů systémem AFS bylo plánováno na rok 2022 v rámci polního pokusu. Tyto zásahy výrazně zvyšují hodinovou výrobu elektřiny z AgPV až o 100 % ve srovnání se systémem AgFPV, který není udržován. AgPV instalace dosahovala poměrně dobrých ročních energetických zisků, kolem 4,3 – 5 MWh/rok, při dodržení stanoveného sklonu subsystémů a výchovných řezů přilehlých stromů. Teoretická výroba 1 kW_p FVE za ideálních podmínek v ČR je cca 1 – 1,1 MWh za rok. Relativní energetická účinnost experimentálního AgPV v rámci AFS se pohybovala mezi 64 % a 73 % ve srovnání s teoretickou ideální výrobou PV systémů. Lze tedy předpokládat, že při správně nastaveném sklonu PV modulů AgPV systému a vhodných výchovných zásahů AFS se AgPV v kombinaci s AFS může stát zajímavým synergickým spojením zejména pro lokality s vysokým rizikem eroze půdy.

4.1.2 Existující systémy v Evropě

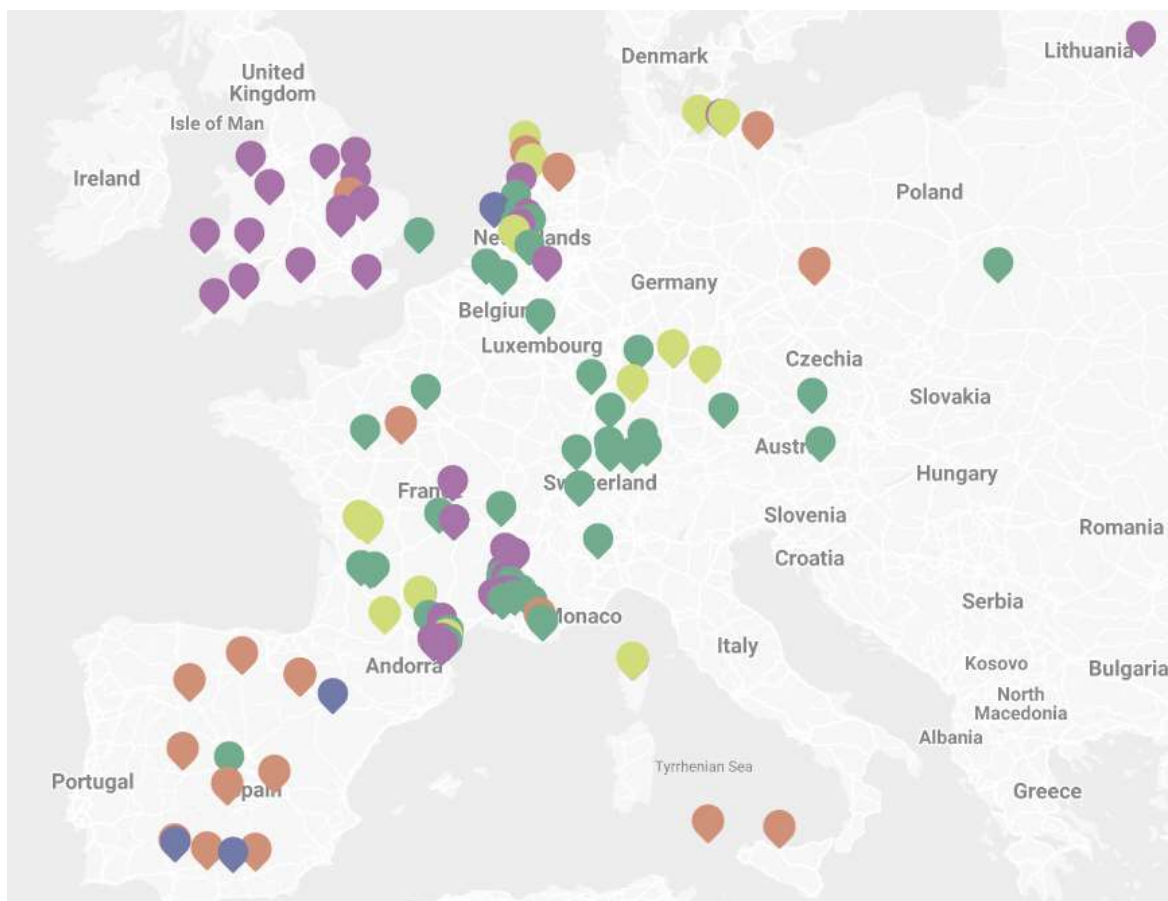
V Evropě existuje celá řada experimentálních i již funkčních AgPV systémů, jejich výčet tudíž není možný. Dobrým vodítkem je nová mapa agrolvoltaických instalací dostupná na stránkách <https://agrisolareurope.org/map/>.

Ze systémů s trvalými kulturami lze zmínit např. projekt SEFRA v Étoile-sur-Rhône, kde jsou pěstovány broskve, višně a meruňky na rozloze 110,2 ha s agrolvoltaickou výrobnou instalovanou na 20,7 ha. Na stránkách provozovatele se lze dočíst, že během mrazů v roce 2022 v údolí Rhôny agrolvoltaické zařízení výrazně snížilo dopad mrazů na broskvoně. Došlo ke ztrátě pouze 9 % květů ve srovnání s 35 % na kontrolní ploše. Dalším systémem je např. systém Mazara del Vallo, v Itálii s instalovaným výkonem 66 MW_p. Na systému jsou instalovány jednoosé trackery. Systém je určen pro pěstování oliv, mandlí, levandule a dalších bylin. Z bobulovin, resp. drobného ovoce, je možné uvést systém s instalovaným výkonem 75 kW_p v Lyonu – Dardilly. Prvně zmíněný systém poskytuje také základní shrnutí zkušeností z provozu (citace týkající se ovocných stromů z [4.2]), které slibují značný přínos pro pěstování ovocných stromů pod fotovoltaickými moduly:

Instalace dynamických agrolvoltaických (DAV) systémů (v podstatě trackery) nad plodiny poskytuje přechodné zastínění. Působí tak jako nástroj ochrany a adaptace ovocných stromů na změnu klimatu, optimalizuje kvalitu produkce ovoce a udržuje vysoké výnosy:

- *Omezení nadměrného slunečního záření a vysokých teplot: v horkém počasí může kontrolované zastínění snížit teplotu ovocných stromů pod DAV až o 4 °C a zároveň zajistit lepší relativní vlhkost; zároveň se vrcholové listy nesvinují a úroveň fotosyntetické aktivity může být zachována.*
- *Snížení rizika mrazu: při průměrném teplotním rozdílu několika stupňů, když se teploměr blíží 0 °C, tepelná přikrývka DAV chrání rostliny před škodlivými jarními mrazy, zejména při rašení pupenů.*
- *Snížení vodního stresu při současném omezení zavlažování: zavlažování je v průměru až o 30 % nižší než na kontrolním pozemku, doprovázené nižší okamžitou spotřebou vody. Toto chrání stromy před občasnými obdobími silného nedostatku vody (který byl o 63 % vyšší na kontrolním pozemku během vlny veder).*
- *Přispívá ke konzistentnější kvalitě produkce: jablka s jednotnou pevností a velikostí, kontrolovaným vybarvením a nižší sladkostí ovoce.*
- *Řízení produkce: systém chrání stromy před škodlivými účinky některých událostí a zvyrazňuje přirozené řídnutí tím, že poskytuje předem definované množství zastínění pro každou fázi plodiny, čímž přirozeně kontroluje opadání ovoce.*
- *Kombinace více řešení ochrany, např. proti dešti a krupobití tím, že je možné instalovat sítě s nižšími náklady.*

Tato experimentální data pocházejí ze tří výzkumných a vývojových programů prováděných od roku 2009 ve spolupráci s INRAE (která vznikla sloučením INRA a IRSTEA).



