

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2025

Šimon Franěk



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SPOJENÍ SOLÁRNÍHO SYSTÉMU A PĚSTOVÁNÍ PLODIN

COMBINING SOLAR SYSTEM AND CROP PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Franěk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2025



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Šimon Franěk

ID: 240734

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Spojení solárního systému a pěstování plodin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definice agrofotovoltaiky
2. Synergie zemědělství a energetiky
3. Využití solární energie k obdělávání půdy a zavlažování
4. Experimentální agrofotovoltaický systém.

Projekt je zaměřen na inovativní kombinaci zemědělství a fotovoltaických elektráren. Student provede rešerši realizací ve světě, popř. ČR, vyhodnotí výhody a nevýhody umístění FV elektráren na zemědělské půdě.

Potenciál solární energie při obdělávání půdy, zavlažování, využívání přebytků mimo zemědělství.

Cílem práce je ukázat možnou efektivní spolupráci fotovoltaických systému a zemědělství. Již zaužívaný pojem agrofotovoltaika, či agrovoltaika se dostává do popředí i politického zájmu. Práce by měla demonstrovat na jednoduchém příkladu využití FVE zejména v malém, domácím měřítku, např. na zelené střechy a nebo malé zahradní instalace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá agrofotovoltaikou, tedy propojením výroby solární energie se zemědělskou činností. V teoretické části je analyzován potenciál agrofotovoltaických systémů, jejich přínosy i související výzvy. Součástí je také přehled vybraných realizací ve světě i v České republice. Pozornost je věnována možnostem instalace těchto systémů na zemědělské půdě a jejich dopadu na efektivitu využití půdy, produkci plodin a energetickou soběstačnost. Praktická část se zaměřuje na návrh malého autonomního agrofotovoltaického systému, s cílem optimalizace hospodaření s vodou a energií systému. Závěr práce je věnován vyhodnocení naměřených dat získaných za pozorované období.

Klíčová slova

Agrofotovoltaika, využití zemědělské půdy, energetická soběstačnost, ekologie energetiky a hospodářství, synergie fotovoltaiky a zemědělství

Abstract

This bachelor's thesis focuses on agrivoltaics, the integration of solar energy production with agricultural activities. The theoretical part analyzes the potential of agrivoltaic systems, their benefits, and the related challenges. It also includes an overview of selected implementations around the world and in the Czech Republic. Particular attention is given to the possibilities of installing such systems on agricultural land and their impact on land-use efficiency, crop production, and energy self-sufficiency. The practical part is dedicated to the design of a small autonomous agrivoltaic system, aiming to optimize water and energy management. The conclusion of the thesis evaluates the measured data collected during the observation period.

Keywords

Agrivoltaics, agricultural land use, energy self-sufficiency, energy and economic ecology, synergy of photovoltaics and agriculture

Bibliografická citace

FRANĚK, Šimon. Spojení solárního systému a pěstování plodin. Online, bakalářská práce. Petr BAXANT (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/169126>. [cit. 2025-05-26].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Šimon Franěk*

VUT ID studenta: *240734*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2024/25*

Téma závěrečné práce: *Spojení solárního systému a pěstování plodin*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Baxantovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu, trpělivost a motivaci během celého studia.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. AGROFOTOVOLTAIKA.....	12
1.1 MOŽNOSTI INSTALACE.....	12
1.1.1 <i>Vertikální instalace</i>	12
1.1.2 <i>Horizontální instalace</i>	13
1.1.3 <i>Hydroponické věže</i>	14
1.1.4 <i>Instalace FV modulů na skleníky</i>	15
1.2 VYUŽITÍ NATÁČENÍ PANELŮ PRO AFV.....	16
1.2.1 <i>Pasivní natáčení panelů</i>	17
1.2.2 <i>Aktivní natáčení panelů</i>	17
2. VÝHODY A NEVÝHODY AGROFOTOVOLTAIKY	18
2.1 VÝHODY AGROFOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU	18
2.2 NEVÝHODY AGROFOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU	19
3. VHODNÉ PLODINY PRO AGRFOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY	20
4. INSTALACE AGR VE SVĚTĚ	22
4.1 ZEMĚ JIŽ VYUŽÍVAJÍCÍ AGROFOTOVOLTAIKU.....	22
4.1.1 <i>Německo</i>	22
4.1.2 <i>Japonsko</i>	23
4.1.3 <i>Čína</i>	24
4.1.4 <i>USA</i>	25
4.2 MOŽNOSTI INSTALACE V ČR	25
4.2.1 <i>Vhodné podmínky pro agrofotovoltaiku</i>	26
4.3 VYUŽITÍ PŘEBYTEČNÉ ENERGIE Z AGF	27
5. AGROFOTOVOLTAIKA A ROBOTIKA	28
6. REALIZACE PROJEKTU	30
6.1 NÁVRH SYSTÉMU.....	30
6.1.1 <i>Akumulátor a napájení FV modulem</i>	31
6.1.2 <i>Řídící jednotka</i>	32
6.1.3 <i>Senzorové jednotky</i>	32
6.1.4 <i>Zavlažování</i>	33
6.2 SOFTWAREVÁ ČÁST NÁVRHU	34
6.2.1 <i>Sběr dat a jejich zpracování</i>	34
6.2.2 <i>Měření hladiny vody v nádrži</i>	34
6.2.3 <i>Spínání zátěže při plném nabití baterie</i>	35
6.3 INSTALACE A PROVOZ SYSTÉMU	35
6.3.1 <i>Umístění fotovoltaického panelu</i>	35
6.3.2 <i>Umístění řídicí jednotky a senzorů</i>	36
6.3.3 <i>Umístění nádrže a čerpadla</i>	36

6.3.4	<i>Provozní režim systému</i>	36
6.4	NAMĚŘENÁ DATA A JEJICH VYHODNOCENÍ.....	37
6.4.1	<i>Porovnání reálně naměřených dat a simulace z nástroje PVGIS</i>	37
6.4.2	<i>Srovnání výroby a spotřeby systému</i>	40
6.5	VYHODNOCENÍ METEOROLOGICKÝCH DAT.....	41
7.	PĚSTOVANÉ PLODINY	45
8.	ZÁVĚR	47
	LITERATURA	49
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
	SEZNAM PŘÍLOH	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Srovnání bifaciálního systému s monofaciálním [6].....	13
Obrázek 1-2 Možnosti instalace vertikální systém [8].....	13
Obrázek 1-3 Horizontální instalace agrofotovoltaiky [12]	14
Obrázek 1-4 Hydroponické věže [13].....	15
Obrázek 1-5 Luminiscenční solární koncentrátor [16]	16
Obrázek 2-1 Mikroklima vzniklé pod AFV [22]	18
Obrázek 4-1 Agrofotovoltaika využita v kombinaci s pěstováním čaje [29].....	24
Obrázek 4-2 Pěstování kustovnice čínské.....	25
Obrázek 4-3 Druhy zemědělské půdy v ČR [40].....	26
Obrázek 5-1 Agrorobot vinice poblíž Břeclavy [44]	28
Obrázek 6-1 Schéma zapojení	31
Obrázek 6-2 Mikrokontrolér Wemos D1 R32	32
Obrázek 6-3 Instalace systému	35
Obrázek 6-4 Nastavení v PVGIS	38
Obrázek 6-5 Naměřená data FV modulu	39
Obrázek 6-6 Data simulovaná z PVGIS	40
Obrázek 6-7 Srovnání spotřeby a výroby systému	41
Obrázek 6-8 Naměřené hodnoty teploty	42
Obrázek 6-9 Naměřená relativní vlhkost vzduchu.....	43
Obrázek 6-10 Množství vody v nádrži.....	44
Obrázek 7-1 Růst plodin za celé měřené období	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výnos plodin pod AGV [26],[9],[27]	20
Tabulka 2 Parametry baterie	31
Tabulka 3 Parametry FV modulu.....	32
Tabulka 4 Použité komponenty	33
Tabulka 5 Parametry čerpadla	36
Tabulka 6 Parametry FV modulu PVGIS	38

ÚVOD

Celosvětová poptávka po energii neustále roste, což je způsobeno zejména růstem světové populace, zvyšující se energetickou náročností průmyslu a zlepšováním životní úrovně. Zároveň s tím ale narůstá i tlak na změnu energetické politiky v důsledku klimatických změn. Odklon od fosilních paliv směrem k obnovitelným zdrojům energie se tak dostává do popředí.

Česká republika v roce 2024 vyrobila 68,7 TWh elektrické energie, přičemž uhelné zdroje se podílely na celkové výrobě 33,9 % a každým rokem je snižující se trend [1]. Tento snižující se trend je potřeba někde kompenzovat a nalézt řešení v obnovitelných zdrojích energie, které jsou momentálně na vzestupu.

Jednou z možností je využití zemědělské produkce a fotovoltaické výroby také zvané agrofotovoltaika. Představuje inovativní a udržitelný přístup k využívání půdy, který spojuje zemědělskou produkci s výrobou solární energie. Tato synergická kombinace umožňuje pěstování plodin a zároveň přispívá k udržitelnosti energetického sektoru. V posledních letech zaznamenala agrofotovoltaika vzrůstající zájem a stala se důležitým pojmem k diskusi o budoucnosti udržitelného zemědělství a ekologičtějšího pěstování plodin. Cílem této práce je poskytnout čtenáři pohled na agrofotovoltaiku jako perspektivní technologii, která může v budoucnosti pomoci s modernizací a automatizací zemědělství.

1. AGROFOTOVOLTAIKA

Agrofotovoltaika, nebo také agrivoltaika, občas ve zkratce AGV, je nový způsob pěstování plodin v synergii s fotovoltaickým systémem. Umožňuje zemědělcům nebo drobnějším pěstitelům pěstovat plodiny a zároveň vytvářet elektrickou energii.

Tento koncept byl poprvé použit roku 1982 německými vědci Adolfem Goetzbergerem a Arminem Zastrowem. Jejich hlavní myšlenkou bylo zvednutí fotovoltaických panelů zhruba o 4 metry nad zem, kdy fotovoltaické panely nezastíní celou ornou půdu ale pouze její část a zároveň jsou dostatečně vysoko aby mohla zemědělská technika provádět práci na hospodářské půdě [2].

V dalších desetiletích se zdokonalila a zlevnila výroba fotovoltaických panelů, tudíž se zvětšily možnosti jejich využití i v zemědělství. Některé studie ukázaly, že aplikací tohoto systému je možné zvýšit příjmy farem o více než 30 %, pokud jsou ztráty výnosu vlivem zastínění minimalizovány výběrem vhodných plodin. Důsledkem toho vzniklo mnoho projektů snažící se využít výhody agrofotovoltaiky. Z evropských zemí první pilotní projekty byly instalovány v Německu, Francii nebo Itálii. Mimo Evropu je velkým průkopníkem Čína společně s USA [3].

1.1 Možnosti instalace

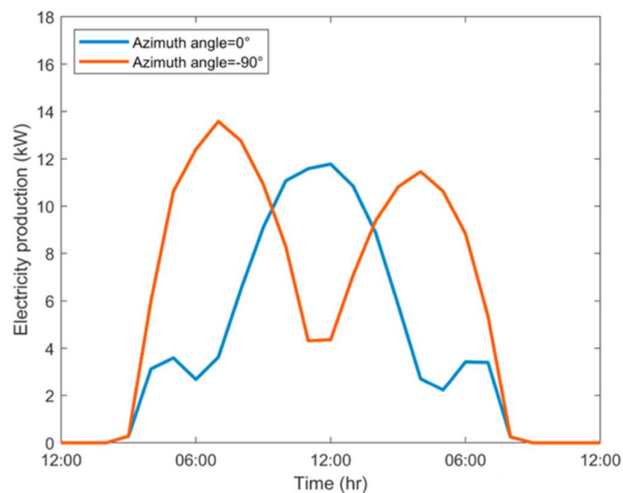
Při instalaci fotovoltaických modulů na zemědělskou půdu je nutné splnit určité podmínky. Vzhledem k tomu, že většina zemědělských strojů má velké rozměry a hmotnost, je třeba přizpůsobit návrh fotovoltaického systému tak, aby umožňoval současné využívání půdy k rostlinné produkci a zároveň neomezoval pohyb a práci mechanizace. Z těchto důvodů se v praxi dosud nejčastěji uplatňují dva základní typy instalací: horizontální a vertikální systémy [4].

1.1.1 Vertikální instalace

Jedná se o způsob instalace fotovoltaických panelů vhodný spíše pro obilniny, řepu nebo siláž. Využití může mít také jako ohraničení pastevní plochy. Instalace je provedena v řádcích v dostatečných rozestupech (9-25 m), aby nedocházelo k vzájemnému stínění mezi řadami FV modulů a také k možnosti průjezdu zemědělské techniky. Spodní hrana FV modulu je zhruba ve výšce 30-70 cm nad zemí. Pro tyto účely se používá takzvaný bifaciální fotovoltaický modul s možností výroby elektrické energie z obou stran [5].

Podle výsledků matematického modelování vertikálních agrofotovoltaických systémů dosahují bifaciální panely orientované ve směru východ–západ při zeměpisných šířkách nad 50° vyšší účinnosti než klasické jižně orientované systémy. Tento typ instalace zároveň narušuje jen minimálně vodní sloupec dopadající na půdu, což může mít pozitivní dopad na mikroklimatické podmínky v půdě. Na druhé straně však může dojít k narušení půdního profilu při instalaci konstrukce, zejména kvůli zhutnění půdy

a použití stavebních materiálů. Výhodou vertikálních bifaciálních systémů může být rovnoměrnější rozložení výroby v průběhu dne. Zatímco tradiční jižně orientované moduly mají maximum výkonu kolem poledne, bifaciální systémy orientované východ– západ pokrývají především ranní a večerní hodiny, kdy může být spotřeba energie vyšší. Tato charakteristika tak může přispět k lepšímu sladění výroby s reálnou spotřebou [6].



Obrázek 1-1 Srovnání bifaciálního systému s monofaciálním [6]

Vertikální systémy rovněž nejsou vhodné pro všechny druhy plodin. Vysoké rostliny, jako je kukuřice, rajčata nebo slunečnice, mohou moduly stínit a tím snižovat jejich výrobu [7].



