



Zadání diplomové práce

Název:	IoT monitoring agrivoltaického systému pro vinohrady
Student:	Bc. Martin Němec
Vedoucí:	Ing. Martin Daňhel, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Počítačové systémy a sítě
Katedra:	Katedra počítačových systémů
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2023/2024

Pokyny pro vypracování

Pro vinohrad s agrivoltaickým systémem navrhnete IoT řešení, dle následujících kroků:

1. Prozkoumejte současné agrivoltaické systémy.
2. Seznamte se s IoT technologiemi realizované na rozsáhlých venkovních prostranstvích.
3. Analyzujte možnosti monitoringu a důležité metriky vinohradu.
4. Navrhnete a realizujete vlastní řešení IoT sítě pro monitoring vinohradu s agrivoltaickým systémem.
5. Vytvořte webové rozhraní pro možné sledování dat, obrazu a statistik monitorovaného vinohradu.
6. Navržený systém otestujte v reálných/simulovaných podmínkách.

Diplomová práce

IOT MONITORING AGRIVOLTAICKÉHO SYSTÉMU PRO VINOHRADY

Bc. Martin Němec

Fakulta informačních technologií
Katedra počítačových systémů
Vedoucí: Ing. Martin Daňhel, Ph.D.
4. května 2023

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2023 Bc. Martin Němec. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci: Němec Martin. *IoT monitoring agrivoltaického systému pro vinohrady*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2023.

Obsah

Poděkování	xi
Prohlášení	xii
Abstrakt	xiii
Úvod	1
Cíle práce	3
1 Agrivoltaické systémy	5
1.1 Co je to agrivoltaický systém	5
1.2 Historie	6
1.3 Typy konstrukcí	7
1.3.1 Střecha	8
1.3.2 Polohovatelná konstrukce	8
1.3.3 Vertikální konstrukce	8
1.3.4 Polopropustná konstrukce	9
1.3.5 Mřížková konstrukce	9
1.4 Benefity nasazení systému	10
1.4.1 Sluneční záření	10
1.4.2 Dvojití využití půdy	11
1.4.3 Hospodaření s vodou	12
1.4.4 Bezpečnější podmínky pro růst a stabilnější prostředí	13
1.4.5 Dvojití výdělek	14
1.5 Situace v ČR	16
1.6 Analýza prostředí agrivoltaického systému na vinohradu	17
1.6.1 Důležité metriky pro vinohrad	17
1.6.2 Důležité metriky pro solární panely	19
2 IoT v zemědělství	21
2.1 Technologie	21
2.1.1 Drátové vs Bezdrátové zapojení	21
2.1.2 Technologie bezdrátové komunikace	22
2.1.3 Výběr vhodné technologie	25
2.1.4 Protokoly pro posílání zpráv	26
2.2 Problémy nasazení IoT technologií v agrivoltaickém systému	31
2.2.1 Možnosti napájení	31
2.2.2 Živelná rizika	31
2.2.3 Vandalismus	32

3	Architektura sítě pro agrivoltaické systémy	33
3.1	Požadavky na síť a využití technologií	33
3.2	Možnosti rozložení topologie sítě	35
3.2.1	Teoretické řešení pokrytí	37
3.2.2	Síť s jedním přístupovým bodem	38
3.2.3	Síť s dvěma přístupovými body	40
3.2.4	Síť se třemi přístupovými body	42
3.2.5	Síť se čtyřmi přístupovými body	44
3.3	Zabezpečení sítě	46
3.3.1	Zabezpečení komunikace	46
3.3.2	Fyzické zabezpečení	47
4	Návrh monitorovacího systému pro agrivoltaiku	49
4.1	Mikrokontroléry pro monitoring	49
4.1.1	ESP	50
4.1.2	RaspberryPI	53
4.2	Metriky, úložiště a zobrazení	55
4.2.1	Měřené veličiny agrivoltaického systému	55
4.2.2	Ukládání dat a zobrazení	61
4.3	Projektovaná cena	65
5	Implementace a realizace řešení	67
5.1	Sběr dat z agrivoltaického systému	67
5.1.1	Konfigurace sítě monitorovacího systému	67
5.1.2	Implementace měřících zařízení	71
5.2	Konfigurace cloudových služeb	78
5.2.1	Napojení na InfluxDB Cloud	78
5.2.2	Předávání dat do služby Grafana	80
5.3	Vylepšení systému	82
6	Testování vlastností monitorovacího systému	85
6.1	Dosah sítě	85
6.2	Kapacita sítě	88
6.3	Odolnost proti výpadku	90
6.4	Kamerový systém	92
	Závěr	95
	Obsah příloženého média	103