Obr. 4.1-9: Mapa Agrovoltaických systémů v Evropě [4.1]

4.2 Vliv AGPV na produkční podmínky zemědělské výroby

Záměrně instalované vertikální a horizontální agrovoltaické systémy budou konstruovány již se záměrem pěstování plodin, kterým vzniklé podmínky s nižší sluneční radiací vyhovují, a proto je zde možné očekávat pozitivní vliv na zamýšlenou zemědělskou produkci (např. drobné ovoce – maliny, rybíz nebo okopaniny - brambory). Snížení teplot a evapotranspirace v porostech s AgPV může mít dále pozitivní vliv na adaptaci na dopady klimatické změny (extrémní horka a sucha). (Willockx et al., 2020).

V mnoha případech však zemědělci budou stát před otázkou začlenění agrovoltaických systémů do jejich existující zemědělské činnosti a produkce včetně hospodaření na pozemcích s krátkou dobu pronájmu, mechanizační prostředky daných rozměrů a možností pojezdu. Také sortiment zemědělských plodin obsahuje druhy, které většinou vyžadují vyšší sluneční záření a jsou adaptovány na „stepní“ podmínky lánů velkoplošné intenzivní produkce. V těchto případech existuje obava, do jaké míry mohou instalované panely AgPV změnit produkční podmínky a snížit tak výnosy těchto plodin.

Za tím to účelem jsme provedli v rámci projektu pilotní monitoring a sledování vybraných porostů a produkčních parametrů jako jsou výška a výnos plodin, resp. teplota vzduchu a půdy, vlhkost vzduchu a půdy a distribuce srážek. Výsledky jsme srovnali se zahraničními výsledky a zkušenostmi, které však jsou často jen o několik málo let delší než 2-3 leté zkušenosti z ČR.

Kromě dlouhodobých pokusných porostů energetických plodin byla k monitoringu použita zejména experimentální instalace PV modulů v alejovém agrolesnickém systému na výzkumné stanici Michovky (AFS-1; 0,6 ha, 17-18 let). ALS tvoří 5 řad dřevin ve směru SZ-JV. V lednu 2021 byly v jedné řadě, resp. pod korunou středně vzrostlých stromů (15 lip o výšce 8-10 metrů) instalováno 6 PV modulů (2 x CIGS, 2 x mono c-Si a 2 x bifaciální mono c-Si). Pásky plodin mezi stromořadím jsou široké 15 metrů a obhospodařujeme je ve spolupráci s AGRO Jesenice stejnými plodinami (pšenice, ječmen, řepka, hrách) a s podobnou agronomií jako na sousedním poli.

Během dvou let jsme monitorovali klimatické a hydrické parametry v jejich okolí, abychom posoudili jejich vliv na podmínky produkce zemědělských plodin. Srážky, teplota vzduchu ve výšce 1,5 m, teplota povrchu půdy, teplota půdy a vlhkost -10 cm – byly monitorovány senzory (TOMST) 3 metry od PV modulů a stromů a na blízkém 40 ha poli (kontrola) během vegetačních období 2022-2023.



Obrázek 4.2-1 Umístění čidel pro monitoring teplot, vlhkosti vzduchu a půdy (TOMST) a srážek — na nosných tyčích 3 metry od linie stromů s PV panely na SV a JZ straně v experimentální agrolvoltaice Michovky (léto 2023)

4.2.1 Zhodnocení produkčních podmínek konvenčních plodin ve vertikálních AgPV systémech

V případě vertikálních systémů je možno očekávat zejména vliv stínu z panelů na pěstované plodiny v závislosti podle jejich výšky a umístění. Snížení osvitů plodin blízko panelů vede také ke snížení teploty půdy a vzduchu nebo výparu vody, což vede k nerovnoměrnému dozrání plodin na pozemku. Tyto vlivy je možné minimalizovat vhodnou vzdáleností panelů od okraje pěstované kultury, přibližně ve vzdálenosti 0,5-1,5 násobku výšky panelu a podle směru linie panelů, sklonu pozemku a druhů pěstovaných plodin podle tolerance k zastínění. Umístění panelů v severo-j jižním směru snižuje negativní zastínění způsobené PV panely, a naopak směr východo-západní zdůrazňuje rozdíly v pěstebních podmínkách plodin mezi stranami „před a za“ PV panely. Z hlediska rizika výskytu plevelů v pásu PV panelů a jejich šíření do pěstovaných kultur je potom důležité zajistit jejich údržbu, například vyžínáním, případně pastvou.

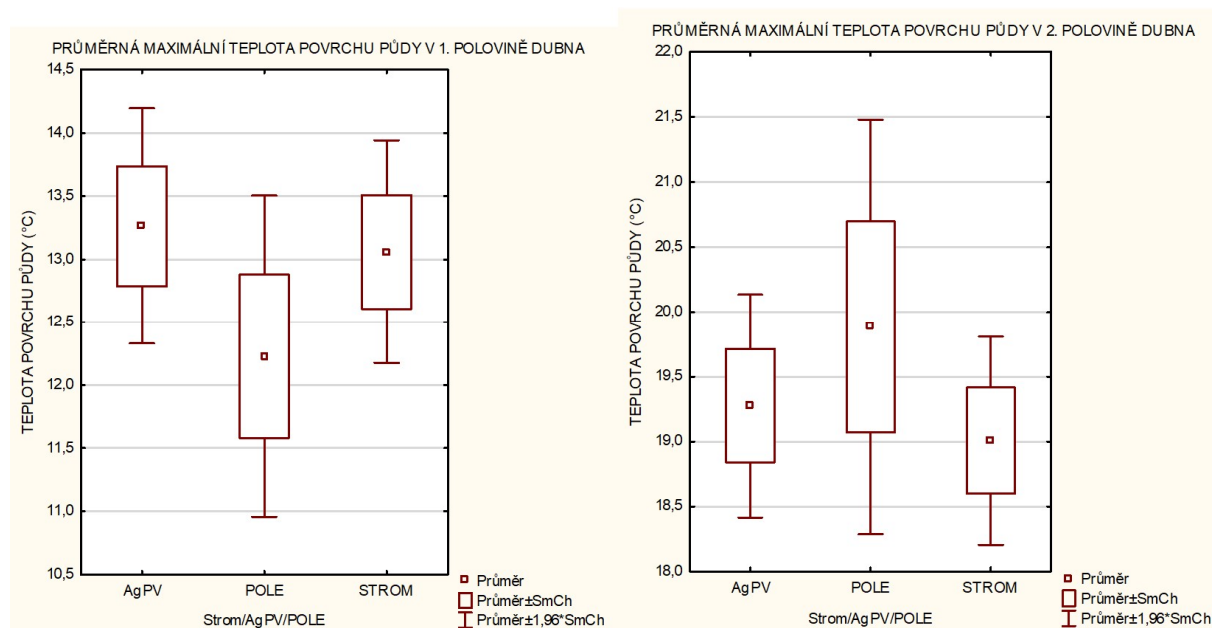
V případě instalace agrolvoltaických systémů na svažitých pozemcích může docházet k lokální změně soustředění a intenzity srážek na menší dopadovou plochu a tím ke změně odtokových parametrů případně ke změně protierozního faktoru pěstovaných plodin. To by mohlo v extrémních případech přívalových dešťů vést ke zhoršení, respektive zvýšení erozního rizika pozemků, zejména pokud by byly obhospodařovány jako orná půda. Proto je nutné v AgPV na svažitých terénech hospodařit vrstevnicovým systémem s použitím protierozních

agrotechnických opatření a plodin s vysokým faktorem C - ochranného vlivu vegetace rovnice USLE¹¹. Na orné půdě je pak podle velikosti sklonu vhodné rozšířit zatravněný pás kolem a zejména pod AgPV s využitím rovnice USLE.