Obrázek 1-2 Možnosti instalace vertikální systém [8]

1.1.2 Horizontální instalace

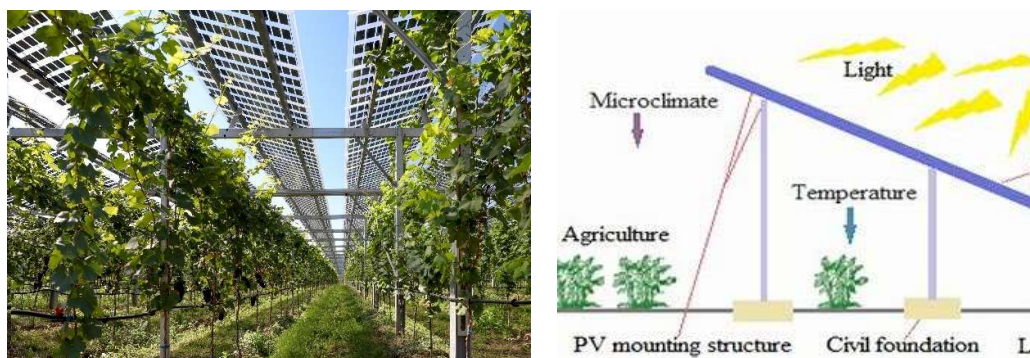
U horizontálního systému jsou fotovoltaické panely instalovány ve výšce čtyř a více metrů nad zemí, což umožňuje bezproblémový pohyb zemědělské techniky pod

konstrukcí. Plodiny se pěstují přímo pod vzniklou solární elektrárnou. Tento způsob instalace má své výhody, ale také nevýhody, které mohou ovlivnit ekonomickou návratnost systému [9].

Jedním z hlavních negativ je vysoká cena konstrukce. Nosné prvky, které musí být dostatečně pevné a zároveň dostatečně vysoké, často převyšují cenu samotných FV modulů a dalších komponent. Dalším problémem je omezený přístup slunečního záření, který může negativně ovlivnit dozrávání některých plodin. Například v Nizozemí byl realizován pilotní projekt kombinující fotovoltaiku s pěstováním malin. Projekt však musel být ukončen kvůli nízké návratnosti, maliny pod panely nedokázaly plně dozrát [10].

Horizontální agrofotovoltaické systémy se proto ukazují jako vhodnější zejména pro ovocné sady. Ovoce je obecně citlivější na extrémní meteorologické podmínky, jako jsou kroupy nebo silný vítr, a panely mohou sloužit i jako částečná ochrana. Příkladem je instalace v Německu, kde se pod FV panely úspěšně pěstují jablka a hrušky. Do budoucna se předpokládá využití tohoto systému také při pěstování chmele nebo vinné révy, pro které již existují první pilotní projekty [9].

Dalším faktorem, který ovlivňuje efektivitu tohoto řešení, je zastínění. Podle výsledků z klimaticky průměrného zkušebního roku došlo k poklesu výnosů některých plodin (brambory, celer, ozimá pšenice) až o 20 % oproti plochám bez zastínění. Naopak v roce s extrémně suchými a horkými podmínkami měl systém pozitivní vliv, výnos brambor se zvýšil o 10 % a ozimé pšenice o 3 %. Pěstování ovoce a zeleniny pod FV konstrukcí může být přínosné zejména u plodin s vysokou přidanou hodnotou na hektar [11].



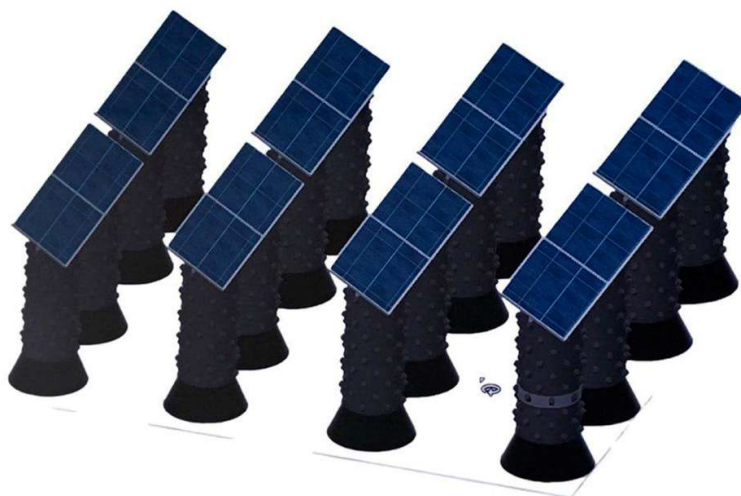
Obrázek 1-3 Horizontální instalace agrofotovoltaiky [12]

1.1.3 Hydroponické věže

V rámci hledání udržitelných řešení pro zemědělství a energetiku vyvinuli vědci z Národní univerzity Kolumbie inovativní agrofotovoltaický systém, který kombinuje fotovoltaickou výrobu energie s hydroponickým pěstováním rostlin. Tento systém je navržen jako modulární a vertikální. Základní prvek systému tvoří hydroponické věže složené z opakujících se prstencových modulů o výšce 20 cm. Každá věž může dosahovat

výšky až 2,5 metru a na jednom metru čtverečním umožňuje pěstování až 80 rostlin, což výrazně převyšuje hustotu výsadby v tradičních systémech. Díky vertikální konstrukci je umožněna vyšší intenzita produkce plodin na jednotku plochy [13].

Pro zajištění soběstačnosti a minimalizaci environmentální zátěže je systém koncipován tak, aby využíval dešťovou vodu a fungoval v uzavřeném vodním okruhu. Tím se výrazně snižuje spotřeba vody oproti běžným metodám zavlažování. Cirkulace živného roztoku je zajištěna pomocí nízkonapěťových čerpadel, která jsou napájena fotovoltaickými panely umístěnými přímo nad pěstebními věžemi. Díky integraci obnovitelného zdroje energie a efektivního pěstebního systému je možné na jednom místě dosáhnout dvojího výnosu, jak ve formě elektrické energie, tak i zemědělské produkce [13].



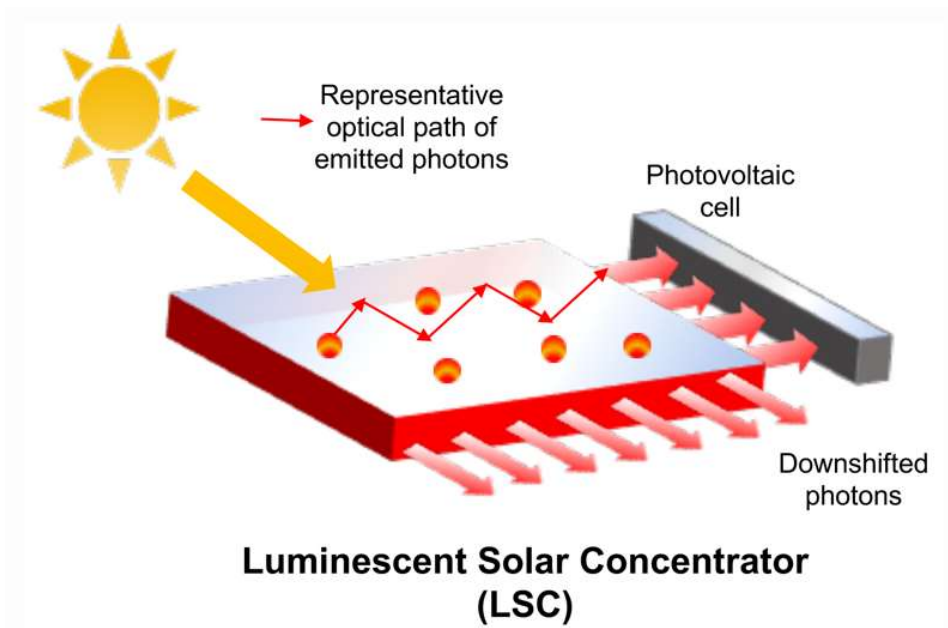
Obrázek 1-4 Hydroponické věže [13]

1.1.4 Instalace FV modulů na skleníky

Dalším inovativním způsobem, který je možné zařadit k agrofotovoltaickým systémům jsou výstavby skleníků s fotovoltaickými moduly, kde fotovoltaické zasklení může významně snížit, nebo dokonce zcela pokrýt energetické nároky jejich provozu. Tradiční neprůhledné fotovoltaické panely v případě skleníku jsou však nevhodné z důvodu nepropustnosti světla. Jediným řešením je tedy instalace poloprůsvitných modulů nebo využití luminiscenčních solárních koncentrátorů [14].

Luminiscenční solární koncentrátoři (LSC) jsou poloprůhledné nebo průhledné FV moduly, které viditelné světelné spektrum propouští skrze sklo, a naopak vlnové délky použitelné k výrobě elektrické energie koncentrují do rámců, kde dochází na přeměnu v energii. Mohou mít v budoucnosti rozsáhlé využití jak ve stavebnictví, tak

v zemědělské produkci. Jejich využití ve sklenících nabízí slibný způsob výroby obnovitelné energie bez výrazného snížení zemědělské produkce, přičemž klíčové zůstává nalezení optimální rovnováhy mezi propustností světla a efektivitou výroby elektřiny [15].



Obrázek 1-5 Luminiscenční solární koncentrátor [16]

1.2 Využití natáčení panelů pro AFV

V agrofotovoltaických systémech s horizontálním jednoosým natáčením lze efektivně optimalizovat distribuci světla mezi plodinami a fotovoltaickými panely. Tato technologie umožňuje dynamicky přizpůsobovat polohu panelů aktuálním potřebám rostlin během vegetačního období. Cílem je najít rovnováhu mezi dostatečným osvětlením pro fotosyntézu a maximalizací výroby elektřiny [17].

Zatímco standardní sledování slunce maximalizuje energetický výnos, antisledování nebo specificky upravené algoritmy mohou ve vhodných fázích růstu zvýšit zemědělskou produktivitu. Moderní systémy jako Axial AgriTracker nebo Sun'Agri využívají senzory, meteorologické modely a růstová data plodin pro řízení natočení panelů. Výzkumy ukazují, že přizpůsobené strategie sledování mohou dosáhnout až 91 % požadované radiace pro jabloně při pouze 20% poklesu elektrické produkce [17].

Klíčem k efektivnímu využití této technologie je práce s absolutními hodnotami dopadajícího světla (např. ve W/m^2 nebo $Wh/m^2/den$), nikoli s relativním zastíněním, čímž se lépe kompenzuje proměnlivost počasí. Tato metoda tak přináší vyšší přesnost i opakovatelnost výsledků a umožňuje cílené řízení agrotechnických zásahů [18].

Natáčením panelů je možné zvýšit zisk FV a v případě agrofotovoltaiky i přizpůsobovat množství dopadajícího záření na obdělávanou půdu, popřípadě chránit úrodu před nepříznivými vlivy počasí.

Oproti běžnému FV systému bez natáčení panelů se zisk u dynamických systémů zvedne o 20-35 %. Zároveň má vliv i na pěstované plodiny u kterých je možné dosáhnout zvýšení produkce plodin o 10 % oproti statickým verzím. Tyto systémy a jejich vliv na pěstované plodiny nebyl zatím příliš prozkoumán, avšak vznikly již pilotní projekty na území Německa, které se snaží vyhodnotit jejich výhody [11].

1.2.1 Pasivní natáčení panelů

Pasivní systémy natáčení panelů představují jednoduchý způsob, jak přizpůsobovat jejich polohu bez potřeby elektronického řízení. Využívají fyzikální vlastnosti různých materiálů, především jejich tepelnou roztažnost. Nejčastěji pracují na principu nízkovroucích kapalin nebo plynů, které jsou uzavřeny v nádržkách umístěných na okrajích fotovoltaického panelu. Vlivem slunečního záření dochází k ohřevu jedné strany, což vede k odpařování média a zvýšení tlaku, jenž způsobí natáčení panelu požadovaným směrem [19].

Tyto systémy bývají konstruovány jako jednoosé, přičemž nádržky jsou vzájemně propojené a mezi nimi dochází k přenosu pracovní látky. Součástí konstrukce bývá také stínící prvek, který zabraňuje rovnoměrnému ohřevu obou nádrží zároveň, čímž je podpořen pohyb v ose. Jakmile se teploty na obou stranách vyrovnají, systém se stabilizuje v nové poloze, odpovídající aktuálnímu směru dopadajícího záření [19].

Přestože je tento systém energeticky nenáročný a konstrukčně jednoduchý, není vhodný pro agrofotovoltaické aplikace. Důvodem je, že neumožňuje cílené řízení natočení panelů podle potřeby rostlin, například pro zajištění dodatečného osvětlení během vegetačního období nebo pro ochranu plodin při extrémních povětrnostních podmínkách [20].

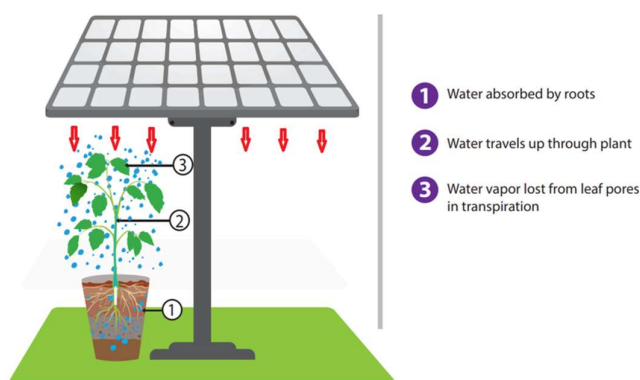
1.2.2 Aktivní natáčení panelů

Aktivní natáčení panelů je možné rozdělit do tří skupin podle jejich principu fungování, a to na aktivní natáčení s optickými senzory, pomocnými oboustrannými fotočlánky a řízení za pomoci data a času. Systémy vyhodnocují vektor intenzity slunečního záření dopadající na FV modul a přizpůsobují tomu naklonění panelu pomocí instalovaného pohyblivého systému [18].

Využití tohoto systému, pro agrofotovoltaiku by mohlo mít velký význam z hlediska možnosti přizpůsobení dopadajícího světla, ochrany plodin a výroby elektrické energie. Například v Německu vznikl pilotní projekt agrofotovoltaiky, kde FV moduly byly integrovány do jablečných sadů. Výnosy zemědělské produkce se zvedly o 20 %. Přes jarní a letní období byly jabloně kryté před špatnými meteorologickými podmínkami a na konci léta FV moduly propouštěly více světla pro optimální dozrání plodů [20].

2. VÝHODY A NEVÝHODY AGROFOTOVOLTAIKY

Agrofotovoltaika, jako spojení zemědělství a výroby solární energie, představuje inovativní přístup k udržitelnému hospodaření s půdou. Tento koncept umožňuje využít stejnou plochu pro pěstování plodin i produkci elektřiny, čímž reaguje na rostoucí potřebu obnovitelných zdrojů energie a efektivního využívání půdního fondu. Přestože agrofotovoltaické systémy nabízejí řadu výhod, včetně ochrany úrody a dodatečných příjmů pro zemědělce, nesou s sebou i technické, ekonomické a legislativní výzvy. V této části práce budou podrobně rozebrány klíčové přínosy a omezení této technologie na základě aktuálních výzkumů a realizovaných zahraničních projektů [21].



Obrázek 2-1 Mikroklima vzniklé pod AFV [22]

2.1 Výhody agrofotovoltaického systému

Agrofotovoltaické systémy přinášejí řadu výhod, které podporují udržitelný rozvoj zemědělství i energetiky. Jedním z hlavních přínosů je efektivní využití půdy na jedné ploše může probíhat současně pěstování plodin i výroba elektřiny ze slunečního záření. Tento model je obzvláště přínosný v oblastech s omezeným množstvím zemědělské půdy nebo v regionech s klimatickými změnami [23].