Seznam obrázků

1.1	Ukázka dvou hlavních částí tvořící agrivoltaiku.	5
1.2	Ukázková situace realizace agrivoltaického systému [3]	6
1.3	Teoretický model struktury agrivoltaického systému použitý pro výpočty.[4] . . .	6
1.4	Vyňaté ilustrace z publikace.[4]	7
1.5	Konstrukce připomínající střechu. Foto: Ing. Jiří Bím	8
1.6	Polohovatelná konstrukce. Foto: Ing. Jiří Bím	8
1.7	Vertikální konstrukce. Foto: Ing. Jiří Bím	8
1.8	Polopropustná konstrukce. Foto: Ing. Jiří Bím	9
1.9	Mřížková konstrukce. Foto: Ing. Jiří Bím	9
1.10	Graf ukazující spotové záření napříč dny v roce. Bíle bloky jsou hodnoty naměřené pod přímým sluncem, šedé bloky jsou hodnoty naměřené pod částečným nasazením solárních panelů a černé bloky jsou hodnoty naměřené pod plným nasazením solárních panelů.[6]	10
1.11	Obecný graf znázorňující míru fotosyntézy ku intenzitě slunečního záření. Jsou zde vyobrazeny dva důležité body LCP a LSP. Nahoře je ještě možnost vidět graf míry "Non-photochemical quenching"(nefotogemické zhášení), což je proces, který rostliny využívají k ochraně před účinky vysoké intenzity světla. [8]	11
1.12	Názorná ukázka dvojího využití půdy. Konkrétní údaje jsou z roku 2018, kdy solární panely dokonce pomohly k větší úrodě brambor oproti roku 2017. Měření probíhalo v Heggelbachu v Německu.[10]	12
1.13	Grafy znázorňující měření vlhkosti půdy v různých hloubkách. Měření probíhaly v různých prostředích: částečné zastínění (kolečko), plné zastínění (čtverec), žádné zastínění (trojúhelník).[12]	12
1.14	Ukázka speciálního agrivoltaického řešení. Jedná se o právě probíhající projekt APV-MaGa od institutu Fraunhofer testující novou konstrukci panelů pro sběr dešťové vody.[13]	13
1.15	Názorná schémata ukazující možnosti použití konstrukce agrivoltaických systémů. Vytváří ochrannou strukturu proti nepříznivým situacím, které mohou nastat. Ochrana proti extrémnímu počasí jako kroupy, studené noci nebo invazivním ptactvem. Obrázky byly vyňaty z videa.[16]	14
1.16	Rozpis všech nákladů spojených s pěstováním potravin pro 3 různé scénáře. První je tradiční případ bez použití jakýchkoliv elektrinou poháněných nástrojů. Druhý scénář započítává náklady spojené s použitím dieselového motoru pro zavlažování pole. Ve třetím scénáři se modeluje případ použití agrivoltaického systému k zavlažování. Hlavní pozornost by čtenář měl věnovat zvýrazněným hodnotám, které tvoří hlavní rozdíl mezi scénáři dva a tři.[17]	15
1.17	Graf nám uvádí hrubou marži jednotlivých scénářů, které byly popsány výše. Ukazuje nám profitabilitu jednotlivých scénářů a jejich dopady na proveditelnost jednotlivých řešení. Marže je uváděna pouze na 0,15 hektaru, protože tak velké jsou pole v modelové situaci.[17]	15
1.18	Logo Zenergo s.r.o[20]	16
1.19	Odrůda Syrah po úpalu způsobeným velkými vlnami horka.[23]	17