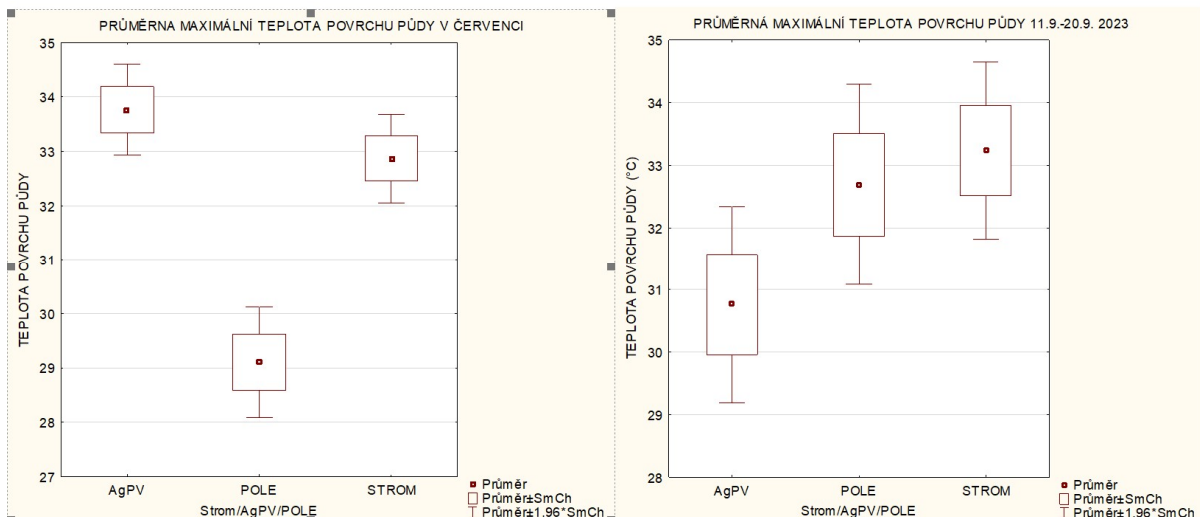
V případě instalace vertikálních fotovoltaických modulů v agrolesnických systémech nedochází k žádnému dalšímu záběru zemědělské půdy, protože k instalaci se využívají „neobhospodařované“ příkonné pásy linií dřevin, které jsou dostatečně široké i pro AgPV a minimalizaci jejich negativních vlivů na plodiny. Toto je možno považovat za výhodu oproti jiným vertikálním systémům agrolvoltaiky. Výsledky hodnocení vlivu PV panelů na produkční podmínky konvenčních plodin (teploty, vlhkosti půdy a vzduchu, srážky) v agrolesnických systémech ukázal, že jejich vliv je nízký a statisticky neprůkazný, respektive je překryt vlivem vzrostlých dřevin.

Celkově výsledky monitoringu v experimentální instalaci (AgPV Michovky) ukazují, že použití vertikálních AgPV systémů v agrolesnických systémech a podobných trvalých kulturách je možné – jak z hlediska produkce zemědělské, tak energetické. Při použití vhodných typů PV modulů, jejich orientací a úpravou korun stromů (arboristika) je možné dosáhnout jak vysokého výnosu elektřiny, tak současně neomezit produkci dřevin a zemědělských plodin. Případné rozdíly ve výnosech bude více ovlivňovat orientace linií dřevin s AgPV ke světovým stranám (statistické rozdíly byly nalezeny mezi severní a jižní orientací plodinových pásů v případě maximální teploty vzduchu v 1,5 m v červenci a maximální teploty povrchu půdy v červenci a po sklizni). Příklad vlivu AgPV na teplotu vzduchu je uveden na obrázku 4.2-2.

Uvedená doporučení pro instalaci AgPV v konvenčních zemědělských kulturách na orné půdě jsou určena pro „průměrné“ klimatické a pěstební podmínky v letech s obvyklým průběhem počasí. V případě výskytu extrémních podmínek například opakujících se dlouhých veder nebo přívalových srážek, které se nevyskytly v období našeho monitoringu na sledovaných lokalitách, mohou být uvedená doporučení nedostatečná nebo nepřesná. Agrolvoltaické systémy jsou novým prvkem zemědělství, a proto je nutno brát uvedená doporučení jako rámcová a doporučujeme využívat i místních zkušeností a znalostí.



¹¹ Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE).



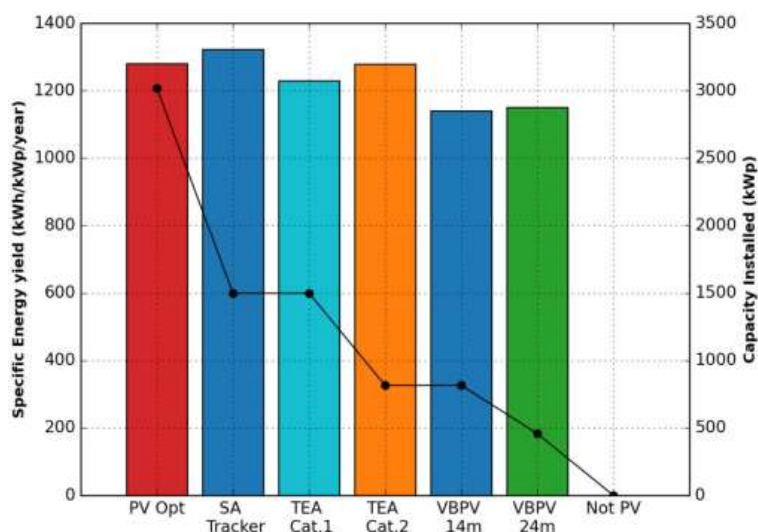
Obrázek 4.2-2 Průměrné maximální denní teploty povrchu půdy ve čtyřech různých periodách roku (2023: 2 x IV, VI, IX) v experimentální AgPV Michovky (u AgPV a stromů a na kontrolním poli).