FV moduly instalované nad plodinami vytvářejí částečný stín, který chrání rostliny před přehřátím, silným slunečním zářením nebo extrémními srážkami. Díky tomu dochází ke zlepšení mikroklimatických podmínek a snížení stresu plodin, což může v některých případech vést i ke zvýšení výnosů. Například studie publikovaná v časopise *Nature Sustainability* ukázala, že při pěstování určitých plodin (např. salátu nebo rajčat) pod fotovoltaickými panely dochází ke zlepšení růstu i úspoře vody [24].

Další významnou výhodou je snížení odpařování vody z půdy, což přispívá k efektivnějšímu zavlažování. Tento faktor je klíčový zejména v suchých oblastech nebo během období sucha. Kromě toho agrofotovoltaika umožňuje diverzifikaci příjmů

zemědělců z prodeje zemědělských produktů mohou získávat také příjmy z výroby a prodeje elektrické energie do sítě, popřípadě využít přebytečnou energii k napájení zemědělských objektů a strojů [24].

V neposlední řadě může vzájemné působení vegetace a solárních panelů zvýšit efektivitu samotných panelů. Ochlazování panelů vodní párou uvolňovanou z rostlin pomáhá udržovat jejich optimální provozní teplotu, což může mírně zvýšit jejich účinnost [22].

2.2 Nevýhody agrofotovoltaického systému

Přestože agrofotovoltaické systémy nabízejí řadu environmentálních a ekonomických výhod, jejich implementace s sebou nese i specifické nevýhody a rizika. Mezi nejvýznamnější omezení patří především vysoké počáteční investiční náklady, které mohou být pro menší zemědělské podniky překážkou. Instalace panelů vyžaduje technicky a prostorově náročná řešení, jež musí zohlednit kompatibilitu se zemědělskou mechanizací i s druhem pěstovaných plodin [21].

Další nevýhodou je možný stínový efekt, který může negativně ovlivnit fotosyntézu u světelně náročných plodin. Nevhodně navržené rozložení panelů tak může vést ke snížení výnosů. V některých případech může docházet i ke snížené efektivitě využití zemědělské techniky, zejména pokud moduly omezují přístup pro standardní stroje nebo vyžadují speciálně upravené zařízení [21].

Z environmentálního hlediska se diskutuje také riziko úniku chemických látek z FV modulů, zejména v případě jejich poškození nebo nesprávné likvidace. Některé tenkovrstvé technologie obsahují těžké kovy, jako je kadmium nebo selen, které mohou představovat potenciální ekologické riziko při nekontrolovaném uvolnění do půdy. Vzhledem k omezeným dlouhodobým zkušenostem s provozem AFV systémů v reálných zemědělských podmínkách zůstávají některé dopady dosud nedostatečně prozkoumány, což může být překážkou jejich širšího zavádění [25].

3. VHODNÉ PLODINY PRO AGRFOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY

Výběr vhodných plodin je klíčovým faktorem pro úspěšné fungování agrofotovoltaických systémů. Jelikož se jedná o kombinaci fotovoltaické výroby a zemědělské produkce je potřeba dbát na specifické požadavky na množství prostupujícího slunečního záření a mikroklimatických podmínek. Plodiny pěstované pod FV panely jsou do určité míry zastíněny, což ovlivňuje jejich růst, výnos a kvalitu. Z toho důvodu je nezbytné vybírat takové druhy a odrůdy, které jsou schopny tolerovat sníženou intenzitu slunečního záření nebo z ní dokonce profitovat [26].

Tabulka 1 Výnos plodin pod AGV [26],[9],[27]

Plodina	Dopad na výnos	Reference	RSR
Brambory	+/-	Kuruppuarachchi	50
Pšenice	+	Dufouretal.	25/60
Rýže	-	IslamandMorison	22/52/77
Rajčata	+	Baharuddinetal.	25/50/75
Káva	+	Soto-Pinto et al.	30-70
Salát	+	Francie–Institut	50/70
Čaj	+	Chiba	30/40
Kukuřice	-	Jiaetal.	55
Borůvky	+/-	Lobos et al.	25/50/75

Nejvhodnějšími kandidáty pro agrofotovoltaické podmínky jsou plodiny s vyšší tolerancí k zastínění, krátkým vegetačním cyklem a nízkými nároky na přímé sluneční světlo. Z výsledků různých studií vyplývá, že mezi takové plodiny patří například listová zelenina (špenát, salát, rukola), kořenová zelenina (ředkvičky, mrkev), luštěniny, některé obiloviny (např. pšenice v určitých odrůdách), stejně jako bobuloviny a některé druhy ovoce. U stromových kultur, jako jsou jabloně nebo hrušně, lze pozorovat pozitivní dopady mírného zastínění v podobě zvýšené kvality plodů, sníženého výskytu chorob a zpomalení ztrát vody výparem [17].

Zejména plodiny, které by jinak mohly trpět tepelným stresem nebo nadměrným osluněním, mohou z agrofotovoltaiky profitovat. Například u kávy, ostružin nebo kiwi byly zaznamenány vyšší výnosy a prodloužená doba sklizně při částečném zastínění. Naopak u druhů, které vyžadují plné slunce (např. kukuřice, slunečnice nebo cukrová třtina), může dojít k poklesu výnosu a kvality produkce [26].

Výběr plodin by měl rovněž reflektovat místní klimatické podmínky, orientaci a sklon fotovoltaických panelů, výšku jejich instalace a režim hospodaření. Některé experimentální systémy se soustředí i na sezónní rotaci plodin, kdy jsou pod panely v různých obdobích roku pěstovány různé druhy podle aktuálních světelných podmínek.

Závěrem lze říct, že agrofotovoltaika není univerzálně vhodná pro všechny zemědělské plodiny, avšak při vhodném výběru pěstovaných plodin lze dosáhnout jak stabilní zemědělské produkce, tak efektivního využití solární energie [26].

4. INSTALACE AGR VE SVĚTĚ

Propojování výroby elektřiny ze sluneční energie s využíváním zemědělské půdy nachází stále širší uplatnění v praxi po celém světě. Tento přístup umožňuje efektivně využít omezené přírodní zdroje a reagovat na výzvy spojené s klimatickou změnou a rostoucí poptávkou po obnovitelných zdrojích energie. V této kapitole je představena aktuální situace v oblasti instalací agrofotovoltaických systémů v různých zemích, včetně příkladů realizovaných projektů, technických řešení a regionálních specifíků [28].

4.1 Země již využívající agrofotovoltaiku

V průběhu roku 2000 byly postaveny a zkoumány první pilotní systémy agrofotovoltaiky v Japonsku a následně v Německu a Francii. Postupně se přidaly i větší země jako je Čína a USA. Japonsko zavedlo první program vládní podpory v roce 2013 a v roce 2018 bylo zaznamenáno více než 1 900 instalovaných agrofotovoltaických systémů.

Japonsko následovaly Čína, Francie, USA a Korea s vládními dotacemi pro agrifotovoltaiku, což zvýšilo celosvětový průměrný výkon zařízení z 5 MW v roce 2012 na více než 14 GW v roce 2021. Dosud největší agrifotovoltaický systém, pěstující kustovnici čínskou (goji), byl implementován v Číně na okraji pouště Gobi a v současné době dosahuje výkonu 1 GWp [29].

4.1.1 Německo

Německo patří mezi průkopníky agrofotovoltaiky v Evropě a aktivně investuje do výzkumu i realizace projektů, které kombinují zemědělskou produkci s výrobou elektrické energie ze slunce. Výsledky dosavadních instalací potvrzují, že správně navržené systémy mohou významně zvýšit efektivitu využití půdy.

Jedním z nejznámějších pilotních projektů je APV-RESOLA, realizovaný v oblasti Heggelbach pod vedením výzkumného institutu Fraunhofer ISE. Projekt demonstruje kombinaci vertikálních a vyvýšených fotovoltaických panelů s pěstováním plodin jako jsou brambory, jetel nebo pšenice. Měření v několikaletém horizontu ukázala, že při správném uspořádání dochází ke zlepšení výnosů u některých plodin, a to zejména díky snížení tepelného stresu a lepšímu zadržování vlhkosti během suchých období. Přitom dochází ke zvýšení celkové produktivity půdy až o 30 % [30].

Dalším významným příkladem je projekt společnosti SUNfarming, která v Německu buduje největší evropskou síť agrofotovoltaických instalací s celkovým plánovaným výkonem přes 700 MW. Tyto instalace nejsou určeny pouze pro výrobu elektřiny, ale zároveň slouží jako demonstrační a výuková centra pro udržitelné zemědělství. V rámci těchto projektů se testuje také pěstování bylin a zeleniny, které těží z částečného zastínění a kontrolovaného mikroklimatu [31].

Technologicky pokročilým přístupem je také systém s vertikálně orientovanými bifaciálními panely, který byl instalován například v lokalitě Donaueschingen-Aasen. Tato konfigurace umožňuje souběžnou mechanizovanou obsluhu polí i vysokou produkci elektřiny, přičemž panely využívají odražené světlo z obou stran. Tento typ uspořádání je považován za velmi perspektivní pro budoucí rozvoj agrofotovoltaiky ve střední Evropě [32].

4.1.2 Japonsko

Japonsko patří mezi průkopnické země v oblasti agrofotovoltaiky, která je zde známá pod pojmem „solar sharing“. Tento koncept, jenž umožňuje současné využití zemědělské půdy pro pěstování plodin i výrobu elektrické energie pomocí fofovoltaických panelů, se v Japonsku rozvíjí zejména v reakci na omezené množství orné půdy a vysokou hustotu obyvatelstva. Agrofotovoltaika tak představuje důležitý nástroj pro podporu venkovského rozvoje, soběstačnosti a přechodu k udržitelnému hospodaření [27].

Jedním z konkrétních příkladů je projekt společnosti Trina Solar v prefektuře Chiba, kde jsou instalovány bifaciální solární moduly nad plodinami jamu. Tento projekt využívá řízené stínění, které zlepšuje mikroklimatické podmínky a zároveň umožňuje efektivní produkci energie. Jam patří mezi plodiny, kterým částečný stín vyhovuje, což z projektu činí ukázkový příklad synergického spojení mezi fofovoltaikou a zemědělstvím [33].

Další příklad pochází ze dvou fíkových farem, taktéž v prefektuře Chiba, kde společnost SolarEdge implementovala systém s bifaciálními panely instalovanými ve výšce, aby byl zachován dostatek světla pro podrost. Panely jsou instalovány pod úhlem 10° a stínění činí přibližně 28 %, což zajišťuje vhodné podmínky pro růst fíkovníků. Systém navíc využívá pokročilou DC-optimalizaci a monitoring, což přispívá k vyšší efektivitě výroby [28].

Významným hráčem v oblasti agrofotovoltaiky je také společnost Idemitsu Kosan, která po úspěšném pilotním provozu zařízení o výkonu 45 kW zahájila přípravy na výstavbu většího 2 MW zařízení ve městě Kisarazu. Projekt využívá technologii sledování slunečního pohybu, která zajišťuje vyšší energetický zisk při zachování zemědělského využití půdy [34].



Obrázek 4-1 Agrofotovoltaika využita v kombinaci s pěstováním čaje [29]

4.1.3 Čína

Jedním z největších agrofotovoltaických projektů na světě je 1 GW fotovoltaický park společnosti Baofeng Group v čínské provincii Ning-sia. Na ploše 107 km² byly instalovány fotovoltaické panely ve výšce 2,9 metru, pod nimiž se pěstují keře kustovnice čínské (Goji). Projekt neslouží pouze k výrobě elektřiny z obnovitelných zdrojů, ale také k obnově půdy v dříve degradované oblasti. Vegetační pokryv se zde zvýšil o 85 % a odpařování půdní vlhkosti kleslo o 30–40 %, což vedlo ke zlepšení mikroklimatických podmínek a návratu drobných živočichů do lokality [35].

Podle informací společnosti Huawei, která se podílela na výstavbě tohoto projektu, vyprodukovaly fotovoltaické elektrárny postavené ve spolupráci s Baofeng Group do konce roku 2020 celkem 4,31 milionů MWh elektřiny [36].



Obrázek 4-2 Pěstování kustovnice čínské [7]

4.1.4 USA

Jedním z nejznámějších projektů v USA je Jack's Solar Garden v Coloradu, který se rozkládá na čtyřech akrech a kombinuje pěstování zeleniny, bylin a květin s výrobou elektřiny. Od roku 2021 zde bylo vypěstováno přes 25 000 liber plodin, přičemž projekt slouží také jako výzkumné a vzdělávací centrum [37].

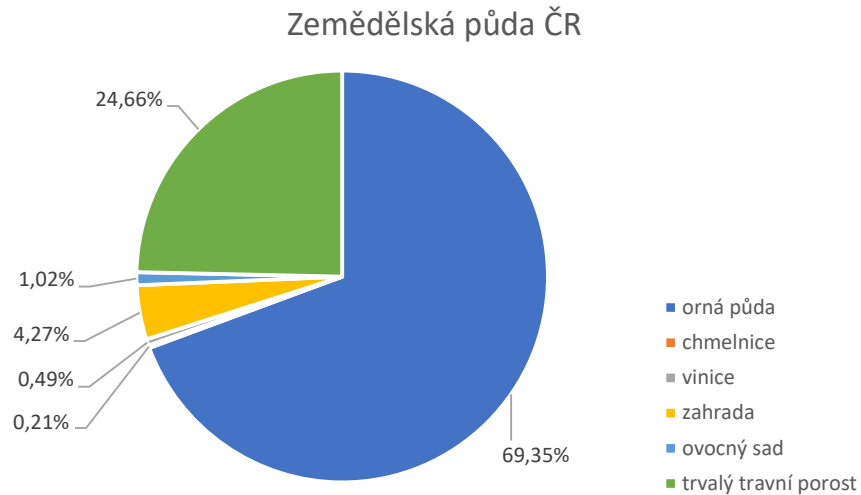
4.2 Možnosti instalace v ČR

V České republice představuje agrofotovoltaika stále relativně nový a dosud legislativně neukotvený koncept. Změnu přinesla až novela zákona č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu, která umožňuje instalaci fotovoltaických panelů na zemědělské půdě bez nutnosti jejího vynětí, za předpokladu, že zemědělská činnost zůstane zachována [38]. Zatímco v některých zemích Evropy je tento způsob kombinovaného využívání půdy běžnou součástí výroby elektrické energie, v ČR se dosud neuskutečnily žádné rozsáhlejší realizace, které by sloužily jako referenční projekty. Přesto však existuje rostoucí zájem ze strany odborné i zemědělské veřejnosti o potenciál tohoto řešení [9].