1.20	Nemoc zvaná černá hniloba. Způsobena houbou, která vzniká ve vlhčích prostředích v období ještě před tím než začnou růst první střípce hroznů. Projevuje se zejména kruhovými tečkami na listech a zčernáním hroznů, takže potom vypadají podobně jako sušené rozinky.[26]	18
2.1	Teoretický model ISO/OSI a TCP/IP. Oba tyto modely následují velmi podobná pravidla. Jediná změna u TCP/IP modelu je agregace spodních dvou vrstev na fyzickou vrstvu a vrchních tří na aplikační vrstvu.[36]	22
2.2	ISO/OSI síťový model a znázorněné vrstvy, na kterých pracuje WiFi. Standard IEEE 802.11 definuje hodně detailně fungování WLAN sítě, takže pro upřesnění jsou zde ukázány dvě velmi důležité části tohoto standardu, a to 802.11 MAC a 802.11 PHY.[40]	23
2.3	Ukázka celého technologického stacku Zigbee, kde poskytuje řešení napříč všemi vrstvami síťového modelu. V obrázku lze pozorovat mnohé vlastnosti této technologie jako například práce na různých frekvencích.[41]	23
2.4	Schéma práce LoRa technologie v rámci LoRa Alliance. Jednotlivé vrstvy jsou přibližně namapovány na teoretický síťový model ISO/OSI. Na spodních (fyzických) vrstvách pracuje právě zmiňovaná LoRa, vyšší vrstvy zajišťuje další produkt LoRa Alliance, a to LoRaWAN protokol, o kterém je psáno níže.[45]	24
2.5	Ukázky principů komunikace. Vlevo je princip klient-server a vpravo princip peer-to-peer.	27
2.6	Příklad formátu téma v protokolu MQTT. Téma se skládá z několika úrovní jdoucí zleva doprava, které jsou odděleny lomítkem. Zde je vícestupňové rozdělení témat použito nejdříve pro specifikování tématu univerzita, zúžení daného tématu pouze na studenti, poté na studenty FIT a v poslední úrovni pouze na studenty magisterského studia. Kdybychom chtěli zúžit toto téma přidáním další úrovně, tak bychom to mohli specifikovat na ročník nebo konkrétní předmět. Na druhém a třetím řádku jsou ukázány dva zástupné znaky pro jednoúrovňové a víceúrovňové zastoupení. V tomto příkladu znak plus zastupuje jednu úroveň a řekneme, že tato úroveň reprezentuje fakultu, na které studenti studují. Tím pádem by toto téma by pokrývalo všechny studenty na univerzitě, kteří studují magisterské studium. V případě znaku křížku se jedná o víceúrovňové zastoupení, tedy tady v tomto tématu jde o všechny studenty na univerzitě.	28
2.7	Diagram fungování MQTT sítě. Je možné vidět brokera a další tři klienty. Dva z nich odebírají témata, o která se zajímají, a třetí klient je zjevně nějaká meteorologická stanice, která publikuje všechna svá data do sítě. Při publikaci broker zprávy přijme a následně je odesílá správným adresátům.[51]	29
2.8	Schéma architektury protokolu LoRaWAN. Lze názorně vidět které vrstvy síťového modelu protokol zajišťuje nejdřív při spojení zařízení s branou a pak v následné distribuci dat po internetu.[53]	30
3.1	První návrhy sítě pro agrivoltaický systém.	34
3.2	Pracovní schéma agrivoltaického systému. Nalevo je barevná verze pro lepší vyobrazení a pochopení. Napravo je černobílá pracovní varianta stejného schématu. Uprostřed je také cesta, která je jediným přístupovým bodem.	36
3.3	Manuální měření síly signálu modelu RPi 3B+ ve venkovních podmínkách. Měřené veličiny jsou síla signálu vůči vzdálenosti. S přibývajícím vzdáleností síla signálu klesá a od 40 metrů a dále se pohybuje ve velmi nestabilních hodnotách.	36

3.4	Teoretické schéma agrivoltaického systému. Krajní body neefektivními kandidáty pro řešení vhodného pokrytí, takže jsou označeny červeně. Vhodnými kandidáty musí být nějaká kombinace výběru vnitřních bodů. Celá mřížka představuje agrivoltaický systém o velikosti jednoho hektaru, tedy jedna hrana je přibližně 33 metrů dlouhá.	37
3.5	Návrh topologie s jedním přístupovým bodem. V tomto případě je přístupový bod modifikován o přídavnou anténu, aby byl schopen pokrýt většinu plochy. Pokrytí je naznačeno modrým kruhem. Přístupový bod sítě je označen zkratkou AP . Nalevo je přístupová cesta k agrivoltaickému systému.	38
3.6	Návrh topologie s dvěma přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou AP . Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik obou sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno přemostění obou sítí. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.	40
3.7	Návrh topologie se třemi přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou AP . Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik všech sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno propojení sítí, které tvoří kruhové propojení. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.	42
3.8	Návrh topologie se čtyřmi přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou AP . Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik všech sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno propojení sítí, které tvoří kruhové propojení. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.	44
3.9	Schéma bezpečnostních operací v monitorovacím systému. Operacemi na obrázku jsou připojení senzorů do sítě přístupového bodu, propojení sítí dohromady, přístup k internetu a kamerový systém.	46
3.10	Schéma používání certifikátů pro zabezpečení komunikaci MQTT protokolu za použití brokera od firmy Mosquitto.[58]	47
4.1	ESP8266 ESP-01, nejmenší varianta ESP8266, kterou lze na trhu pořídit. Zdroj: e-shop Drátek	52
4.2	ESP8266 ESP-12F. Zdroj: e-shop LáskaiT	52
4.3	NodeMcu ESP8266. Zdroj: e-shop Drátek	53
4.4	Doit ESP32. Zdroj: e-shop Drátek	53
4.5	Raspberry Pi zero WH. Zdroj: e-shop LáskaiT	54
4.6	Raspberry Pi model 3B+. Zdroj: e-shop RPishop	55
4.7	Schéma agrivoltaického systému s konstrukcí střechy, které je rozděleno do sektorů různých částí mikroklimatu. Každý sektor má jiné charakteristiky, tudíž je potřeba v každém sledovat různé metriky. Modrý sektor je půda, jdoucí jeden metr do hloubky. Žlutý sektor je mikroklima v blízkém okolí rostlin, na obrázku první metr od země. Zelený sektor je mikroklima ovzduší, které je mezi jedním až třemi metry nad zemí. Červený sektor je mikroklima v blízkosti solárního panelu, přibližně od tří do pěti metrů nad zemí. Dalším typem rozdělení je podle umístění rostlin, zda se nachází přímo pod solárním panelem či pod otevřenou oblohou. Zmíněné výškové hodnoty se mohou lišit podle povahy pěstovaných rostlin nebo typu prostředí. . .	57
4.8	Senzory pro měření vlhkosti a teploty vzduchu. Nalevo je senzor BME280 a napravo senzor DHT22. Zmiňovaný senzor DHT11 vypadá totožně jako senzor DHT22. Zdroj: e-shop Drátek	58
4.9	Senzory pro měření vlhkosti a teploty půdy. Nalevo je senzor DS18B20, uprostřed je kapacitní senzor vlhkosti půdy a vpravo odporový senzor vlhkosti půdy. Zdroj: e-shop Drátek	59
4.10	Senzory pro detekci intenzity slunečního záření. Vlevo je senzor BH1750, vpravo TEMT6000. Zdroj: e-shop Drátek	59