4.3 Vliv proměnlivého stínění na výnosy a chování AgPV systémů

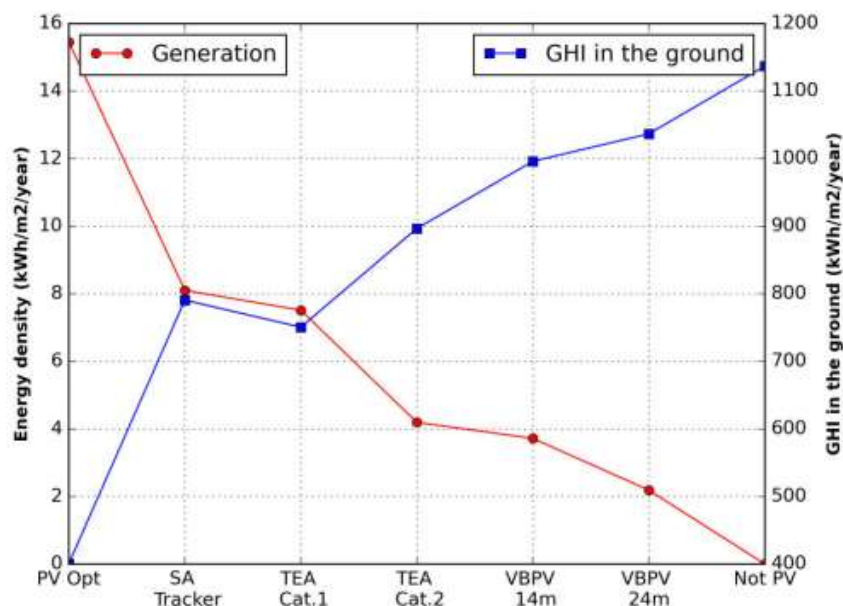
Z dostupných dat různých systémů, resp. z jejich výsledků, lze usuzovat na jednoznačně pozitivní vliv stínění na výnosy zemědělských plodin. Zajímavé výsledky poskytuje např. studie Hochschule Anhalt University of Applied Sciences a Fraunhofer Center for Crystalline Silicon Photovoltaics CSP prezentovaná na konferenci EUPVSEC v roce 2023 [4.3]. Ve studii bylo porovnáváno několik systémů s různou konfigurací:

- PV Opt – systém s optimálním sklonem a orientací
- TEA Cat.1 – systém s vyvýšenou konstrukcí (světla výška 1 m, rozestupy 7 m, plodiny mezi moduly i pod moduly)
- TEA Cat.2 – systém se světlu výškou 0,5 m (rozestupy 12 m, plodiny pouze mezi moduly)
- VBPV 14m – vertikální systém s rozestupy 14 m
- VBPV 24m – vertikální systém s rozestupy 24 m
- SA tracker – tracker se světlu výškou 2,1 m

Z následujících grafů lze vyčíst specifický výkon (kWh/kW_p), roční výrobu vztahenou na m^2 a také roční úhrn záření dopadající na plodiny.



Obr. 4.3-1: roční specifická energetická výtěžnost



Obr. 4.3-2: roční AC svrková výroba z m² a roční úhrn dopadajícího záření na zem s plodinami

Jelikož, jak již bylo zmíněno, účinnost fotosyntézy, a tím pádem i růst rostlin, je závislá právě na množství dopadajícího záření, lze podle uvedených závěrů poměrně dobře odhadnout, jaký vliv bude mít konkrétní topologie na pěstované plodiny.

Z dat z AgFPV Michovky plyne, že nedochází k výrazné degradaci, která by ukazovala na problémy spojené s lokálním stíněním PV modulů. Na druhou stranu je nutné poznamenat, že všechny systémy založené na nových technologiích jsou dosud provozovány pouze krátké období, a tudíž nelze vyloučit, že se degradace ještě projeví.

4.4 Možnosti využití elektřiny v konvenční a agrolesnické zemědělské výrobě

Agrovoltaika, která kombinuje zemědělskou produkci a lokální výrobu elektrické energie, poskytuje zemědělcům i dané lokalitě mnoho příležitostí k efektivnějšímu využití energie a snížení nákladů na energii. Lokální výroba energie může být zemědělci využívána pro mnoho činností a aktivit. Je potřeba zdůraznit, že je zapotřebí dbát na to, aby činnosti, které mají využívat výrobu z AgPV, měly co do možná nejvyšší míry spotřební profil podobný výrobnímu, aby bylo dosaženo vysoké míry lokální samospotřeby a zamezilo se přetokům do sítě.

Mezi nejčastější činnosti, které lze efektivně využívat v kombinaci s výrobou z AGPV patří zejména následující:

1) Čerpání vody a závlaha – AgPV mohou efektivně dodávat výrobou energie pro provoz čerpadel, která jsou klíčová pro zavlažovací systémy. Tato synergie je obzvláště výhodná v oblastech s omezeným přístupem k elektrizační síti, např. v odlehlých plantážích. Využití energie pro vodní závlahu je dále vhodné z důvodu toho, že nejvyšší spotřeby se dosahuje právě v letních měsících, kdy je výroba z FVE zpravidla nejvyšší.

2) Sušení plodin – Energie z AgPV může být využívána pro technologie sušení variantních plodin, ale také obilí či dřevní štěpky. Tento proces zvyšuje kvalitu plodin a předchází ztrátám způsobených vysokou vlhkostí a špatným počasím.

3) Ventilace a chlazení – Velké synergie AgPV může být dosaženo při využívání lokálně vyrobené energie pro ventilaci skleníků a skladovacích prostor. Dále je možné využít energie pro technologie skladování a chlazení variantních plodin, ale také jiných zemědělských produktů jako např. mléka.

4) Běžná spotřeba – Lokálně vyrobená energie může být také využívána v rámci běžné spotřeby jako je provoz techniky, osvětlení zemědělských prostor, klimatizace a větrání.

5) Moderní energetika – Stejně jako běžné fotovoltaické instalace se může AgPV stát součástí moderních lokálních energetických řešení. Lokální výrobu či případné přetoky může zemědělec (provozovatel AgPV) poskytnout např. přílehlým obyvatelům v rámci komunitní energetiky nebo ji může sám využívat ve svých dalších odběrných místech v rámci aktivního zákazníka. Jak již bylo zmíněno, zde je pouze potřeba počítat s náklady na distribuci elektrické energie, kterou platí spotřebitel vždy, a to bez ohledu na vzdálenost od výroby.

4.4.1 Modelový experiment s využitím elektřiny AgPV k vysoušení energetické štěpky

Jednou ze zajímavých možností, jak využít elektřiny z AgPV (resp. AgFPV) systému je sušení dřevní štěpky, resp. dalších zemědělských produktů.

Sušení zemědělských produktů bylo uváděno jako jeden z nejčastějších důvodů pro instalaci, resp. využití AgPV uváděných ve výsledcích našeho dotazníkového šetření provedené v rámci projektu mezi zemědělci. S ohledem na zaměření projektu bylo pro experimentální ověřování vybráno sušení štěpky z rychle rostoucích dřevin, která má v okamžiku sklizně (XII — III) vysokou vlhkost (> 50 %) a pro okamžité energetické využití tak není příliš vhodná, protože její výhřevnost je nízká (pod 10 GJ/t). Cílem experimentu bylo kvantifikovat předpoklad, že vysoušením štěpky v průběhu letní sezóny, kdy jsou obvykle vysoké přebytky nevyužité elektřiny z fotovoltaiky, respektive i agrovoltaiky, dojde ke zvýšení její kvality, a to jednak zvýšením výhřevnosti a také snížením hygienických rizik při manipulaci z důvodu výskytu houbových kolonií.