Na druhou stranu existuje několik indikativních studií, které potvrzují, že klimatické a geografické podmínky v Česku jsou pro agrofotovoltaiku příznivé. Potenciál je zejména v nížinných zemědělských oblastech s vysokým výskytem slunečního záření, jako je jižní Morava, Polabí nebo oblasti s intenzivní rostlinnou výrobou. V těchto regionech by instalace vyvýšených fotovoltaických systémů mohla pomoci snižovat teplotní stres rostlin, zlepšovat mikroklima a zároveň produkovat čistou energii bez výrazného omezení zemědělské činnosti. Velké využití by mohla najít v oblasti vinic na jižní Moravě [39].

I když se zatím agrofotovoltaika v ČR nachází spíše ve fázi diskusí a pilotních návrhů, s ohledem na evropské klimatické cíle, rostoucí tlak na dekarbonizaci a potřebu

efektivního využívání půdy lze očekávat, že se v nejbližších letech stane diskutovaným tématem [39].



Obrázek 4-3 Druhy zemědělské půdy v ČR [40]

4.2.1 Vhodné podmínky pro agrofotovoltaiku

Jedním z hlavních podmínek pro smysluplnou instalaci agrofotovoltaiky je tzv. ukazatel efektivity využití zemědělské půdy (anglicky Land Equivalent Ratio, zkráceně LER) je metrika používaná k hodnocení účinnosti kombinovaného využití zemědělské půdy, například při agrofotovoltaických projektech. Tento ukazatel měří, jak efektivně je půda využita, pokud kombinuje zemědělskou produkci s výrobou energie z fotovoltaiky, ve srovnání s jejich samostatným využitím [6]. Výpočet účinnosti kombinovaného využití zemědělské půdy je dán vztahem

$$LER = \frac{Výnos_{zemědělský}}{Výnos_{samostatný\ zemědělský}} + \frac{Výnos_{energetický}}{Výnos_{samostatný\ energetický}}, \quad (1)$$

kde $Výnos_{zemědělský}$ je skutečný výnos plodin při agrofotovoltaickém systému, $Výnos_{samostatný\ zemědělský}$ je výnos plodin bez fotovoltaiky na stejné ploše, $Výnos_{energetický}$ je výnos energie při agrofotovoltaickém systému, $Výnos_{samostatný\ energetický}$ je výnos energie při samostatném fotovoltaickém systému na stejné ploše. V ČR musí rostlinná produkce s agrofotovoltaikou zůstat na stejné úrovni jako bez FV modulů nebo vyšší. Například v Japonsku je omezení na rostlinnou produkci na 80 % [41].

4.3 Využití přebytečné energie z AGF

Jedním z důležitých aspektů AGF je efektivní nakládání s vyrobenou elektrickou energií. Během provozu fotovoltaických elektráren dochází často k situaci, kdy je vyrobeno více energie, než je aktuálně využito pro zemědělské potřeby (např. zavlažování, napájení sensoriky nebo řídicí elektroniky). Tato přebytečná energie pak může být buď uložena do baterií, odvedena do zátěže, nebo dále využita mimo samotný zemědělský provoz, čímž se zvyšuje celková efektivita systému [9].

Základním způsobem využití přebytečné energie je akumulace do bateriových systémů, které slouží k pokrytí spotřeby v době, kdy FV moduly negenerují dostatečný výkon (např. v noci nebo při oblačnosti). Další možností je přesměrování do odporové zátěže, například ve formě topných drátů pro ohřev půdy, inkubační přístroje, chladírny na plodiny [39].

Rostoucí zájem vyvolává možnost využití přebytečné energie mimo zemědělství. Momentálně u agrofotovoltaiky je nejběžnější prodej do distribuční sítě nebo v některých případech se energie využívá pro napájení komunitních zařízení, jako je veřejné osvětlení nebo provoz kamerových systému [9].

Zvláště zajímavou oblastí ale může být napájení elektromobilů z agrofotovoltaických systémů. Studie publikovaná výzkumníky z Oregon State University v roce 2022 ukázala, že přebytečná energie z AFV systémů má potenciál pokrýt část energetických nároků dobíjecích stanic pro elektromobily ve venkovských oblastech. Bylo identifikováno více než 200 lokalit, kde by mohla být instalována kombinovaná infrastruktura pro agrofotovoltaiku a dobíjení elektromobilů. Zároveň bylo spočteno, že by tento model mohl vést ke snížení emisí až o 3,1 milionu tun CO₂ ročně, a podpořit provoz téměř 700 000 vozidel na elektřinu [42].

5. AGROFOTOVOLTAIKA A ROBOTIKA

Integrace robotických technologií do agrofotovoltaických systémů umožňuje automatizaci různých zemědělských činností, jako je setí, zavlažování, sklizeň a údržba plodin. Například v Japonsku byl vyvinut robot schopný provádět setí, prořezávání a sklizeň v husté a různorodé vegetaci pod solárními panely, což zvyšuje efektivitu práce a snižuje degradaci půdy vlivem těžké zemědělské techniky [43].

V České republice se začínají objevovat projekty kombinující zemědělství a robotiku. Například dvě vinařství na Břeclavsku nasadila autonomní roboty VitiBot Bakus pro práci ve vinicích. Tito roboti jsou schopni provádět různé úkoly, jako je kultivace půdy, a plánuje se jejich další rozšíření o funkce jako ožínání a postřik [44].

Spojení agrofotovoltaiky a robotiky přináší řadu výhod, včetně zvýšení efektivity, snížení nákladů na pracovní sílu a lepšího využití půdy. Nicméně existují i výzvy, jako je potřeba vysokých počátečních investic a nutnost přizpůsobení technologií specifickým podmínkám jednotlivých farem. Další mezním krokem v agrofotovoltaice bude rozhodně automatizace a propojení s komplexními systémy schopné samostatně vyhodnotit využitelnost zemědělské půdy, klimatické podmínky atd. Velkou změnou může být výměna těžkých zemědělských strojů za lehčí agroroboty schopné samostatné činnosti, bez potřeby lidské obsluhy [45][43].



Obrázek 5-1 Agrorobot vinice poblíž Břeclavy [44]

Jak již bylo zmíněno výše výhodou agrorobotů je jejich relativně nízká hmotnost, tím nedochází k degradaci půdy vlivem ztuhování jako u těžké zemědělské techniky. Další výhodou může být snížení množství potřebných chemikálií, ať se bavíme o hnojivech či pesticidech. Například robot z projektu profesora Salah Sukkarieh z Austrálie. Robot je

schopný rozeznat plodiny od plevelu a mechanickým rotačním systémem odstraňovat nežádoucí rostliny. Omezením je rozhodně rychlost procesu a taktéž problematika napájení samotného stroje, která je částečně vyřešena implementovanými fotovoltaickými panely [46].

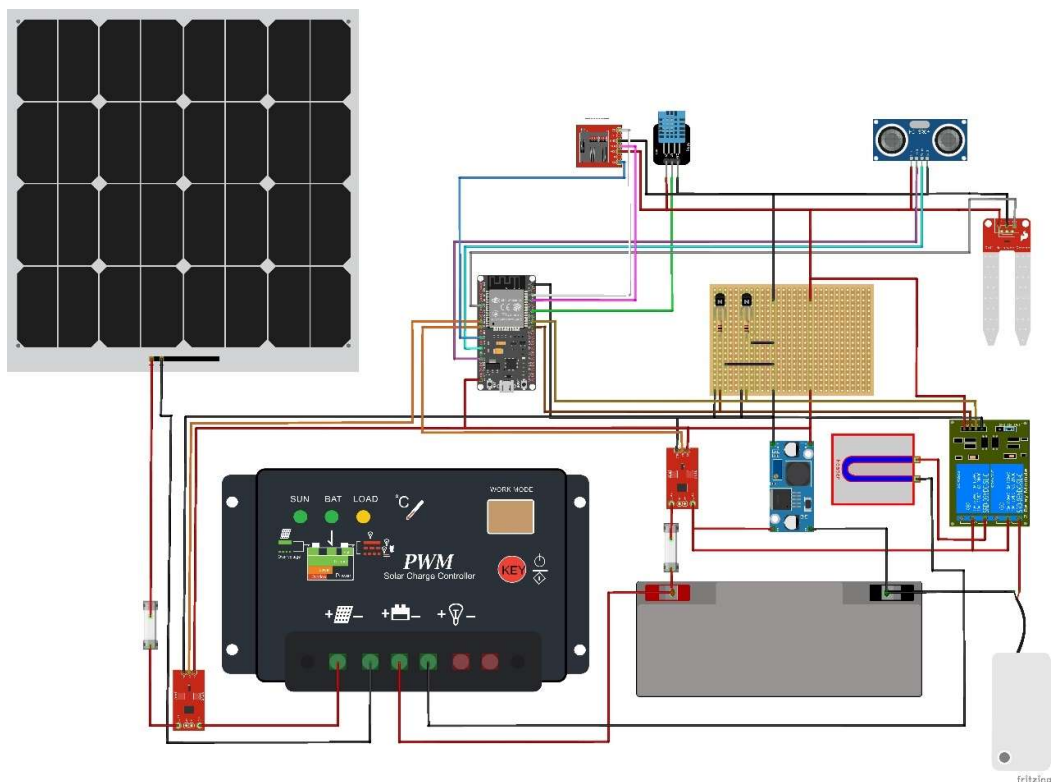
6. REALIZACE PROJEKTU

Cílem bakalářské práce byl návrh, realizace a provoz drobného agrofotovoltaického systému, který využívá elektrickou energii z FV modulu k řízení zavlažování rostlin na základě aktuálních meteorologických podmínek. Systém je navržen tak, aby fungoval zcela autonomně, bez nutnosti připojení k distribuční síti, a zároveň sloužil jako nástroj pro sběr a analýzu provozních dat. Data byla ukládána na SD kartu a každé dva týdny zaznamenávána.

Fotovoltaický panel o výkonu 30 W napájel mikrokontroler, senzorové jednotky a malé čerpadlo, které zajišťuje dodávku vody k rostlinám v závislosti na aktuální vlhkosti půdy. Systém současně monitoroval více veličin jako teplotu a vlhkost vzduchu, výrobu FV modulu, stejně jako spotřebu systému a hladinu vody v nádrži.

6.1 Návrh systému

Navržený agrofotovoltaický systém byl sestaven tak aby se jednalo o autonomní jednotku určenou pro maloplošné zavlažování, které využívá elektrickou energii z FV modulu k řízení čerpadla na základě aktuální vlhkosti půdy. Kromě samotné funkce zavlažování slouží také jako měřicí zařízení, které dlouhodobě zaznamenává meteorologické a provozní hodnoty na SD kartu. Jednotlivé komponenty využití při projektu lze vidět v Tabulce 4 a samotné zapojení na Obrázku 6-1, které bylo vytvořeno v programu Fritzing.



Obrázek 6-1 Schéma zapojení

6.1.1 Akumulátor a napájení FV modulem

K ukládání vyrobené energie slouží olověná baterie o kapacitě 12 V/14 Ah (168 Wh). Použité napětí a kapacita byly zvoleny na základě teoretických výpočtů spotřeby systému a potřeby jednotlivých komponent na nižší napěťovou hladinu. Baterie zajišťuje napájení systému v době, kdy FV modul neregeneruje dostatek energie (např. v noci nebo při nepříznivém počasí).

Tabulka 2 Parametry baterie

Baterie	U_n [V]	U_{100} [V]	U_{25} [V]	C [Ah]
AGM	12	12,8	12,25	14

Při plném nabití baterie byla přebytečná energie přeměrována do odporového drátu, čímž bylo zajištěno, že FV modul zůstával stále aktivní a bylo možné měřit vyrobenou energii i při přebytku. Modul byl umístěn v těsné blízkosti k celému systému, kdy jeho natočení přibližně koreluje se systémem již existujícím. Pohled na celý projekt je na Obrázku 6-3.

Tabulka 3 Parametry FV modulu

FV modul	P_{mpp} [W]	V_m [V]	I_m [A]	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]
Monokrystalický křemík	30	17,6	1,7	20,8	2,21

6.1.2 Řídicí jednotka

Centrem celého systému byl mikrokontroler Wemos D1 R32, který je založen na čipu ESP32. Ten zajišťoval sběr dat ze senzorů, řízení relé a vyhodnocování stavu nabití baterie, zaznamenávání veškerých dat na SD kartu ve zvoleném časovém intervalu. Problematickou částí celého systému bylo spouštění relé modulů, protože samotná řídicí deska nebyla schopná dodat dostatečný inicializační proud pro spuštění relé. Tato skutečnost byla vyřešena přidáním tranzistoru NPN BC337, který je schopný přenášet proud 1,2 A, což bylo pro spuštění relé již dostačující. Způsob zapojení tranzistoru je znázorněn na Obrázku 6-1.



Obrázek 6-2 Mikrokontrolér Wemos D1 R32

6.1.3 Senzorové jednotky

Jak již bylo zmíněno výše měřené hodnoty jsou teplota a vlhkost vzduchu, které jsou měřené modulem DHT22. Modul je přes otvor v ochranné krabici vytažen ven a funguje jako drobná meteorostanice. Zmíněné hodnoty teploty a vlhkosti vzduchu jsou porovnávány s hodnotami z již instalované meteorologické stanice na střeše budovy T12. Následujícím měřeným parametrem bylo množství vody v nádrži. Zde byl použit ultrazvukový senzor pro měření vzdálenosti. Dalšími měřenými parametry byly hodnoty napětí a proudu z FV

modulu a baterie. Měření bylo zajištěno proudovými senzory INA219, kde naměřené hodnoty z FV modulu představují výrobu a měřené hodnoty na baterii spotřebu systému. Posledním zaznamenávaným parametrem byla analogová hodnota z kapacitního půdního vlhkoměru. Tento jediný parametr nebyl graficky znázorněn, ostatní parametry byly vyneseny do grafů a porovnávány s daty z meteorologické stanice na střeše budovy T12.

Tabulka 4 Použité komponenty

Komponenty	I_{odběr} [mA]	Provozní napětí [V]
Wemos D1 R32	175	5
Půdní vlhkoměr	10	5
Čerpadlo	1580	12
Ultrazvukový senzor HC-SR4	20	5
Jednokanálové relé	75	5
DHT22	2	5
Proudový senzor INA219	2	5
Čtečka SD karty	30	5
Step down měnič	5	12
Celkem	1899	

6.1.4 Zavlažování

Zavlažování bylo zajištěno malým 12 V čerpadlem, které bylo připojeno přes reléový modul. Čerpadlo bylo spuštěno vždy, když půdní vlhkost překročí analogovou hodnotu 3500 což je definovaný práh, který byl zkoušen před spuštěním projektu. Čerpadla bylo provozováno po dobu 15 sekund a následně došlo k jeho vypnutí až do dalšího měření půdní vlhkosti, kdy po vyhodnocení přes půdní vlhkoměr došlo znovu k zalévání nebo nikoliv. Parametry čerpadla jsou vypsány v Tabulce 5.