4.11	Vlevo na obrázku je RPi camera 3 NoIR pro modul RPi, uprostřed je ESP32-CAM s kamerou OV2640 a napravo senzor pro detekci pohybu HC-SR505. Zdroj: e-shop Drátek . a RPishop	60
4.12	GSM a GPRS modul SIM800L s externí anténou. Zdroj: e-shop Drátek	60
4.13	Logo služby Amazon Web Services od firmy Amazon. Jedná se o jednoho z největších poskytovatelů cloudových služeb. Zdroj: AWS	62
4.14	Logo služby Google Cloud od firmy Google. Firma kromě nejpoužívanějšího vyhledávacího nástroje na světě je také jedním z velkých poskytovatelů cloudových služeb. Zdroj: VectorLogoZone	62
4.15	Logo firmy InfluxData. Tato firma vyvíjí a podporuje open-source produkt InfluxDB. Je hodně používaným poskytovatelem v oblasti IoT. Zdroj: SeekVectorLogo	63
4.16	Logo firmy Grafana. Grafana vyvíjí a podporuje stejnojmenný open-source software pro vizualizaci a analýzu dat. Zdroj: WikipediaCommons	64
4.17	Diagram aktivit monitorovacího systému s využitím cloudových řešení. Diagram obsahuje fyzická zařízení, cloudové služby a uživatele.	64
4.18	Odhadovaná pořizovací cena monitorovacího systému a náklady na provoz.	66
5.1	Schéma lokalizace senzoru v agrivoltaickém systému. Je zde využito formátu šachovnice, kde každý sektor je jednoznačně určen kombinací čísla řádku a písmenka sloupce.	71
5.2	Schéma zapojení modulu v blízkosti rostlin. Hlavními součástkami jsou zařízení ESP a senzory pro měření teploty a vlhkosti ovzduší <i>DHT22</i> , teploty půdy <i>DS18B20</i> , vlhkosti půdy a intenzity slunečního záření <i>DH1750</i> . V zapojení se ještě nachází rezistor <i>R1</i> o odporu $10k\ \Omega$ propojující datový a napájecí kabel. Poslední součástkou ve schématu je rezistor <i>R2</i> o odporu $4,7k\ \Omega$ také propojující datový a napájecí kabel u senzoru <i>DS18B20</i> . Červeně označené kabely slouží pro napájení, černé pro uzemnění a modré jako datové.	73
5.3	Schéma zapojení modulu v blízkosti rostlin. Hlavními součástkami jsou zařízení ESP a senzory pro měření teploty a vlhkosti ovzduší <i>DHT22</i> a intenzity slunečního záření <i>DH1750</i> . V zapojení se ještě nachází rezistor <i>R1</i> o odporu $10k\ \Omega$ propojující datový a napájecí kabel.	75
5.4	Schéma zapojení RPi. Zařízení realizuje síť WiFi a provozuje MQTT brokera, takže účelně schéma obsahuje jen nejnútnejší součástky. Další zapojené moduly jsou RPi cam NoIR (není připojena přes GPIO piny, ale přes SCI datový kabel), modul SIM800L EBV pro připojení do GSM sítě, IR LED diody (<i>D1</i> až <i>D5</i>) a extra zdroj napájení pro modul SIM800L <i>U1</i> . Led diody jsou paralelně zapojeny a elektrický proud je upraven rezistory <i>R1</i> až <i>R5</i> . RPi je propojeno s modulem SIM800L přes TX a RX piny, které jsou určené pro odesílání dat přes sériové rozhraní.	76
5.5	Schéma zapojení detektoru pohybu HC-SR501. Toto jednoduché schéma obsahuje pouze 3 dráty, červený pro napájení, černý pro uzemnění a žlutý pro digitální signál.	77
5.6	Struktura ukládaných dat v InfluxDB Cloud. Proces začíná u vstupu, Telegraf, který posílá data do předem určeného bucketu. Každý bucket představuje jednotlivou instalaci agrivoltaického systému. Následně se v každém bucketu nachází ukládaná data v podobě témat.	78
5.7	Ukázka části dashboardu zobrazující přehled dat napříč celým agrivoltaickým systémem v aplikaci Grafana. Hlavní částí jsou 2D matice, zobrazující aktuální metriky v každém sektoru.	81
5.8	Ukázka části dashboardu zobrazující detailnější časové řady pro jeden sektor agrivoltaického systému. Každá metrika, jako například vlhkost, má vlastní graf, který zobrazuje vybranou metriku v různých místech daného sektoru.	81