Pro experiment byla zvolena metoda sušení pod střechou na roštovém loži s nuceným prouděním vzduchu. Rozměry a objem sušící kóje byly $2,1 \times 4,2 \times 0,6 \text{ m} = 5,3 \text{ m}^3$ štěpky. Pro nucený pohyb vzduchu v pokusné kóji byl využit větrák REMCO RAV 30 (650 W / 230V, 75 dB) s výkonem 3300 m³ / hod. (teor. proudění na roštu 165 m³ / hod / m²). Režim regulace sušení / proudění vzduchu byl zvolen tak, aby se modeloval ostrovní režim — tzn., přívod elektřiny do větráku se spínal tehdy, když panely AgPV vyráběly více než 700 W (tj. více, než činila spotřeba pro jiné účely v místě). V pravidelných intervalech bylo prováděno měření vlhkosti štěpky (sonda GMH 38-LW2-T) ve 4 hloubkách (0—10—20—40 cm) a na třech různých místech kóje (okraj—střed—okraj po úhlopříčce). Pro kontrolu provedeno gravimetrické měření obsahu vody ze směsných vzorců štěpky. Teplota a vlhkost vzduchu byla kontinuálně (á 15') měřena v hloubce 10 cm čidly TOMST na dvou místech.

Experimenty se sušením štěpky proběhly v jarním, letním a zimním turnusu, přičemž první dva na sebe navazovali (V-VI a VIII-IX) a trvaly 75 resp. 60 dní. Zimní turnus trval 131 dní (I-V). Ukončení sušícího cyklu bylo provedeno po dosažení průměrné vlhkosti štěpky 10 %. Štěpka v kontrolním boxu zůstala po dobu prvních dvou experimentů (150 dní) stejná a při ukončení byla její vlhkost 22 %.

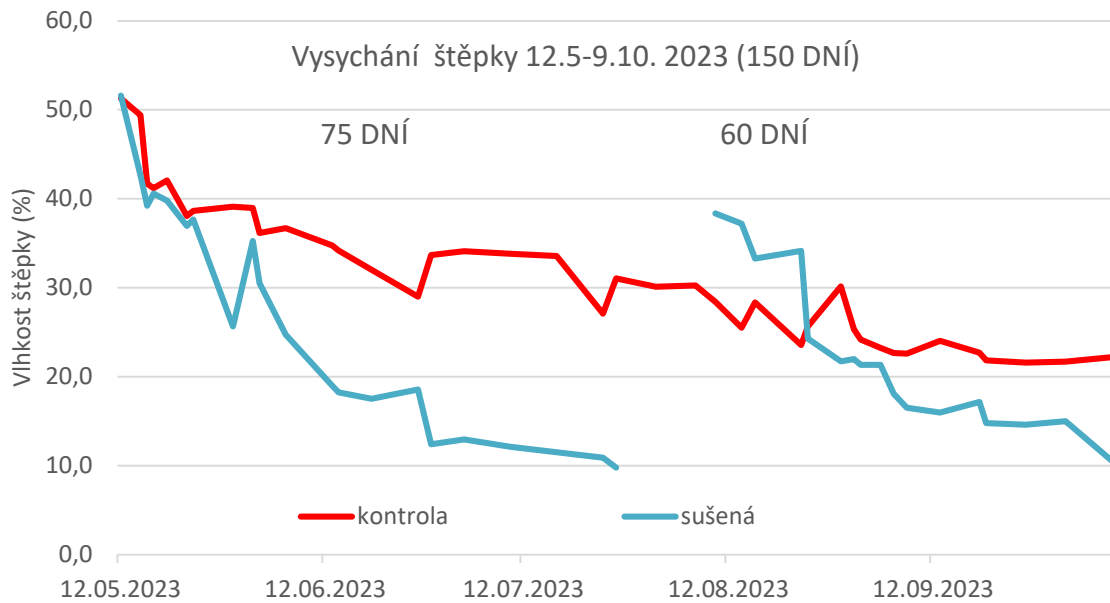


Obrázek 4.4-1 Experiment se sušením štěpky (zleva): kóje se štěpkou na dřevěném roštu – levý s nuceným proděním vzduchu, pravý bez (kontrola); elektroměr Solight a v pozadí větrák RAV 30; souprava pro měření vlhkosti štěpky GMH 38.

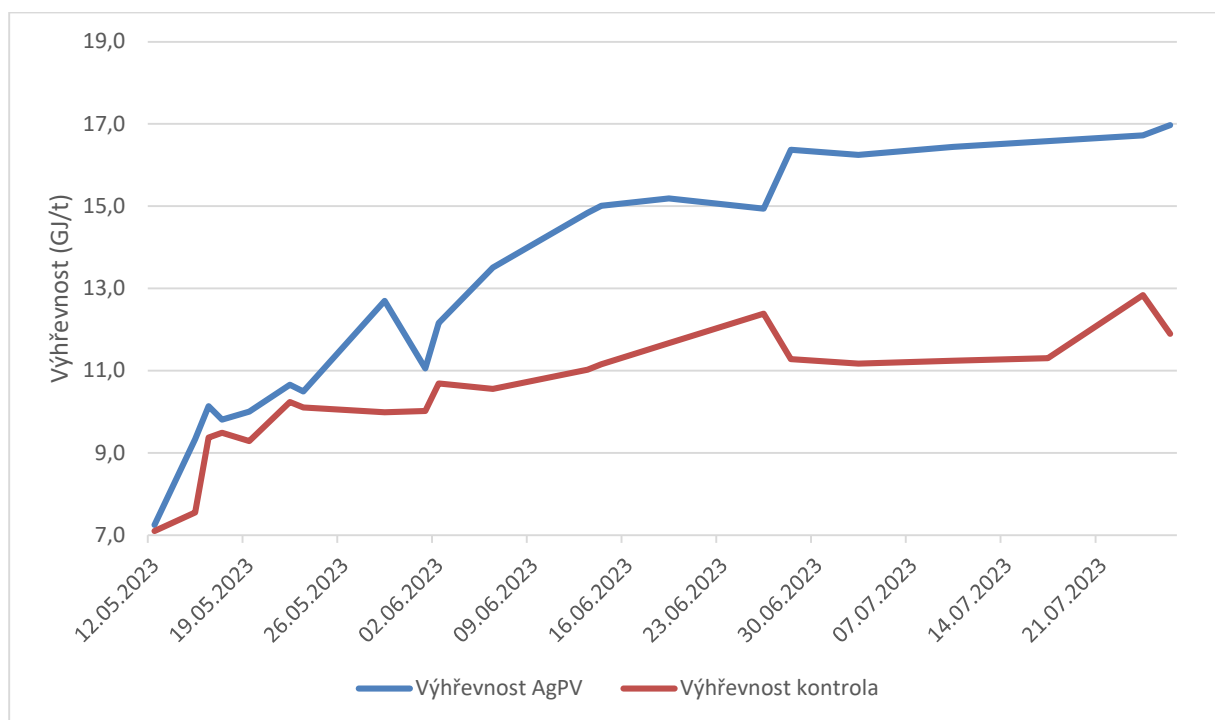
Jarní a letní turnusy se ukázaly z hlediska vysoušení štěpky jako výrazně příznivější a jejich hlavní výsledky uvádíme dále. V zimním termínu docházelo v sušené variantě zpočátku (leden 2024) dokonce k zvyšování vlhkosti a efektivní vysoušení štěpky započalo až v období druhé poloviny března, kdy průměrná denní teplota vzduchu stoupla na 10°C a relativní vlhkost klesla pod 70%. Proto, za obvyklých zimních podmínek, není možné tento způsob využití elektřiny z AgPV doporučit. Z hlediska logistiky energetické štěpky na farmě by to však nemělo být problémem, protože jednofázové sklizně výmladkových plantáží RRD probíhají v termínu pozdní zimy až začátku jara. Také zimní spotřeba elektřiny je obvykle vyšší, a zejména výroba elektřiny v AgPV podstatně nižší, a je proto možné očekávat malé přebytky vyrobené elektřiny z AgPV.