Voda byla sbírána z FV modulů do nádrže o objemu 50 litrů. Celková plocha, ze které byla sbíraná voda byla 4,69 m². Množství vody v nádrži bylo kontrolováno ultrazvukovým senzorem HC-SR4, který slouží k měření vzdálenosti objektu od senzoru. Zde bylo využita známá velikost nádrže, která je o rozměrech 50/40/27 centimetrů. Z naměřené vzdálenosti hladiny vody systém dopočítal množství vody a odeslal naměřenou hodnotu do Mikrokontrolér Wemos D1 R32, kde došlo k dalšímu zpracování.

6.2 Softwarová část návrhu

Řídící logika systému byla implementována v jazyce C++ v prostředí Arduino IDE a běží na mikrokontroléru Wemos D1 R32, který vychází z platformy ESP32. Tento mikrokontrolér byl zvolen zejména s ohledem na dostatečný výpočetní výkon, nízkou spotřebu energie, vestavěný Wi-Fi modul a kompatibilitu s knihovnamy potřebnými pro práci s vybranými senzory. Program zajišťuje sběr, vyhodnocení a ukládání dat z již zmíněných senzorů, řízení zavlažování na základě aktuálních podmínek a správu spotřeby energie.

6.2.1 Sběr dat a jejich zpracování

Jednou z hlavních funkcí softwaru bylo periodické měření veličin charakterizujících jak provozní stav systému, tak i aktuální klimatické a půdní podmínky. Tyto údaje byly zpracovávány v pravidelných časových intervalech a následně ukládány na SD kartu. Kromě lokálního ukládání jsou některé klíčové informace odesílány také na cloudovou platformu ThingsBoard, která umožňuje vzdálený dohled nad systémem.

V oblasti energetických měření bylo implementováno snímání napětí a proudu na dvou místech: jednak na výstupu z fotovoltaického panelu a jednak na výstupu z baterie. Obě měření byla realizována pomocí dvou proudových senzorů typu INA219, přičemž každý byl připojen na jinou I2C adresu. Tato měření byla prováděna každých 15 minut a sloužila především k vyhodnocení účinnosti výroby elektrické energie a stavu nabíjení baterie. Naměřené hodnoty byly uloženy v textovém formátu na SD kartu, což umožňovalo jejich snadné zpracování MS Excel.

Kromě energetických parametrů byl systém vybaven senzorem DHT22, který zajišťoval měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Tato měření probíhala s nižší frekvencí, konkrétně jednou za hodinu, protože se jedná o hodnoty s pomalejší dynamikou změn. Data z tohoto senzoru byla rovněž ukládána na SD kartu a následně porovnávána s daty z meteorologické stanice.

Dalším senzorem, který byl do systému integrován, byl analogový snímač vlhkosti půdy. Tento senzor měří elektrický odpor půdy, který koreluje s její aktuální vlhkostí. Při překročení definovaného prahového napětí odpovídajícího hodnotě vlhkosti nad 3500 se aktivuje první relé, které sepne čerpadlo. Čerpadlo je v provozu po dobu 15 sekund, čímž dojde k závlaze pěstební plochy. Tento mechanismus je však podmíněn i dalším měřením, a to aktuální hladinou vody v nádrži. Pokud je hladina vody nižší než 10 litrů, čerpadlo se nespíná a zároveň je vygenerováno varování, které je odesláno na server ThingsBoard. Tímto byla zajištěna ochrana čerpadla před provozem naprázdno a zároveň byl uživatel informován o potřebě doplnění zásobníku vody.

6.2.2 Měření hladiny vody v nádrži

Hladina vody v zásobní nádrži byla sledována pomocí ultrazvukového senzoru HC-SR04. Tento senzor měří vzdálenost hladiny od víka nádrže a výsledná hodnota byla přepočtena

na objem v litrech. Maximální objem nádrže je 50 litrů a přepočít byl založen na jednoduché lineární aproximaci podle výšky sloupce vody. Měření probíhalo jednou za hodinu a sloužilo nejen pro řízení čerpadla, ale i pro informování uživatele o dostupných zásobách vody.

6.2.3 Spínání zátěže při plném nabití baterie

Součástí systému byl i mechanismus pro využití přebytků energie. V případě, že baterie dosáhla napětí 12,65 V nebo vyššího, systém vyhodnotil, že je plně nabitá. V takovém případě byla pomocí druhého relé připojena odporová zátěž v podobě topného tělesa, která spotřebovávala přebytečnou energii. Tím bylo zajištěno, že FV modul stále generoval energii a bylo možné měřit reálnou výrobu během dne, bez ohledu na nabití baterie.

6.3 Instalace a provoz systému

Navržený agrofotovoltaický systém byl instalován na střeše budovy T12 v blízkosti reálném prostředí malé pěstební plochy s cílem ověřit jeho funkčnost a dlouhodobou spolehlivost při zajištění autonomního zavlažování. Systém byl navržen tak, aby nevyžadoval síťové napájení a mohl být provozován i v místech bez přístupu k elektrické infrastruktuře.

6.3.1 Umístění fotovoltaického panelu

Fotovoltaický modul o výkonu 30 W byl instalován v blízkosti již instalované FV elektrárny, orientované na jih-východ se sklonem přibližně 35°, což zajišťuje optimální podmínky pro jarní a letní provoz. Modul byl umístěn tak, aby na něj během dne nedopadal prakticky žádný stín. Umístění FV modulu jde vidět na Obrázku 6-3.

Panel slouží jako jediný zdroj elektrické energie pro celý systém. Výkon panelu byl dostačující pro napájení mikrokontroleru, elektroniky, senzoru i čerpadla a zároveň zajišťoval průběžné dobíjení baterie. Konstrukce již realizované elektrické elektrárny byla využita ke svodu dešťové vody.



Obrázek 6-3 Instalace systému

6.3.2 Umístění řídicí jednotky a senzorů

Řídicí jednotka společně se senzory byla instalována v blízkosti fotovoltaických panelů na kovové konstrukci umístěné na střeše budovy. Tato konstrukce zároveň slouží k fixaci FV modulu a poskytuje vhodný prostor pro vedení kabeláže i upevnění dalších prvků systému.

Samotná řídicí jednotka, byla uložena v bílé plastové elektroinstalační krabici s krytím IP65, byla upevněna na svislý profil nosné konstrukce pomocí stahovacích pásků. Tímto způsobem byla zajištěna ochrana elektronických komponent vůči povětrnostním vlivům a zároveň byl umožněn snadný přístup při údržbě nebo při aktualizaci systému.

Měření množství vody probíhá pomocí ultrazvukového senzoru umístěného nad sběrnou nádrží. Tento senzor je uložen ve vodotěsné krabici připevněné na okraji nádoby, do které stéká voda z plochy FV panelů. Pro měření půdní vlhkosti byl do pěstební nádoby se zasazenými rostlinami zaveden půdní senzor.

Celkové umístění jednotlivých komponent bylo zvoleno s ohledem na maximální funkčnost, dostupnost a ochranu systému, přičemž bylo dbáno na minimalizaci délky kabelových tras, čímž se snižují ztráty a zvyšuje spolehlivost provozu.

6.3.3 Umístění nádrže a čerpadla

Zásobník na vodu byla plastová nádrž o objemu přibližně 54 litrů, do které byla voda sváděna ze skloněné plochy FV panelu. To umožňovalo pasivní sběr dešťové vody, čímž byl systém relativně soběstačný, co se týče potřeby vody. Během měřeného období 23.3. až 9.5. byl relativně malý srážkový úhrn i tak za celé měřené období neklesla hladina vody pod 10 litrů. Problematickou částí roku může být léto, kdy teploty dosahují vysokých hodnot a nádrž nemusí být dostatečně velká pro pokrytí delšího období sucha. Použité čerpadlo v tomto systému je ponorné s nominálním napětím 12 V a výkonem 19 W. Maximální množství přečerpané vody za hodinu je 800 l/h.

Tabulka 5 Parametry čerpadla

Komponenta	U_n [V]	I_n [A]	P [W]
Ponorné čerpadlo	12	1,58	19

6.3.4 Provozní režim systému

Systém pracuje zcela autonomně a bez nutnosti zásahu uživatele. Jedinou pravidelnou údržbou bylo doplnění vody v nádrži v případě, že voda klesne pod 10 litrů a stáhnutí naměřených dat jednou za dva týdny z SD karty.

Během běžného provozu je veškerá naměřená data možné později analyzovat díky pravidelnému záznamu na SD kartu. V případě poklesu produkce FV panelu (např. při delší oblačnosti) systém omezuje činnost pouze na základní monitoring a čerpání jen v nezbytných případech.

6.4 Naměřená data a jejich vyhodnocení

Během několikátýdenního provozu systému byla pomocí mikrokontroléru Wemos D1 R32 průběžně zaznamenávána data ze senzorů a ukládána na SD kartu v textovém formátu. Interval měření byl stanoven na 15 minut, což poskytuje dostatečně podrobný přehled o změnách veličin v průběhu dne. Získaná data byla následně analyzována v prostředí MS Excel.

6.4.1 Porovnání reálně naměřených dat a simulace z nástroje PVGIS

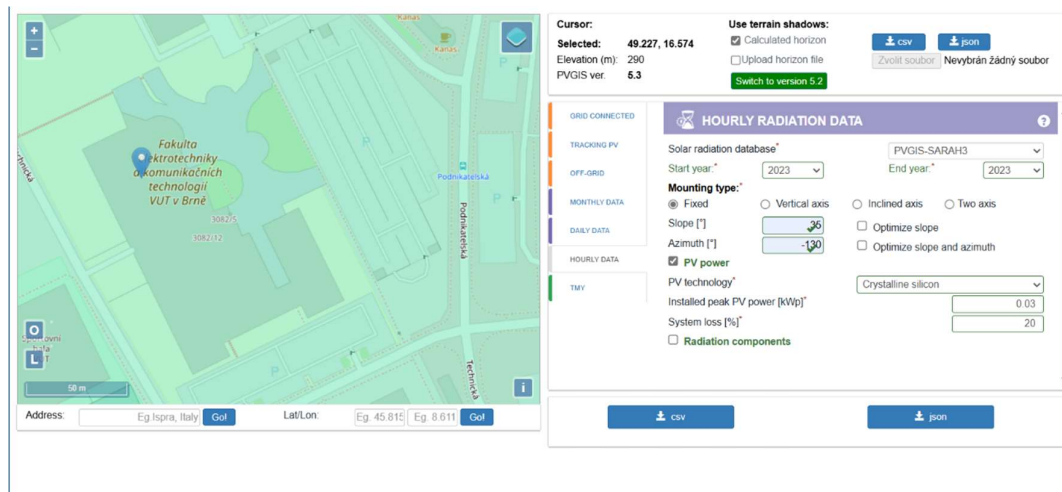
Pro objektivní vyhodnocení energetické výkonnosti fotovoltaického modulu byl proveden podrobný rozbor výroby elektrické energie, která byla jednak skutečně změřena na FV modulu a jednak simulována pomocí nástroje PVGIS. Cílem bylo ověřit, jak přesně odpovídají teoretické odhady reálným provozním podmínkám malého FV systému o výkonu 30 W, který byl po danou dobu monitorován.

Pro simulaci teoretické výroby byla využita webová aplikace PVGIS. Po zvolení konkrétní lokality (Brno, střecha budovy T12) byla nastavena následující parametrová konfigurace uvedená v Tabulce 6.

Tabulka 6 Parametry FV modulu PVGIS

FV technologie	krystalický křemík (Crystalline silicon)
Instalovaný špičkový výkon	0,03 kWp
Systémové ztráty	20 %
Sklon panelu	35°
Azimut panelu	-130° (orientace JV)
Způsob montáže	střešní integrace
Časové rozlišení výstupu	hodinové (Hourly time resolution)

Pro získání správného typu dat bylo nutné v záložce Hourly data zaškrtnout volbu PV power, což způsobí, že PVGIS vygeneruje simulovanou hodinovou výrobu elektrické energie ve sloupci P [W]. Data byla vygenerována pro rok 2023, protože simulace pro rok 2024 a 2025 nejsou zatím dostupná. Následně byl soubor vyexportován v CSV formátu.



Obrázek 6-4 Nastavení v PVGIS

Z obou zdrojů měření i simulace byly údaje vyneseny do denních energetických sum v jednotkách Wh/den. U reálných dat byla energie za den získána jako součet výkonů v jednotlivých 15minutových intervalech, přepočtených na Wh. Postup zpracování dat je uveden pro 10.5. veškerá naměřená data jsou uvedena v příloze A. Postup výpočtu byl prováděn následovně, proudový senzor INA219 zaznamenal hodnotu napětí a proudu ve stanovený čas,

$$U_{FV, \text{naměřené}} = 17,202 \text{ V}$$

$$I_{FV, \text{naměřené}} = 0,817 \text{ A}$$

následně byl z naměřených hodnot spočítán aktuální výkon FV modulu,

$$P_{15,\min} = U_{FV,\text{naměřené}} \cdot I_{FV,\text{naměřené}} \quad (2)$$

$$P_{15,\min} = 17,202 \cdot 0,817$$

$$P_{15,\min} = 14,05 \text{ W}$$

aktuální výkon byl převeden na energii ve watthodinách,

$$E_{15\min} = P_{15,\min} \cdot t_{\text{hodiny}} \quad (3)$$

$$E_{15\min} = 14,05 \cdot 0,25$$

$$E_{15\min} = 3,51 \text{ Wh}$$

následným součtem všech zaznamenaných hodinových hodnot energie byla vypočtena celková denní výroba systému,