5.9	Ukázka části dashboardu zobrazující textová upozornění a oznámení. V levé části se nachází tabulky zmíněných textových zpráv a v pravé části se zase nachází aktuálně nejnovější pořízený snímek kamerami v monitorovacím systému.	82
6.1	Vizualizace testovacího prostředí parku u Podolské vodárny na Mapy.cz. Je možné vidět členitost prostředí tvořící vhodné překážky, které simulují prostředí agrivoltaického systému.	86
6.2	Oblast měření dosahu sítě. Ohraničení je provedeno červenou čarou, jednotlivé úseky a celková plocha jsou zaznamenány v pravé části obrázku. Uprostřed oblasti je červená tečka znázorňující pozici zařízení RPi.	86
6.3	Vizualizace síly signálu sítě pomocí aplikace Heatmapper. Barevnost heatmapy odpovídá síle singálu, kde žlutá a zelená barva značí výsledky pod 70 dBm a modrá barva zobrazuje výsledky, které jsou vyšší než 70 dBm.	87
6.4	Grafy znázorňující střední hodnotu rychlosti zpráv do MQTT sítě. Vrchní graf znázorňuje kolik zpráv za sekundu dokáže broker zpracovat při operaci odesílání. Spodní graf znázorňuje totožnou věc, pouze pro operaci přijímání. Každá řada znázorňuje různé množství klientů (10, 50, 250) v závislosti na množství zpráv, které každý klient odesílá/přijímá.	89
6.5	Názorná ukázka dvou testovaných scénářů. Scénář č.1 popisuje výpadek zařízení ESP. Scénář č.2 popisuje výpadek zařízení RPi.	90
6.6	Dva velmi podobné záběry pořízené kamerou pro noční vidění. Záběr pořízený za světla je vlevo, záběr pořízený ve tmě je vpravo.	93

Seznam výpisů kódu

5.1	Aktualizace RPi.	68
5.2	Instalace aplikací hostapd a dnsmasq pro WiFi. Instalace aplikací pro používání SIM modulu.	68
5.3	Zastavení hostapd.	68
5.4	Statická konfigurace rozhraní	68
5.5	Konfigurace automatického přidělování IP adres.	69
5.6	Konfigurace přístupového bodu.	69
5.7	Nastavení automatického spouštění hostapd.	69
5.8	Nastavení ppp-peer souboru, obsahující základní konfigurace.	69
5.9	Nastavení ppp-chat souboru, obsahující základní konfigurace.	70
5.10	Spouštěcí skript pro aplikaci PPP.	70
5.11	Aktivace SIM modulu a restart aplikací pro WiFi.	70
5.12	Instalace MQTT brokeru Mosquitto a nastavení automatického spouštění služby.	70
5.13	Procedura inicializace WiFi připojení.	74
5.14	Procedura callback a reconnect, které slouží pro navázání spojení s MQTT brokerem a přijímání zpráv.	74
5.15	Metoda on_message, které slouží pro přijímání zpráv a jejich další zpracovávání.	77
5.16	Nastavení agenta v konfiguračním souboru telegrafu.	79
5.17	Definice výstupu pro telegraf. Napojení na konkrétní bucket, do kterého má zapisovat.	79
5.18	Definice vstupů pro telegraf.	80
5.19	Spuštění telegrafu na RPi.	80