Na základě vyhodnocení sledovaných parametrů v experimentu je možné pro vysoušení štěpky doporučit „jarní a letní“ turnus, které vykazovaly následující charakteristiky (obr. 4.4-2 a 4.4-3):

- Štěpka sušená nuceným větráním byla po 75 dnech experimentu o 21,3 % sušší než kontrolní štěpka a její výhřevnost byla o 5 GJ/t vyšší (12,01→16,98 GJ/t); k vysoušení bylo spotřebováno 355 kWh (1,2 GJ) elektrické energie z AgPV.
- Grafy průběhu vysoušení ukazují na možnost optimalizace délky, procesů a zařízení sušení v praktických podmínkách (např. ukončení již po 46 dnech, kdy vlhkost dosáhla 12,4 %).
- Ekonomické aspekty sušení (1 cyklus, V-VII/23): úspora za elektřinu ze sítě 2106 Kč (355 kWh × 5,93 Kč / kWh); potenciální příjem za prodej přetoků 1018 Kč (355 kWh × 3 Kč / kWh) a příjem za sušší štěpku s vyšší výhřevností je 744 Kč / tunu (při aktuální prodejní ceně 150 Kč / GJ / t).
- Měření teplot štěpky ukázalo výrazné snížení efektu samozahřívání u sušené štěpky proti kontrole (cca o 22—24 °C) v prvních dnech po založení experimentu, což má pozitivní efekt na zpomalení degradačních procesů ve štěpce (rozklad jemných částí, výskyt mikroorganismů, hub).
- Při hodnocení výskytu houbových kolonií byl zjištěn 4 × nižší výskyt v sušené štěpce proti kontrole (bez sušení) a 2 × nižší proti venkovnímu skladování. Houbové kolonie se také vyskytovaly v mnohem menší míře na dřevěném zařízení sušících boxů, což výrazně prodlužuje jejich životnost.



Obrázek 4.4-2 Změny vlhkosti štěpky v průběhu dvou letních turnusů experimentu s využitím elektřiny z AgPV pro nucený oběh (větrání) vzduchu v roštovém loži a v kontrole na roštovém loži bez oběhu vzduchu.



Obrázek 4.4-3 Změny výhřevnosti štěpky v sušené a kontrolní variantě v prvním letním turnusu experimentu.

Celkově je možné shrnout, že experiment potvrdil dobré možnosti využití elektřiny z AgPV k sušení zemědělských produktů v letním období a také při optimalizaci využití intermitentních zdrojů OZE ve faremních podmínkách a hospodaření – například při zvyšování kvality biomasy (štěpky), snižování spotřeby a závislosti na fosilních palivech. Výsledky experimentálního systému také naznačují možnosti zlepšení ekonomického využívání OZE například snížením vlastní spotřeby štěpky pro vytápění a/nebo jejím prodejem za vyšší cenu díky vyšší výhřevnosti. Také manipulace se sušenou štěpkou je jednodušší z hlediska hmotnostního a zdravotního (minimum alergenů z hub).

Literatura – kapitola 4

- [4.1] <https://agrisolareurope.org/map/>
- [4.2] <https://sunagri.fr/en/key-findings-tree-growing/>
- [4.3] SÁNCHEZ, Hugo; DITTMANN, Sebastian; MEZA, Carlos a GOTTSCHALG, Ralph. Comparison of different AgriPV layouts in terms of photovoltaic energy yield output. In: DE GREGORIO, J., ALMEIDA SERRA, J.; KENNY, R. a BERGMILLER, J. (ed.). *Proceedings of the International Conference 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. München: WIP, 2023, s. 2719-2738. ISBN 3-936338-88-4. ISSN 2196-0992.
- [4.4] Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). Combining photovoltaic modules and food crops: first agrovoltaic prototype in Belgium. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 18(18), 266–271. <https://doi.org/10.24084/repqj18.291>

5 Ekonomické posouzení provozu AgPV

Agrovoltaické systémy a jejich ekonomika se na rozdíl od klasické fotovoltaiky liší tím, že ve výsledném ekonomickém modelu je třeba počítat i s ekonomikou zemědělské činnosti pod „fotovoltaickou“ technologií.

Srovnání zemědělské činnosti bez agrovoltaického systému a s agrovoltaickým systémem popisuje následující model. V modelu jsou aplikována data českých farmářů. Agrovoltaické systémy jsou kombinací zemědělské produkce a energetické produkce ve formě elektrické energie. Z tohoto důvodu je nutné i výslednou ekonomiku projektu posuzovat jako kombinaci těchto dvou částí. Existuje mnoho aplikací agrovoltaických systémů, pro zjednodušení je ale rozdělujeme do dvou kategorií, vertikální a horizontální. Horizontální systémy jsou stavěny primárně pro vyšší kultury, tedy sady, vinice, kdežto vertikální naopak pro trvalé travní porosty, zeleninu a další běžné plodiny, pěstované v řadách mezi panely. Konstrukce, instalovaný výkon na plochu a výběr plodin, ale i vzdálenost místa připojení a spotřeby primárně ovlivňuje ekonomiku agrovoltaického projektu.

5.1 Zásadní aspekty ovlivňující ekonomiku agrovoltaiky

Agrovoltaické systémy a jejich ekonomika je ovlivňována mnoha aspekty. Ty se dají rozdělit primárně na technické neboli energetické, dále na zemědělské a ostatní.

5.1.1 Technicko-energetické aspekty ekonomiky agrovoltaiky

Zásadním aspektem každého agrovoltaického projektu je způsob využití elektřiny. Důležitou roli hraje to, zda je projekt připojen přímo do odběrného místa a dimenzován tak, aby byla veškerá vyrobená elektřina vždy spotřebována v místě, tzn. bez využití distribuční sítě, tedy bez nutnosti platit distribuční poplatky spotřebitelem vyrobené elektřiny. V takovém případě hovoříme o tzv. „on-site“ projektu a výsledná cena, kterou je schopný investor získat je typicky vyšší než u druhé skupiny projektů, které označujeme jako tzv. „off-site“. Tyto projekty jsou připojené do distribuční nebo přenosové soustavy, investor je tedy nucen zaplatit část nákladů na připojení a koncový odběratel je nucen platit ze spotřebované elektřiny také distribuční poplatky. V takovém případě je obtížnější prodat elektřinu za vyšší cenu, tak jako je to možné u projektů „on-site“.

Dalším důležitým aspektem je vzdálenost přípojného místa, resp. délka samotné přípojky, kde od určité vzdálenosti přestává být projekt ekonomicky rentabilní, jelikož náklady na vybudování přípojky jsou moc vysoké.

5.1.2 Zemědělské aspekty ekonomiky agrovoltaiky

Z pohledu zemědělského je velmi důležitým aspektem volba pěstované plodiny, náklady na její pěstování, její prodejní cena, citlivost na zastínění atd. Zemědělské aspekty je velmi obtížné, jakkoliv generalizovat, jelikož každý zemědělec je zvyklý pěstovat určité komodity, na které má technické nástroje, zkušenosti, ale také vybudovaný například odběratelský řetězec.

5.1.3 Ostatní aspekty ovlivňující ekonomiku agrovoltaiky

Konkurenceschopnost agrovoltaických projektů je dána dvěma hlavními aspekty. Prvním je jednoduchost a široké zaměření legislativy, tedy jednoduchý a rychlý povolovací proces. Druhým aspektem je potom dotační politika jak na straně energetické, tak i zemědělské. Tyto dva aspekty se vzájemně prolínají a doplňují a pro reálný rozvoj agrovoltaických systémů je třeba jejich

kombinace, ale především zajištění takových výsledných podmínek, aby byl agrovoltaický projekt konkurenceschopný s ostatními obnovitelnými zdroji elektrické energie.