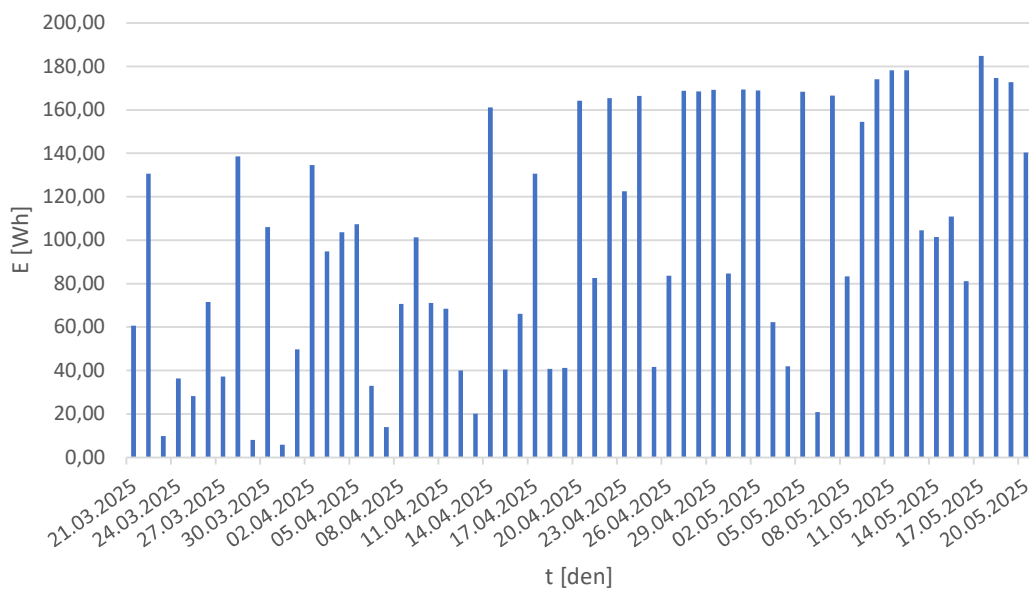
$$E_{\text{den}} = \sum (E_{15\min}) \quad (4)$$

$$E_{\text{den}} = E_{15\min,1} + E_{15\min,2} + \dots + E_n$$

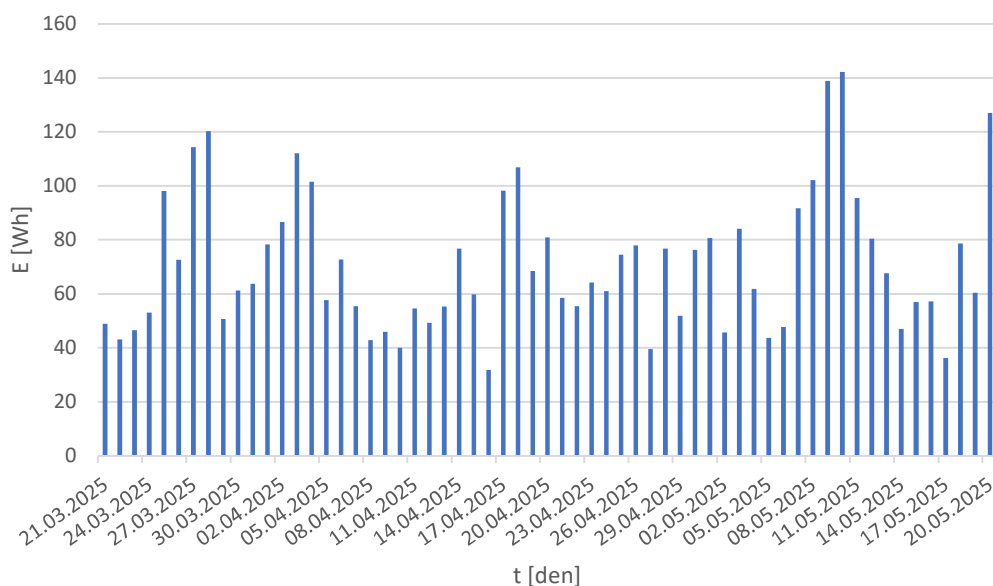
$$E_{\text{den}} = 0,179 + 0,358 + \dots + 1,234$$

$$E_{\text{den}} = 174,11 \text{ Wh/den}$$

U simulovaných dat z PVGIS šlo o součet hodinových výkonů, které přímo představují odhad produkce pro danou hodinu. Z grafu je možné pozorovat, že výroba během března a dubna relativně korelovala s teoretickou výrobou podle programu PVGIS. K větší rozdílu došlo až v polovině dubna, kdy samotný systém v některých dnech vyrobil až 160 Wh za den, což je oproti výpočtu z PVGIS dvojnásobná hodnota. Důvodem tak velkého rozdílu může být příliš velká hodnota ztrát, která byla zadána v PVGIS nebo duben a část května v roce 2023 měly málo slunečných dnů oproti roku 2025.



Obrázek 6-5 Naměřená data FV modulu



Obrázek 6-6 Data simulovaná z PVGIS

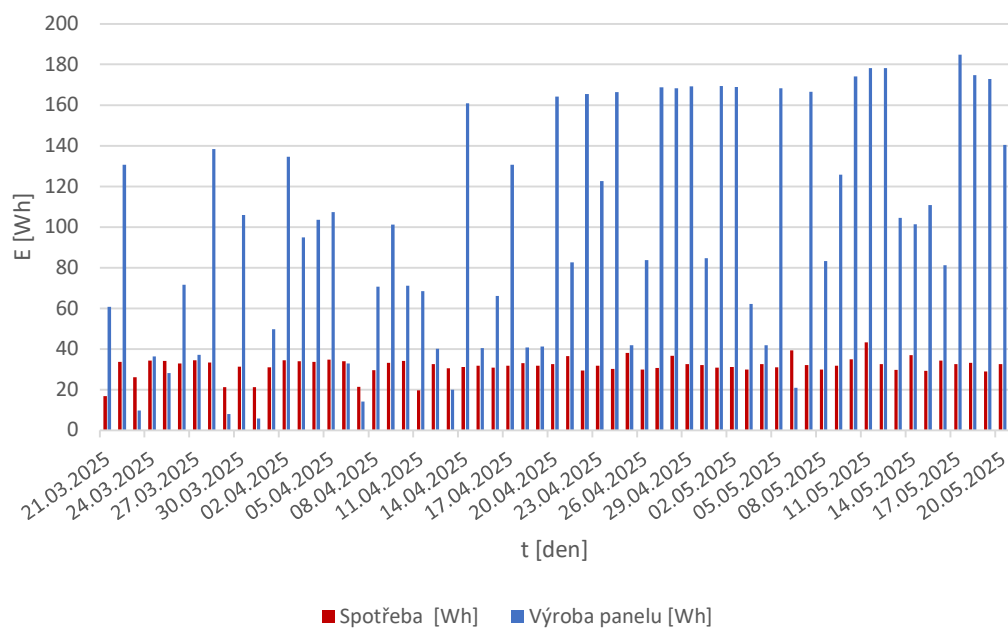
6.4.2 Srovnání výroby a spotřeby systému

V této části byla provedena analýza energetické bilance systému, tedy porovnání vyrobené energie z fotovoltaického panelu a spotřeby celého systému v daném období. Jak je patrné z grafu na Obrázku 6-7, ve většině dnů sledovaného období byla výroba z FV panelu vyšší než spotřeba systému, což umožňovalo zároveň pokrývat okamžité nároky i průběžně dobíjet připojený akumulátor.

Modré sloupce reprezentují denní výrobu elektrické energie, zatímco červené sloupce znázorňují denní spotřebu systému. Nejvyšší hodnoty výroby byly zaznamenány v období od 25. dubna do 5. května, kdy dosahovala denní produkce hodnot mezi 140–60 Wh. Tato hodnota odpovídá přibližně 5 až 6 hodinám intenzivního osvětlení FV modulu. V těchto dnech byl systém plně soběstačný a zároveň bylo možné ukládat přebytečnou energii do baterie pro pozdější využití.

Naopak během dnů se zhoršenými povětrnostními podmínkami (např. 16. a 24. dubna) výroba výrazně poklesla, v některých případech i pod úroveň denní spotřeby. V případě že, FV modul nedosahoval dostatečné výroby pro pokrytí denní spotřeby systému upravil využití energie a snížil spotřebu za pomoci režimu deep sleep, což je možné pozorovat na Obrázek 6-7 a to přesněji ve dnech 23.3, 29.3. a 7.4.

Data z FV modulu ukazují, že za slunečných dnů byl výkon panelu dostatečný k pokrytí spotřeby systému a zároveň k dobíjení baterie a systém je za měřené období soběstačný i v případě horších meteorologických podmínek. Zvláštností byl den 6.5., kdy systém neměl dostatečné pokrytí energie ale i přes příkaz zastavení čerpadla v případě nedostatku energie stále pokračoval v zavlažování a tím byla naměřená spotřeba energie dvojnásobná oproti vyrobené.



Obrázek 6-7 Srovnání spotřeby a výroby systému

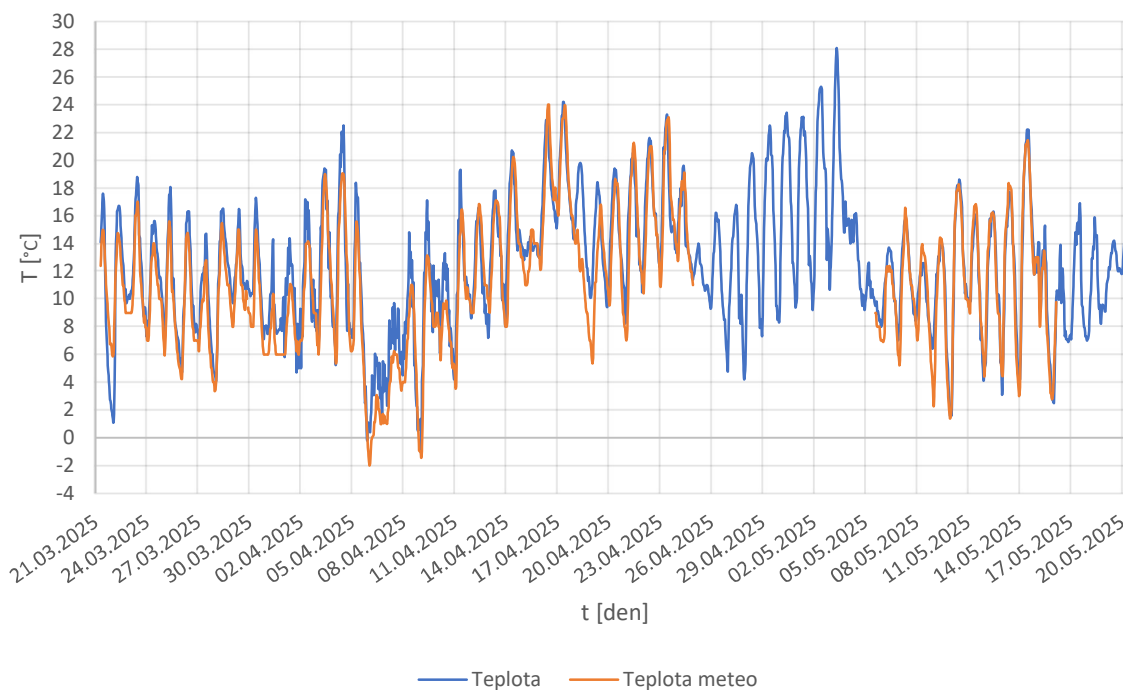
FV modul za období od 21.3. až 20.5. vyrobil celkově 6048 Wh, což průměrně činí 102,5 Wh/den. Spotřeba systému za zmíněné období činila 1928 Wh, což přepočítáno na denní spotřebu činí 32,7 Wh/den a přebytečná energie vytvořená FV modulem byla 4120 Wh. Zprůměrováním přebytečné energie vychází 69,8 Wh/den.

6.5 Vyhodnocení meteorologických dat

Pro komplexní posouzení provozu agrofotovoltaického systému byla během sledovaného období analyzována také meteorologická data, konkrétně údaje o teplotě, relativní vlhkosti vzduchu a srážkových úhrnech. Tyto veličiny měly přímý vliv jak na výkon fotovoltaických panelů, tak na provozní podmínky sledovaného systému. Zejména na část se zavlažováním.

Teplota vzduchu byla sledována v hodinovém kroku v období od 11. dubna do 9. května 2025. Během tohoto období se teploty pohybovaly převážně mezi 5 až 25 °C, přičemž nejchladnější dny byly zaznamenány v polovině dubna, zatímco nejteplejší období připadalo na přelom dubna a května. Teplotní výkyvy mohly ovlivňovat účinnost FV modulu, jelikož jejich výkon mírně klesá při vyšších teplotách, avšak v tomto případě byly rozdíly zanedbatelné.

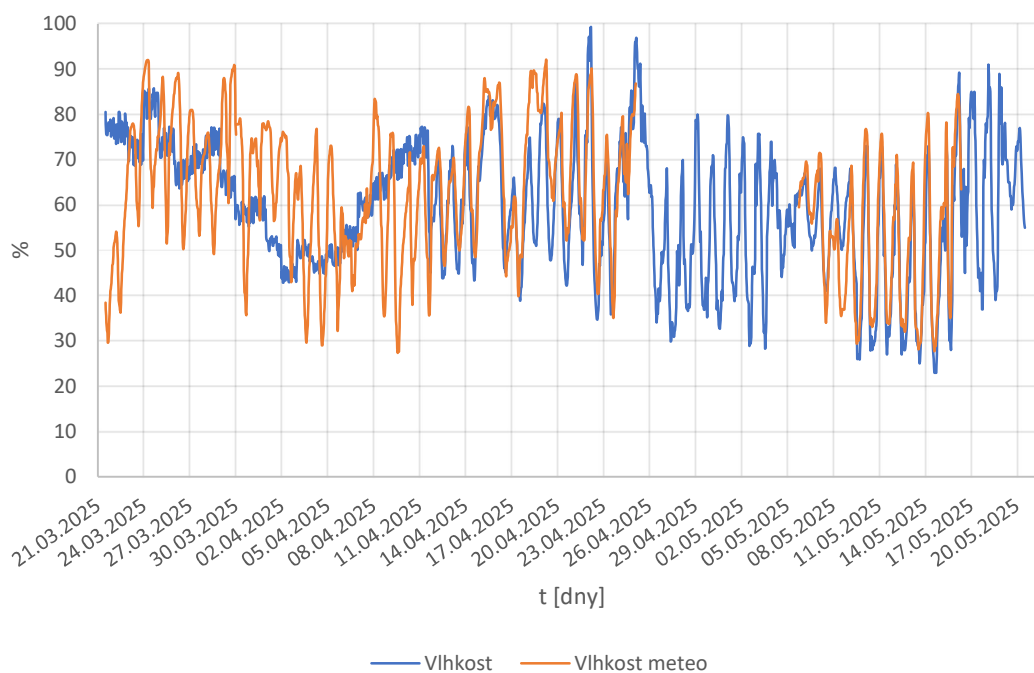
Srážkové úhrny byly důležitým ukazatelem pro sledování množství vody v nádrži a efektivity zavlažování. Srážky se vyskytly pouze v několika dnech během sledovaného období, konkrétně 15., 18., 21., 24. a 25. dubna. Celkový srážkový úhrn činil přibližně 10,9 mm, což odpovídá přítoku přibližně 53,6 litrů vody při ploše sběru 4,63 m². Tato dešťová voda byla následně zachycena v nádrži a využita k zavlažování rostlin.



Obrázek 6-8 Naměřené hodnoty teploty

Z dat vyplývá, že kombinace reálných meteorologických podmínek s akumulační schopností systému umožnila zajištění dostatečných podmínek pro růst vegetace a zároveň efektivní provoz celého systému bez potřeby externího zásobování vodou či energií. Analýza počasí tak potvrdila vhodnost zvoleného řešení i pro období s proměnlivými klimatickými podmínkami.