6.1	Ukázka použití nástroje mqtt-stresser.	88
6.2	Výstup zařízení ESP na sériové lince po znovu připojení napájení.	91
6.3	Výstup zařízení ESP při výpadku napájení RPi	92
6.4	Výstup zařízení RPi při ověření stavu služeb hostapd, dnsmasq a mosquitto. . .	92

Chtěl bych poděkovat především své rodině za veškerou podporu během mých studií na ČVUT. Důležitou pomocí při psaní této diplomové práce byl můj vedoucí Ing. Martin Daňhel, Ph.D., který mi byl vždy k dispozici kdykoliv jsem si nevěděl rady a dokázal dát mé práci směr. Z blízkých přátel chci obzvláště poděkovat Janu Vavřinovi, se kterým vznikla myšlenka pro tuto diplomovou práci, a Adamu Buchtovi, který mi byl vždy ochoten pomoci při opravách mé neohrabané češtiny. V neposlední řadě chci ještě poděkovat mé přítelkyni, za projevenou trpělivost a podporu v nejtěžších chvílích.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 4. května 2023

.....

Abstrakt

Tato práce zkoumá nově rozvíjející se průmysl v ČR, který se nazývá Agrivoltaika. Teoretická část práce zabývá vymezením pojmů týkajících se agrivoltaického průmyslu. Dále popisuje vznik tohoto fenoménu od první myšlenky až po současný stav (the State-of-the-Art), který je dále v této části podrobně rozebrán a analyzován z hlediska použitelnosti, prospěšnosti a především technologického zázemí, které je potřeba pro jeho realizaci. Pro zúžení rozsahu se práce zaměřuje pouze na agrivoltaické systémy nad vinohrady, tedy sbírané metriky jsou vyčleněny pro tento případ.

Praktická část práce obsahuje návrh a realizaci jednoduchého monitorovacího systému při využití moderních IoT technologií ve spolupráci s cloudovými službami. V návrhové části je řešena topologie IoT sítě v prostředí agrivoltaického systému. Možnosti, jak síť realizovat, jsou detailně rozebrány a charakterizovány. Dále jsou zde určeny vyhovující platformy pro monitorovací systém včetně možných alternativ. Dalším krokem návrhu je výběr zařízení a modulů, které splňují požadavky z analýzy agrivoltaiky nad vinohrady, pro realizaci fyzické části monitorovacího systému.

Další praktickou částí je realizace všech zmiňovaných částí v návrhu monitorovacího systému. Realizace popisuje fyzickou část monitorovacího systému, její propojení ke cloudovým službám a následně konfiguraci jednotlivých služeb. Veškeré konfigurace jsou detailně sepsány do podoby návodů, které lze jednoduše použít. Součástí práce je také vytvoření webového rozhraní pro sledování dat, obrazu a statistik monitorovaného vinohradu. Práci zakončuje implementace prototypu monitorovacího systému a testování funkcionalit v simulovaných podmínkách.

Klíčová slova Agrivoltaika, vinohrad, IoT, monitoring, cloud

Abstract

This work examines a newly developing industry in the Czech Republic called Agrivoltaics. The theoretical part of the thesis deals with the definition of terms related to the agrivoltaic industry. Furthermore, it describes the emergence of this phenomenon from the first idea to the current state (the State-of-the-Art), which is further analyzed in detail in this section from the point of view of usability, usefulness and, above all, the technological background that is needed for its realization. To narrow the scope, the work focuses only on agrivoltaic systems above vineyards, i.e. the collected metrics are set aside for this case.

The practical part of the work includes the design and implementation of a simple monitoring system using modern IoT technologies in cooperation with cloud services. In the design part, the topology of the IoT network in the environment of the agrivoltaic system is solved. Possibilities of how to implement the network are stated and characterized in detail. Furthermore, suitable platforms for the monitoring system are determined here, including possible alternatives. The next step of the design is the selection of devices and modules that meet the requirements of the analysis of agrivoltaics over vineyards, for the implementation of the physical part of the monitoring system.

Another practical part is the implementation of all the mentioned parts in the system design. The implementation describes the physical part of the monitoring system, its connection to cloud services and subsequently the configuration of individual services. All configurations are written in detail in the form of instructions that can be easily used. Part of the work is also the creation of a web interface for monitoring data, images and statistics of the monitored vineyard. The work ends with the implementation of the monitoring system prototype and the testing of functionalities in simulated conditions.