Zemědělské dotace budou v rámci agrovoltaického systému zachovány tak jako doposud, když zemědělec hospodaří bez agrovoltaického systému. Dotace v energetice jsou dnes namířené obecně na sektor obnovitelné energetiky, včetně toho solárních instalací, kde jsou podporované malé střešní instalace, velké firemní instalace, ale i velké solární parky. V tomto kontextu je třeba zahrnout agrovoltaické systémy do tohoto systému dotací a nastavit jejich výši tak, aby odpovídala zvýšeným investičním nákladům. V roce 2006 (zákon 180/2005 Sb.) byla pro fotovoltaické elektrárny otevřena forma podpory skrze garantované výkupní ceny, dnes jsou fotovoltaiky podporované formou investiční podpory. V zahraničí je typická podpora formou aukcí, tedy období garantované výkupní ceny. Toto řešení by mohlo být efektivní právě pro agrovoltaické systémy a pomoci farmářům.

5.2 Metodika ekonomického posouzení AgPV

Z ekonomického pohledu je přirozené rozdělit agrovoltaické systémy na horizontální, tedy vyvýšené konstrukce a vertikální, tedy řady fotovoltaických modulů, mezi kterými probíhá zemědělská činnost.

5.2.1 Ekonomika horizontálního agrovoltaického systému

Horizontální agrovoltaický systém je typicky budován nad sady, drobným ovocem nebo vinicemi. V rámci této kategorie se mohou jednotlivá řešení, velmi lišit, tak jak je vidět na obrázku 5.2.1-2. Obr. 5.2.1 je horizontální systém nad malinami pěstovanými v květináčích, kde světlá výška dosahuje 2,1 m. Náklady na konstrukci tohoto systému jsou obdobné jako u fotovoltaických pozemních instalací, aby bylo zajištěno dostatečné oslunění plodin, jsou zde využity tzv. bifaciální



Obrázek 5.2-1 Horizontální systém nad malinami pěstovanými v květináčích

polopropustné (semitransparentní) fotovoltaické moduly, kde významně klesá hodnota instalovaného výkonu vzhledem k využití ploše a tím také rostou investiční náklady vzhledem k instalovanému 1 kW_p . Oproti tomu konstrukce nad vinicí na obr. 5.2.2 je vyšší konstrukce se světlou výškou cca 4 m a je na ní využita technologie tzv. trackerů, tedy běžné monofaciální fotovoltaické moduly jsou natáčené za sluncem. V tomto případě jsou náklady na panely obdobné jako u pozemní fotovoltaiky, instalovaný výkon na jednotku plochy může dosahovat až $1 \text{ MW}_p/\text{ha}$, ale významně rostou náklady na konstrukci.



Obrázek 5.2-2 Horizontální systém nad vinicí

5.3 Ekonomika vertikálního agrovoltaického systému

Příklad ekonomického posouzení je předveden ve spojení s vertikální agrovoltaickou výrobou. Základem tohoto výpočtu je společná analýza a výpočet energetické ale i zemědělské části a jejich společné ekonomické vyhodnocení. Fotovoltaická část zabere část plochy a tím zmenší plochu pro pěstování zemědělských plodin, výsledkem je ale vždy plocha s vyšší efektivitou využití. Spojením těchto dvou částí dostáváme v tabulkách níže jasnou představu o rozdílech v ekonomických přínosech ploch s a bez agrovoltaiky a také efektivitu, respektive nárůst efektivity těchto ploch.

Obdobným způsobem může být ekonomicky zhodnocen například agrovoltaický projekt nad jablonořným sadem nebo jinou zemědělskou kulturou.

Předpoklady výpočtu:

- Instalovaný výkon $393 \text{ kW}_p/\text{ha}$, rozestup řad 10 m, výroba elektřiny 1049 kWh/kW_p
- Investiční náklady $19\,297 \text{ Kč/kW}_p$ – včetně developmentu, mezd, připojení do sítě
- Konzervativní odhad výkupní ceny silové elektřiny $1\,300 \text{ Kč/MWh}$, nákupní ceny elektřiny s poplatky $5\,000 \text{ Kč/MWh}$

Tab. 5.3-1 Náklady a výnosy ze zemědělské činnosti na 1 ha půdy za 1 rok

Plodina	Vojtěška	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Pšenice ozimá špalda	Sója
Osivo [Kč/ha]	2 500	2 500	2 500	2 500	7 000
Herbicidy/Pesticidy [Kč/ha]	0	4 000	3 000	3 000	3 000
Hnojivo [Kč/ha]	0	5 000	4 000	4 000	2 000
Nafta [Kč/ha]	2 000	2 500	2 500	2 500	2 000
Režie(Mzdy, všechny ostatní náklady) [Kč/ha]	11 000	12 000	12 000	12 000	11 000
Náklady na zem. činnost celkem [Kč/ha]	15 500	26 000	24 000	24 000	25 000
Sklizeň [kg/ha]	12 500	7 500	7 000	6 500	3 300
Tržní cena [Kč/kg]	2,5	4,8	4	5,5	10
Výnosy zemědělské činnosti bez dotace [Kč/ha]	31 250	36 000	28 000	35 750	33 000
Dotace [Kč/ha]	7 200	5 000	5 000	5 000	7 200
Výnosy zemědělské činnosti s dotací [Kč/ha]	38 450	41 000	33 000	40 750	40 200
Zisk před započtením daní, úroků, odpisů zemědělské činnosti [Kč/ha]	22 950	15 000	9 000	16 750	15 200

Tab. 5.3.-2 Náklady a výnosy ze zemědělské činnosti s vertikálním agrovoltaickým systémem na 1 ha půdy za 1 rok

Plodina	Vojtěška	Pšenice ozimá	Ječmen ozimý	Pšenice ozimá špalda	Sója
Výnos bez agrovoltaiky Rakousko [kg/ha]	10 583	3 695	3 300	2 393	1 435
Výnos s agrovoltaikou Rakousko [kg/ha]	7 982	2 972	2 780	1 759	897
Změna zemědělského výnosu s agrovoltaikou	0,75	0,80	0,84	0,73	0,62
Pokles zemědělského výnosu Rakousko včetně poklesu plochy [%]	25	20	16	27	38
Využitelná plocha	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Osivo [Kč/ha]	2 125	2 125	2 125	2 125	5 950
Herbicidy/Pesticidy [Kč/ha]	0	3 400	2 550	2 550	2 550
Hnojivo [Kč/ha]	0	4 250	3 400	3 400	1 700
Nafta [Kč/ha]	2 000	2 500	2 500	2 500	2 000
Režie (Mzdy, všechny ostatní náklady) [Kč/ha]	12 000	13 000	13 000	13 000	12 000
Náklady na zem. činnost celkem [Kč/ha]	16125	25275	23575	23575	24200
Sklizeň [kg/ha]	9 427	6 032	5 896	4 777	2 062
Tržní cena [Kč/kg]	3	5	4	6	10
Výnosy zemědělské činnosti bez dotace [Kč/ha]	23 568	28 952	23 584	26 273	20 622
Dotace [Kč/ha]	7 200	5 000	5 000	5 000	7 200
Výnosy zemědělské činnosti s dotací – Agrovoltaika [Kč/ha]	30768	33952	28584	31273	27822