Získané hodnoty byly srovnány s hodnotami naměřenými z meteorologické stanice na střeše budovy T12, porovnávání teploty je možné pozorovat na Obrázku 6-8. Hodnoty mezi sebou relativně korespondují, což ukazuje správnou kalibraci systému. Bohužel některé dny došlo k výpadku meteorologické stanice, takže nebylo možné srovnat celé měřené období. Z výše zmíněného grafu lze pozorovat, že výpadek se projevil od 25.4 až 5.5.



Obrázek 6-9 Naměřená relativní vlhkost vzduchu

Z Obrázku 6-9 je možné pozorovat, že od spuštění měření měla data nízké rozptylové hodnoty z důvodu podezření na chybné sbírání dat byl senzor DHT22 vyměněn dne 11.4. za nový. Po výměně senzoru došlo ke zlepšení měřených hodnot, od období 11.4. do 9.5. Porovnávaná data z meteorologické stanice zase nelze vidět v období od 25.4 až 5.5.

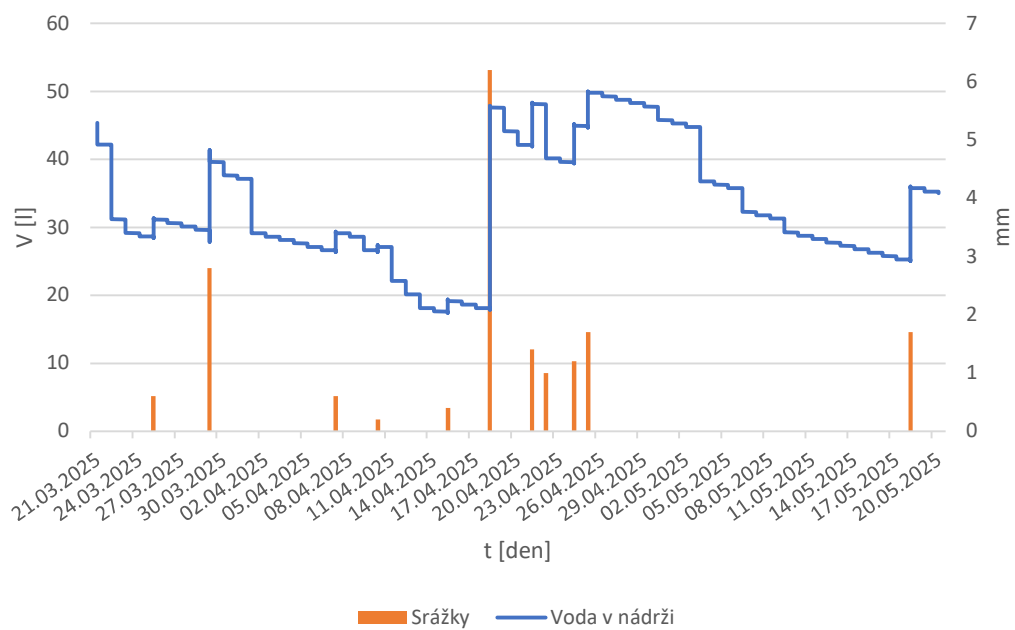
Na grafu je znázorněn objem vody v nádrži (levá osa, modrá křivka) v závislosti na čase, a zároveň srážkové úhrny (pravá osa, oranžové sloupce) zaznamenané během sledovaného období od 21. března do 20. května 2025 z meteorologické stanice.

Modrá čára ukazuje kolísání množství vody v nádrži v závislosti na srážkách a spotřebě vody na zavlažování. Je patrné, že po každé výraznější srážkové události došlo navýšení objemu vody v nádrži, což potvrzuje funkčnost systému sběru dešťové vody z plochy fotovoltaických panelů. Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán po deštivém dni 19. dubna, kdy bylo naměřeno více než 6 mm srážek.

Mezi dešťovými srážkami docházelo k postupnému poklesu hladiny vody, vlivem odpařování vody z nádrže. Tento trend je zvláště patrný v období s nižšími srážkami (např. mezi 29. 4. až 17.5.), kdy množství vody v nádrži klesalo téměř lineárně.

Na konci sledovaného období (okolo 20. 5.) dochází k mírnému zvýšení hladiny v důsledku srážek, přesto ale hladina zůstává nižší než na začátku období. Tento vývoj ukazuje, že kapacita nádrže a objem zachycené vody byly dostatečné pro pokrytí potřeb systému v jarních měsících, avšak v letních měsících by mohlo dojít k jejímu vyčerpání

bez dalšího doplňování. Graf tak poskytuje přehled o bilanci vody v systému a potvrzuje, že její provoz odpovídá předpokladům navrženého modelu.



Obrázek 6-10 Množství vody v nádrži

7. PĚSTOVANÉ PLODINY

Pro samotný projekt byly vybrány rostliny jednoduché pro pěstování v zastíněném prostředí. Pro představu vhodných plodin je možné se podívat do Tabulky 1, kde jsou vypsané jednotlivé plodiny podle vhodnosti k použití s agrofotovoltaickým systémem. Tabulka rozděluje plodiny podle míry vhodnosti, která byla stanovena na základě odborných studií a praktických pokusů realizovaných v různých klimatických podmínkách.

Zastínění může ovlivnit intenzitu slunečního záření dopadajícího na rostliny, což se promítá do fotosyntézy, a tím i do celkového výnosu. Některé druhy rostlin však na tyto podmínky reagují pozitivně, například omezením stresu z přímého slunce nebo zpomalením ztrát vody vlivem odpařování.

Z provedeného průzkumu byly zvoleny dvě plodiny pro malý agrofotovoltaický systém, a to listový salát a špenát setý. Tyto rostliny vykazují stabilní růst i při snížené intenzitě světla a mají krátkou vegetační dobu, což bylo optimální pro pozorování v krátkém časovém úseku.

Kontrola plodin probíhala jednou za dva týdny a to od 23.3 do 20.5. Průběh růstu je na Obrázku 7-1. Ze začátku experimentu byl růst pomalejší vlivem horšího počasí kdy teploty občas klesly k bodu mrazu. Kontrolou systému a zadržováním vody v nádrži pro pozdější zavlažování však bylo dosaženo optimálních podmínek pro růst plodin.

Plodiny byly rozděleny do dvou skupin A a B, kde skupina A byla vystavena přímému slunečnímu záření naopak skupina B byla pod FV moduly. U obou skupin nebyl problém s růstem, pouze ke konci měřeného období vlivem vyšších teplot došlo u skupiny A k zežloutnutí listů a u skupiny B byla velikost rostlin zhruba o 15 % větší, což mohlo být způsobeno právě zastíněním FV moduly.



Skupina A, 24.4.

Skupina A, 6.4.

Skupina A, 14.4.



Skupina B, 24.4.

Skupina B, 6.4.

Skupina B, 14.4.



Skupina A, 25.4.

Skupina A, 9.5.

Skupina A, 20.5.



Skupina B, 25.4.

Skupina B, 9.5.

Skupina B, 20.5.

Obrázek 7-1 Růst plodin za celé měřené období

8. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nejen teoreticky představit princip agrofotovoltaiky jako moderního přístupu ke kombinovanému využití zemědělské půdy pro pěstování plodin a výrobu elektrické energie, ale také navrhnout a realizovat funkční model maloplošného autonomního agrofotovoltaického systému. Tento praktický přístup umožnil ověřit provozní parametry, identifikovat silné i slabé stránky systému a porovnat reálně naměřené hodnoty s teoretickými simulacemi.

Z teoretické části vyplynulo, že agrofotovoltaika nabízí značný potenciál pro udržitelnou transformaci zemědělství. Podrobně byly popsány technické možnosti instalace (horizontální, vertikální, skleníkové a hydroponické systémy), výběr vhodných plodin a zkušenosti ze zahraničí. Analýza ukázala, že při vhodném návrhu a kombinaci plodin může být zemědělský výnos zachován nebo dokonce zvýšen, zatímco současně dochází k výrobě elektřiny. Předložené příklady z Německa, Japonska a Číny ukazují, že agrofotovoltaika je technicky i ekonomicky realizovatelná, přičemž její přínosy jsou výrazné zejména v regionech ohrožených suchem nebo tlakem na využití půdy.

V praktické části byl sestaven a testován autonomní systém využívající fotovoltaický panel o výkonu 30 W pro napájení mikrokontroleru, senzorů a čerpadla. Systém monitoroval teplotu, vlhkost vzduchu, úroveň vody a elektrické veličiny. Na základě hodnot půdní vlhkosti systém automaticky spínal zavlažování. Při poklesu zásob vody pod stanovený limit systém generoval varování, čímž zajišťoval ochranu čerpadla i plodin.

Během měřeného období bylo potvrzeno, že systém je schopen samostatného provozu bez připojení k síti. Fotovoltaický modul za období od 21.3. až 20.5. vyrobil celkově 6048 Wh, což průměrně činí 102,5 Wh/den. Spotřeba systému za zmíněné období činila 1928 Wh, což přepočítáno na denní spotřebu činí 32,7 Wh/den a přebytečná energie vytvořená FV modulem byla 4120 Wh. Zprůměrováním přebytečné energie vychází 69,8 Wh/den. Měřením bylo zjištěno, že systém vyrábí více energie, než je schopný spotřebovat, tuto skutečnost lze do budoucna využít k rozšíření buď pěstební plochy nebo vylepšení zavlažovacího systému. Měřené veličiny byly srovnány se simulací v programu PVGIS, získané hodnoty se příliš neshodovaly, což může být způsobeno tím, že vstupní data pro simulaci v PVGIS byla z roku 2023. Energetická soběstačnost systému byla dostatečná pro napájení sensoriky a provoz čerpadla i za méně příznivých světelných podmínek. Z hlediska hospodaření s vodou byla díky ploše 4,69 m² sběru dešťové vody a nádrži o objemu 50 litrů zajištěna dostatečná rezerva i při nižším úhrnu srážek. Zavlažovací režim odpovídal požadavkům zvolených plodin a nedošlo k vysychání půdy.

Z provozního hlediska se ukázal jako problematický pouze nedostatečný proudový výkon mikrokontroleru při spínání relé, což bylo úspěšně vyřešeno implementací tranzistoru BC337. Získané hodnoty byly uloženy na SD kartu.

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že navržený systém je schopen efektivního využití solární energie pro zavlažování a monitoring pěstebních podmínek. V podmínkách maloplošné zemědělské produkce nebo městských zahrad by mohl představovat reálně využitelný model energeticky soběstačného systému. Zároveň byl potvrzen potenciál sběru meteorologických a provozních dat pro dlouhodobé sledování vlivu fotovoltaiky na růst rostlin. Zajímavým konceptem, který byl v této práci zmíněn jsou hydroponické věže s využitím FV modulů, tímto směrem by se mohla ubírat navazující práce.

LITERATURA

- [1] Elektroenergetika v ČR v roce 2024. Online. *OEnergetice.cz*. S. 5-6. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/public/static/pdf/elektroenergetika-v-cr-v-roce-2024.pdf>. [cit. 2025-05-04].
- [2] GOETZBERGER, A. a ZASTROW, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. Online. *International Journal of Solar Energy*. 2007, roč. 1, č. 1, s. 55-69. ISSN 0142-5919. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>. [cit. 2025-03-16].
- [3] DINESH, Harshavardhan a PEARCE, Joshua M. The potential of agrivoltaic systems. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, roč. 54, s. 299-308. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>. [cit. 2025-03-16].
- [4] AGOSTINI, A.; COLAUZZI, M. a AMADUCCI, S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. Online. *Applied Energy*. 2021, roč. 281. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>. [cit. 2025-03-16].
- [5] ARENA, Roberta; ANELI, Stefano; GAGLIANO, Antonio a TINA, Giuseppe Marco. Optimal Photovoltaic Array Layout of Agrivoltaic Systems Based on Vertical Bifacial Photovoltaic Modules. Online. *Solar RRL*. 2024, roč. 8, č. 1. ISSN 2367-198X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/solr.202300505>. [cit. 2025-03-16].
- [6] CAMPANA, Pietro Elia; STRIDH, Bengt; AMADUCCI, Stefano a COLAUZZI, Michele. Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2021, roč. 325. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>. [cit. 2025-05-02].
- [7] CHUDINZOW, Dimitrij; NAGEL, Sylvio; GÜSEWELL, Joshua a ELTROP, Ludger. *Vertical bifacial photovoltaics – A complementary technology for the European electricity supply?* Online. 2020, roč. 2020. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114782>. [cit. 2024-01-15].
- [8] *Vertical Agri-PV: Maximum degrees of freedom for agriculture*. Online. Next2Sun. 2024. Dostupné z: <https://next2sun.com/en/agripv/>. [cit. 2025-05-03].

- [9] WESELEK, Axel; EHMANN, Andrea; ZIKELI, Sabine; LEWANDOWSKI, Iris; SCHINDELE, Stephan et al. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. Online. *Agronomy for Sustainable Development*. 2019, roč. 39, č. 4. ISSN 1774-0746. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>. [cit. 2025-05-16].
- [10] GHOSH, Aritra. Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review. Online. *Solar Energy*. 2023, roč. 266. ISSN 0038092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112146>. [cit. 2025-05-02].
- [11] TROMMSDORFF, Max; GRUBER, Simon a KEINATH, Tobias. FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. Online. S. 32-35. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publication/studies/APV-Guideline.pdf>. [cit. 2025-05-03].
- [12] *In Freiburg-Munzingen steht Deutschlands erste Photovoltaikanlage über Reben*. Online. *BadischeZeitung*. 2023. Dostupné z: <https://www.badische-zeitung.de/oben-strom-unten-wein-in-freiburg-munzingen-steht-deutschlands-erste-photovoltaikanlage-ueber-reben>. [cit. 2025-05-03].
- [13] *Paneles solares y cultivos, una dupla que aumentaría la producción agrícola*. Online. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2021. Dostupné z: <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/paneles-solares-y-cultivos-una-dupla-que-aumentaria-la-produccion-agricola>. [cit. 2025-05-02].
- [14] HASSANIEN, Reda Hassanien Emam; LI, Ming a YIN, Fang. The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production. Online. *Renewable Energy*. 2018, roč. 121, s. 377-388. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.044>. [cit. 2025-05-03].
- [15] CASTELLETTO, Stefania a BORETTI, Alberto. Luminescence solar concentrators: A technology update. Online. Roč. 2023, s. 109. ISSN 2211-2855. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108269>. [cit. 2025-04-30].
- [16] DEBIJE, Michael G.; EVANS, Rachel C. a GRIFFINI, Gianmarco. Laboratory protocols for measuring and reporting the performance of luminescent solar concentrators. Online. *Energy & Environmental*