Keywords Agrivoltaics, vineyard, IoT, monitoring, cloud

Seznam zkratek

LCP	Light Compensation Point
LSP	Light Saturation Point
IoT	Internet Of Things
SMART	Specific, Measurable, Achievable, Relevant a Time-bounded
kB/s	Kilobyte per second
MBit/s	MegaBit per second
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
M2M	Machine to Machine
PAN	Personal Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
LoRa	Long Range
LPWA	Low Power Wide Area
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access WPA
ESP	Espressif
RPi	Raspberry Pi
ROM	Read Only Memory
PCB	Printed Circuit Board
RTC	Real Time Clock
ULP	Ultra Low Power
GPIO	General Purpose Input Output
SSH	Secure Shell
SCI	Serial Communications Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
OTA	Over The Air

Úvod

Za uplynulou dekádu se čím dál více řeší otázka globálního oteplování a stejnou rychlostí se hledají možnosti, jaké lze provést změny, abychom mu zabránili. Hodně velké změny se začaly dít v energetice. Spousty tepelných elektráren se začaly zavírat ve prospěch těch větrných, solárních či vodních. Obzvláště v posledních letech zažíváme velký nárůst poptávky po solární panelech, a to jak pro domácnostik, tak i pro průmyslová využití. Domácnosti tuto poptávku řeší poměrně přímočaře, a to instalací solárních panelů na své střechy. Průmysl však má jeden zásadní problém, kde jeden z omezujících faktorů solární energie je velikost plochy. Na různých místech lze vidět solární farmy, které se jsou ale instalované na velké travnaté ploše a pod ní se v lepším případě pase stádo ovcí. Nejen, že solární farmy zabírají velkou plochu, ale často je tato plocha využita pouze pro jeden účel. Touto cestou tedy rozvoj solární energie nepůjde, protože bychom měli místo polí pro pěstování potravin jen pomyslný deštník ze solárních panelů. Otázku, kde najít místo pro další solární panely, si začal klást Institut Fraunhofer v Německu. Tam se zrodila první myšlenka a experimenty postavit solární panely nad řádky vinohradů. Myšlenka zcela jednoduchá, avšak poměrně revoluční, nalezla symbiózu mezi pěstováním vína a generováním energie. Přibližně 10 let zpátky, se pro tuto technologii utvořila zkratka Agrivoltaika.

V našich krajinách se však agrivoltaika ještě zatím nevyskytuje. Nicméně lze sbírat inspiraci ze zahraničí, kde se první projekty začínají realizovat.

Můj dobrý kamarád Jan Vavřina pracuje ve firmě ZENERGO a.s., která se zabývá mnoha ekologickými tématy jako zpracování plastů, recyklacem ake také nově také agrivoltaikou. Při výběru své diplomové práce jsem chtěl navázat na svou bakalářskou práci, která se zabývala zabezpečením vinného sklepa pomocí IoT technologií. Mé kořeny jsou na Moravě, kde mám spousty přátel, kteří vlastní a opečovávají vinohrady, čehož jsem chtěl ve své práci využít. V bakalářské práci jsem zmiňoval bezpečnostní rizika pro vinné sklepy, ale ta samá rizika se vyskytují také na vinohradu, kde víno není schované za dveřmi sklepa. Právě díky agrivoltaice se IoT technologie mohou dostat i na zemědělskou půdu, kde za normálních okolností není žádný zdroj elektřiny. IoT systém by byl napojen na agrivoltaickou síť a monitoroval jak solární panely, tak i půdu pod nimi.

Po hlubším prozkoumání tohoto tématu jsem začal zjišťovat jak zajímavé téma toto je. Vedou se celé řady výzkumů na zemědělských univerzitách, zkoumající prospěšnost solárních panelů pro půdu a rostliny, ale i na technických univerzitách. S rostoucím zájmem o toto téma jsem začal získávat kontakty na další lidi, kteří se o agrivoltaiku zajímají. Přínosným zdrojem informací na téma agrivoltaiky byl Ing. Jiří Bím z ČVUT FEL, který vede Solární asociaci v oblasti agrivoltaiky. Od něj jsem načerpal velké množství informací a dále mě zkontaktoval s výzkumným týmem na Mendelově univerzitě v Brně, kde provádí výzkum efektivity solárních panelů na rostliny pod nimi.

Cíle práce

Hlavním cílem práce je návrh monitorování agrivoltaických systémů pomocí IoT technologií. Výsledný systém by měl být schopen při nasazení monitorovat důležité metriky vinohradu a solárních panelů, přehledně je zobrazovat pomocí webového rozhraní uživatelům a celý objekt chránit kamerovým systémem. Systém by měl být navržený tak, aby byl efektivní z hlediska přenosu dat, spotřeby energie a zabezpečení jednotlivých zařízení. V případě narušení či detekce pohybu se od systému očekává jistá úroveň autonomie a zalarmování majitele pozemku/vinohradu či zodpovědného uživatele.