Zisk před započtením daní, úroků, odpisů zemědělské činnosti [Kč/ha]	14643	8677	5009	7698	3622
1/30 investičních nákladů [Kč/ha]	252 800	252 800	252 800	252 800	252 800
Provozní náklady [Kč/ha]	98 250	98 250	98 250	98 250	98 250
Koeficient rizika	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Investiční dotace - 15 % Investice [Kč/ha]	37 920	37 920	37 920	37 920	37 920
Náklady na technologii celkem [Kč/ha]	348 235	348 235	348 235	348 235	348 235
Cena prodané elektřiny [Kč/MWh]	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300
Cena elektřiny od obchodníka(nákup) [Kč/MWh]	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Vyrobená elektřina [MWh]	391	391	391	391	391
Vyrobená elektřina – spotřebovaná	40	40	40	40	40
Vyrobená elektřina – prodaná	351	351	351	351	351
Výnos z vlastní Spotřeby(prodeje) elektřiny [Kč/ha]	656 300	656 300	656 300	656 300	656 300
Zisk elektřina [Kč/ha]	308 065	308 065	308 065	308 065	308 065
Zisk před započtením daní, úroků, odpisů agrovoltaika [Kč/ha]	322 708	316 742	313 074	315 763	311 687
Nárůst efektivity plochy [1 ha]	13x	20x	34x	18x	20x

Zdroje: Next2Sun, Boku University Wien, Mendelova univerzita, Solární asociace



Obrázek 5.3-1 Vertikální agrovoltaický systém ve spojení s obilninami (Next2sun, Německo)

5.4 Cost-benefit analýza

Agrovoltaické systémy jsou definovány dvojitým využíváním půdy, a proto přidávají další důležité dopady ve srovnání s konvenčními fotovoltaickými zdroji, jako jsou přímé výhody pro pěstování plodin, stínění plodin před silným slunečním zářením, fyzická ochrana plodin před teritoriálními dešti a krupobití, pomoc při zadržování vody v půdě snížit působení vodní eroze. Další nepřímý dopad může být v sociální a environmentální rovině. Koncepce agrovoltaických systémů zároveň reaguje na aktuální problémy spojené jak se zemědělstvím, tak i energetikou (rozvoj využívání OZE při zachování půdy pro konvenční zemědělství, adaptace zemědělství na klimatickou změnu, diverzifikace činností subjektů hospodařících na půdě, decentralizace energetických systémů a zvýšení odolnosti hospodařících subjektů na růst cen energií). Technologie AgPV systémů je relativně jednoduchá, ale nastavení optimálního agrovoltaického systému je složitá disciplína. Pro správné hodnocení agrovoltaických systémů, případně celého projektu, je důležité znát a zhodnotit všechny tyto aspekty.

Mnoho výzkumných prací v agrovoltaických systémech se zaměřuje na rozdíly v produkci plodin s agrovoltaickými systémy nebo bez nich nebo na výpočty s vyrobenou elektřinou. Dobře navržené a umístěné agrovoltaické systémy přinášejí mnohem více než jen plodiny a elektřinu. Efekty, které AgPV systémy přinášejí nejsou jen pro investory do AgPV, ale obecně jsou významné systémové přínosy (environmentální v podobě výroby elektřiny z OZE, efekty z hlediska zvýšení konkurenceschopnosti subjektů hospodařících na půdě, zvýšení efektivity využívání půdy a snižování záboru kvalitní půdy pro jiné než zemědělské aktivity). Agrovoltaika je multisektorová technologie, kterou je třeba hodnotit z několika hledisek, aby měla objektivní výsledky.

Projekty jsou často hodnoceny pouze na základě ekonomického modelu pořizovací ceny technologie a vytvořeného zisku z prodeje vyrobené elektřiny. Agrovoltaické systémy však přinášejí několik dalších dopadů (tzv. multiimpacts), které mohou ovlivnit celkové ekonomické hodnocení daného projektu.

Metody hodnocení takto mnohočetných dopadů jsou rozděleny do dvou kategorií, jedna představuje kvantitativní dopady, které lze ekonomicky vyhodnotit. Druhou kategorií jsou dopady, které jsou obvykle hodnoceny kvalitativně. Takto pojaté hodnocení AgPV systémů a jejich přínosů přináší unikátní přístup z více hledisek dopadu. Soukromý sektor obvykle hledá pouze ekonomické hodnocení, ale veřejný sektor potřebuje hodnotit i další aspekty, které lze hodnotit sociálním blahobytem.

Dalšími faktory, které je nutné při cost-benefit analýze zohlednit mohou být:

- Rentabilita projektu
- Zlepšení efektivity/účinnosti
- Stabilita sítě
- Technologická inovace
- Energetická bezpečnost, soběstačnost
- Produkce „zelené“ elektřiny
- Snížení vypouštění skleníkových plynů
- Zapojení místní komunity
- Ochrana životního prostředí
- Symbióza technologie a plodin
- Snížení působení vodní eroze
- Zvýšení biodiversity

6 Závěr – shrnutí

Agrovoltaické systémy představují perspektivní technologii nejen pro další rozvoj výroby elektřiny z OZE, ale i pro zvýšení konkurenceschopnosti subjektů hospodařících na půdě a současně i pro zvýšení jejich odolnosti vůči zvyšování cen energií. Agrovoltaické systémy, kromě ekonomických benefitů, přinášejí další významné efekty, jako je zvýšení efektivity využívání půdy.

V ČR v roce 2024 byl dokončen základní legislativní proces umožňující realizovat AgPV systémy, byť zatím pouze ve spojení s permanentními kulturami. Primární snahou, i z hlediska ekonomické efektivity projektů, by mělo být maximalizovat využití elektřiny v místě bez nutnosti platit poplatky za distribuci elektřiny. To vyžaduje optimalizaci návrhu AgPV systému z hlediska instalovaného výkonu vůči spotřebě elektřiny v místě.

Z výsledků šetření mezi na půdě hospodařícími subjekty byl doložen zájem o tento typ aktivit.

Agrovoltaické systémy samy o sobě z hlediska použité technologie představují zvládnutou technologii, které je komerčně dostupná. Klíčovým aspektem je tak návrh správné konfigurace AgPV systému a výběr vhodného dodavatele.

Výsledky monitoringu v experimentální instalaci (AgPV Michovky) ukazují, že použití vertikálních AgPV systémů v agrolesnických systémech a podobných trvalých kulturách je možné – jak z hlediska produkce zemědělské, tak energetické. Při použití vhodných typů panelů, jejich orientací a úpravou korun stromů (arboristika) je možné dosáhnout, jak vysokého výnosu elektřiny, tak současně neomezit produkci dřevin a zemědělských plodin.

Agrovoltaické systémy jsou novým prvkem zemědělství, a proto je nutno brát uvedená doporučení, vzniklá na základě relativně krátkodobého monitoringu, jako rámcová a doporučujeme proto využívat místních zkušeností a znalostí.

Metodika poskytuje potenciálním zájemcům o realizaci AgPV projektů souhrnný přehled problematiky jak z hlediska legislativního ukotvení, tak i z hlediska technických řešení, ekonomické efektivity a neekonomických přínosů.

Souhrn informací a výsledků experimentálního výzkumu současně poskytují podklady i pro státní správu pro posuzování perspektivity AgPV systémů, jejich přínosů, technických řešení a ekonomické efektivity.