- Science*. 2021, roč. 14, č. 1, s. 293-301. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D0EE02967J>. [cit. 2025-05-02].
- [17] ZAINALI, Sebastian; MA LU, Silvia; STRIDH, Bengt; AVELIN, Anders; AMADUCCI, Stefano et al. Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts. Online. *Applied Energy*. 2023, roč. 339. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120981>. [cit. 2025-05-26].
- [18] BRUNO, Maddalena; GFÜLLNER, Leonhard J. a BERWIND, Matthew F. Enhancing agrivoltaic synergies through optimized tracking strategies. Online. *Journal of Photonics for Energy*. 2025, roč. 15, č. 03. ISSN 1947-7988. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/1.JPE.15.032703>. [cit. 2025-05-03].
- [19] ŽÁK, Martin. *Solární koncentrátorový systém s automatickým natáčením*. Online, Diplomová práce, vedoucí Petr Baxant. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky, 2017. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/65609>. [cit. 2025-05-03].
- [20] ZAINOL ABIDIN, Mohd Ashraf; MAHYUDDIN, Muhammad Nasiruddin a MOHD ZAINURI, Muhammad Ammirul Atiqi. Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review. Online. *Sustainability*. 2021, roč. 13, č. 14. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su13147846>. [cit. 2025-05-03].
- [21] MAMUN, Mohammad Abdullah Al; DARGUSCH, Paul; WADLEY, David; ZULKARNAIN, Noor Azwa a AZIZ, Ammar Abdul. A review of research on agrivoltaic systems. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, roč. 161. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>. [cit. 2025-05-10].
- [22] OTHMAN, Noor Fadzlinna; YAACOB, Mohammad Effendy; MAT SU, Ahmad Suhaizi; JAAFAR, Juju Nakasha; HIZAM, Hashim et al. Modeling of Stochastic Temperature and Heat Stress Directly Underneath Agrivoltaic Conditions with Orthosiphon Stamineus Crop Cultivation. Online. *Agronomy*. 2020, roč. 10, č. 10. ISSN 2073-4395. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101472>. [cit. 2025-05-26].
- [23] RANDLE-BOGGIS, R.J.; BARRON-GAFFORD, G.A.; KIMARO, A.A.; LAMANNA, C.; MACHARIA, C. et al. Harvesting the sun twice: Energy, food and water benefits from agrivoltaics in East Africa. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025, roč. 208. ISSN

13640321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115066>. [cit. 2025-05-02].
- [24] BARRON-GAFFORD, Greg; MINOR, Rebecca; ALLEN, Nathan; CRONIN, Alex a BROOKS, Adria. *The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures*. Online. Scientific reports, 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep35070>. [cit. 2024-01-18].
- [25] FTHENAKIS, V.M. a KIM, H.C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. Online. *Solar Energy*. 2011, roč. 85, č. 8, s. 1609-1628. ISSN 0038092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>. [cit. 2025-05-10].
- [26] MARROU, H.; GUILIONI, L.; DUFOUR, L.; DUPRAZ, C. a WERY, J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? Online. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013, roč. 177, s. 117-132. ISSN 01681923. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>. [cit. 2025-05-16].
- [27] TAJIMA, Makoto a IIDA, Tetsunari. Evolution of agrivoltaic farms in Japan. Online. In: . 2021, 030002-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0054674>. [cit. 2025-05-14].
- [28] SOLAREEDGE TECHNOLOGIES INC. *Agri-PV Case Study: Fig Farms in Chiba, Japan*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.solareedge.com/en/utility-scale/case-studies/japanese-agri-pv-fig-farms>. [cit. 2025-05-10].
- [29] STEPHEN, Dubner. *Agrivoltaic farming: solar sharing is growing more popular in Japan*. Online. In: . 2022. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/agrivoltaic-farming-solar-sharing-growing-more-popular-in-japan-2022-12>. [cit. 2025-05-10].
- [30] FRAUNHOFER ISE. *APV-RESOLA – Agrivoltaics: Synergy between photovoltaics and agriculture.Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-resola.html>. [cit. 2025-05-10].
- [31] SUNFARMING GMBH. *SUNfarming Climate Park Steinhöfel – Agri-PV systems for sustainable food and energy. SUNfarming*. Online. 2023. Dostupné z: <https://sunfarming.de/en/home-2>. [cit. 2025-05-10].
- [32] Agri-PV installation Donaueschingen-Aasen: Vertical bifacial solar modules for dual land use. Next2Sun. Online. Dostupné z: <https://next2sun.com/en/start-of-construction-of-an-innovated-agro->

- [photovoltaic-open-space-plant-in-donaueschingen-aasen-germany/](#). [cit. 2025-05-10].
- [33] RENEW ECONOMY. *Solar giant inaugurates landmark agrivoltaic project combining modules with a yam crop in Japan*. Online. 2023. Dostupné z: <https://reneweconomy.com.au/solar-giant-inaugurates-landmark-agrivoltaic-project-combining-modules-with-a-yam-crop-in-japan/>. [cit. 2025-05-10].
- [34] PV MAGAZINE. *Idemitsu Kosan invests in agrivoltaics*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2025/01/30/idemitsu-kosan-invests-in-agrivoltaics/>. [cit. 2025-05-10].
- [35] PV MAGAZINE. *Giant agrivoltaic project in China*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/>. [cit. 2025-05-10].
- [36] HUAWEI. *Smart Agrivoltaic Power Plant in Ningxia: Turning a Desert into an Oasis*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.huawei.com/en/sustainability/the-latest/stories/smart-agrivoltaic-power-plant-in-ningxia-en>. [cit. 2025-05-26].
- [37] JACK'S SOLAR GARDEN. *Jack's Solar Garden – Colorado's Premier Agrivoltaics Research Site*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.jackssolargarden.com/>. [cit. 2025-05-10].
- [38] Česko: Zákon č. 334/1992 Sb., o ochraně zemědělského půdního fondu. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 1992, částka 64.
- [39] BÍM, Jiří. *Agrofotovoltaika – studie proveditelnosti: Využití FVE systémů v zemědělské krajině pro udržení vody v krajině*. Online, Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2020. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/88044>. [cit. 2025-05-26].
- [40] *Souhrnné přehledy o půdním fondu z údajů katastru nemovitostí České republiky*. 2024, roč. 2023, č. 1. 2024. ISSN ISSN 1804-2422.
- [41] TAJIMA, Makoto a IIDA, Tetsunari. Evolution of agrivoltaic farms in Japan. Online. In: . 2021, 030002-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0054674>. [cit. 2025-05-16].
- [42] STEADMAN, Casey L. a HIGGINS, Chad W. Agrivoltaic systems have the potential to meet energy demands of electric vehicles in rural Oregon, US. Online. *Scientific Reports*. 2022, roč. 12, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08673-4>. [cit. 2025-05-25].

- [43] OTANI, Takuya; ITOH, Akira; MIZUKAMI, Hideki; MURAKAMI, Masatsugu; YOSHIDA, Shunya et al. Agricultural Robot under Solar Panels for Sowing, Pruning, and Harvesting in a Synecoculture Environment. Online. *Agriculture*. 2023, roč. 13, č. 1. ISSN 2077-0472. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010018>. [cit. 2025-05-14].
- [44] AGROTEC ZEMĚDĚLSKÁ TECHNIKA. *BAKUS*. Online. Dostupné z: <https://www.eagrotec.cz/products/specialni-technika/vitibot/vitibot-bakus>. [cit. 2025-05-14].
- [45] BAZARGANI, Khadijeh a DEEMYAD, Taher. Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects. Online. *Robotics*. 2024, roč. 13, č. 2. ISSN 2218-6581. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/robotics13020033>. [cit. 2025-05-14].
- [46] THE UNIVERSITY OF SYDNEY. *Agricultural Robotics*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.sydney.edu.au/engineering/our-research/robotics-and-intelligent-systems/australian-centre-for-robotics/agriculture-and-the-environment/agricultural-robotics.html>. [cit. 2025-05-14].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
AGV	Agrofotovoltaika
BF	Bifaciální moduly
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
FV	Fotovoltaika
FVE	Fotovoltaická elektrárna
ha	Jednotka plochy
EUR	Euro
RSR	Snížení slunečního záření
USA	Spojené státy americké
ZPF	Zemědělský půdní fond

Značka	Jednotka	Název veličiny
I	A	Proud
U	V	Napětí
P	W	Výkon
t	s	Čas
d	m	Délka
E	Wh	Množství vyrobené elektřiny

SEZNAM PŘÍLOH

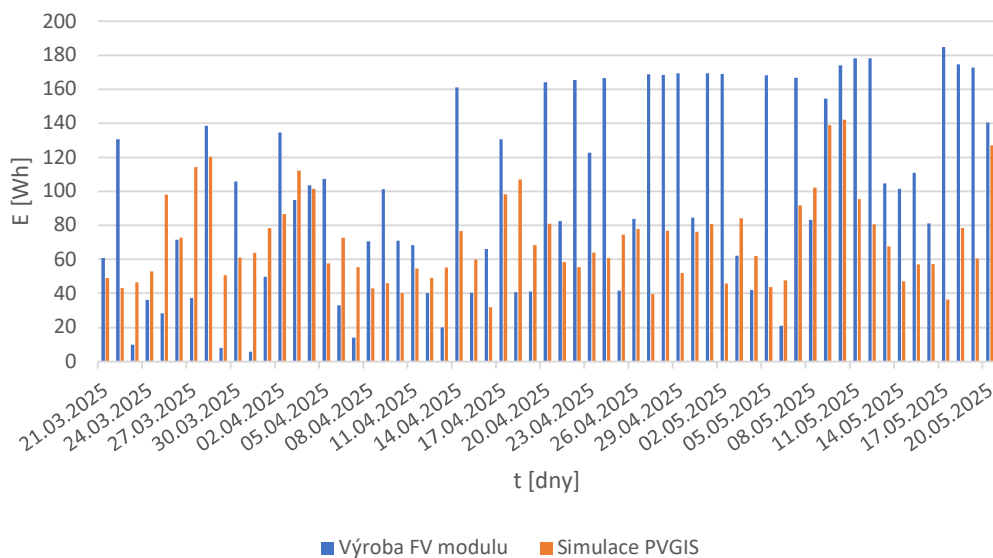
PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY JSOU ULOŽENY NA CD.....	57
PŘÍLOHA B - SCHÉMA ZAPOJENÍ	58
PŘÍLOHA C - ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU JE ULOŽEN NA PŘILOŽENÉM CD	59

Příloha A - Naměřené hodnoty jsou uloženy na CD

A.1 Část tabulky naměřených dat z FV

Čas	U (V)	I (A)	P (W)	E (Wh)
21.03.2025 12:00	14,69	1,26	18,56	4,64
21.03.2025 12:15	14,68	1,32	19,40	4,85
21.03.2025 12:30	14,65	1,29	18,92	4,73
21.03.2025 12:45	14,61	1,24	18,15	4,54
21.03.2025 13:00	14,56	1,04	15,19	3,80
21.03.2025 13:15	14,50	1,03	14,93	3,73

A.2 Graf výroby FV modulu

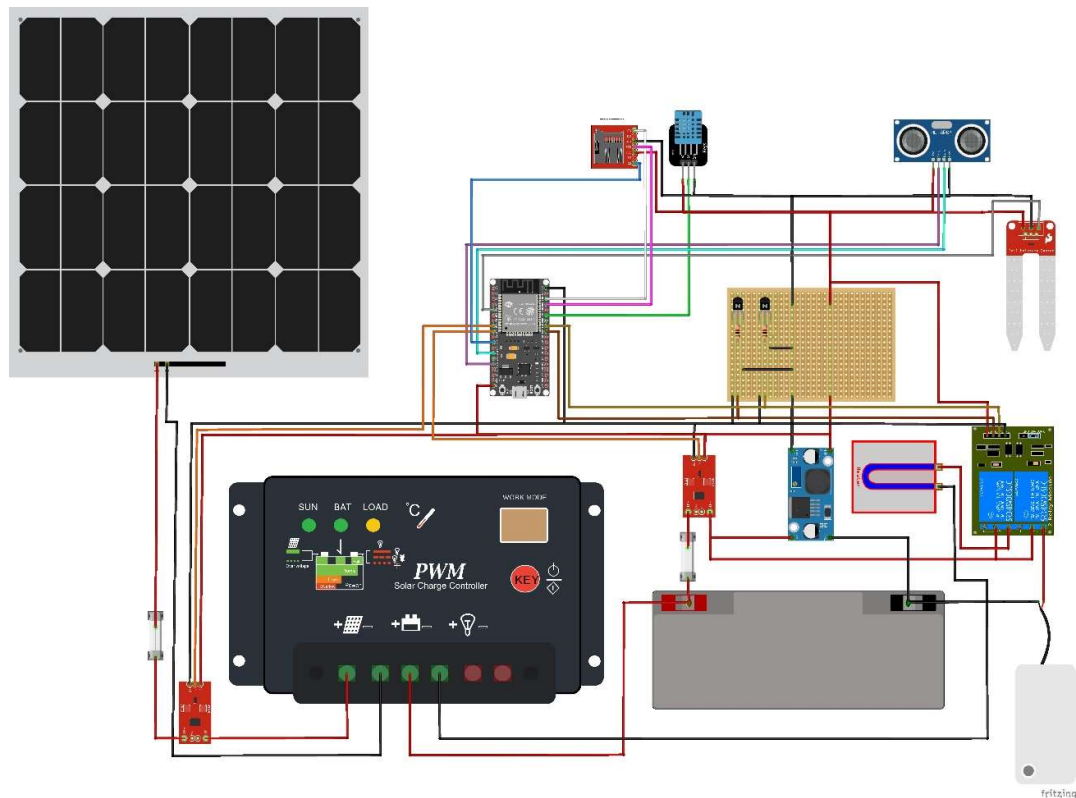


A.3 Část tabulky naměřených dat spotřeby

Čas	U (V)	I (A)	P (W)	E (Wh)
21.03.2025 12:00	12,62	0,161	2,04	0,509
21.03.2025 12:15	12,65	0,108	1,36	0,341
21.03.2025 12:30	12,67	0,123	1,55	0,388
21.03.2025 12:45	12,67	0,140	1,77	0,442
21.03.2025 13:00	12,67	0,154	1,95	0,487
21.03.2025 13:15	12,67	0,106	1,35	0,337

Příloha B - Schéma zapojení

B.1 Schéma zapojení systému



Příloha C - Zdrojový kód programu je uložen na přiloženém CD

C.1 Zdrojový kód

```
//definované knihovny

#include <WiFi.h>

#include <PubSubClient.h>

#include "DHT.h"

#include <SD.h>

#include <SPI.h>

#include <NewPing.h>

#include <Adafruit_INA219.h>

#include <Wire.h>

// přístup k wifi

const char* ssid = "*****"; // jméno WiFi z důvodu bezpečnosti neuvedeno

const char* password = "*****"; // heslo WiFi z důvodu bezpečnosti neuvedeno

// ThingsBoard MQTT spojení

const char* mqttServer = "eu.thingsboard.cloud"; //ThingsBoard server

const int mqttPort = ****; //přístup ThingsBoard

const char* accessToken = "*****"; // ThingsBoard přístupový token z důvodu bezpečnosti neuvedeno

//definování napěťového a proudového senzoru
```