Mimo samotný návrh monitorovacího systému vinohradu si práce klade za cíl čtenářům představit a osvětlit pojem agrivoltaika na obecné úrovni. V dnešní době již výzkumy pokročily, různé typy agrivoltaických systémů a rozeberu jejich případy použití. V práci bych rád rozepsal nebo budu chtít rozepsat realizovaná řešení v Evropě a Asii. Dále bude popsána současná situace v ČR, včetně celé řady důvodů, které brzdí vznik agrivoltaiky, také bych rád zmínil jaké jsou klíčové faktory pro vznik těchto systémů v českém prostředí apod.

Jelikož je toto téma relativně nové a stále probíhá spousta výzkumů, bude jedním z cílů této práce zjistit současný stav State of the Art. Dílčím cílem práce tedy je projít si jaké otázky se snaží věda odhalit okolo agrivoltaiky a co už dokázala zjistit.

Pro splnění hlavního cíle práce je nutná znalost realizovaných IoT řešení na velkých venkovních prostranstvích. Proto práce prozkoumává průmysl, kde se taková řešení již vyskytují. Jelikož je práce úzce spjata se zemědělstvím, budu příklady použití IoT čerpat především z tohoto odvětví. Při tomto průzkumu se pokusím zadefinovat jaké technologie jsou pro taková řešení použity.

Nedílnou součástí hlavního cíle je nutný průzkum prostředí vinohradu, pro toto prostředí je potřeba zvolit konkrétní metriky (teplota, rozloha, nutná síla signálu apod.), které bude možno měřit. Nad vinohradem se bude týčit druhá část agrivoltaického systému, takže se také budu muset zjistit, čím by IoT systém mohl přispět svým monitoringem i u solárních panelů. V neposlední řadě je potřeba zvážit možná rizika, která mohou ohrožovat navržený systém.

Po kompletním návrhu monitorovacího systému pro vinohrady navazuje implementace a testování navrhovaného řešení. Koncept řešení je implementován v menším měřítku na reálných zařízeních a tím budou ověřeny všechny použité technologie. V poslední fázi bych rád funkčnost navrženého systému vyzkoušel v simulovaných podmínkách, např. ve venkovních prostranstvích.

Motivace

Hlavní motivací pro tuto práci je poskytnutí zabezpečení vinohradu jejich majitelům. Právě od majitelů vinohradů jsem získal spousty osobních informací o tom, že mají zkušenosti s krádežemi vinné révy a jak je pro ně nemožné předejít takové situaci. Vinohrad, stejně jako pole, je otevřené neoplocené prostranství, kam může kdokoli nepozorovaně vejít a majitel by musel celý den

strážít, aby taková situace nenastala. Jako další velkou bezmocí majitelů vinohradů jsou jarní a letní měsíce. V jarních měsících musí odhadovat, kdy začít s výsadbou. Nevědí, zda je půde dostatečně teplá a suchá. V letních měsících je zase problémem značné sucho na vinohradech, kdy musí majitelé ručně hlídat a odhadovat, zda musí poskytnout vinné révě dodatečnou vláhu. Monitorováním takových užitečných dat by měli majitelé vinohradu základní přehled nad kvalitou prostředí pro své víno.

Rád bych také částečně navázal na svou bakalářskou práci, byť jen tématicky, a navrhl systém využívající IoT a SMART technologie pro monitorování agrivoltaiky. V tomto případě se jedná o zcela nové prostředí a já bych si chtěl prohloubit znalosti v tom, jak se navrhují a fungují velké IoT sítě, jejich realizace ve venkovních podmínkách apod. Touto prací bych rád otevřel dveře pro další zkoumání tématu propojení IoT a agrivoltaiky. Jednou z mých dalších motivací je realizace takových systémů v budoucnosti.

Po skončení úvodu následuje kapitola, kde popisují agrivoltaické systémy, kde je detailněji popsán na současný stav a probíhající výzkumy. Třetí kapitolu tvoří úvod do velkých IoT systémů v různých odvětvích průmyslu. Kapitola se zabývá používanými principy a také současnou situací propojení IoT a zemědělství. Čtvrtá kapitola je věnována už konkrétně agrivoltaice nad vinohrady a její detailní popis. Jsou zde popsány důležité elementy pro monitorování jak u solárních panelů, tak i v samotné půdě. Pátou kapitolou je návrh IoT systému, kde je na základě předešlého výzkumu detailně popsáno, jak by celý systém mohl vypadat. Dvě poslední kapitoly popisují implementaci a realizaci prototypu takového systému a jeho testování v simulovaných podmínkách.

Kapitola 1

Agrivoltaické systémy

V této kapitole se do podrobnosti rozebere pojem agrivoltaika. Lehce nahlédnu do historie tohoto tématu, kde vzniklo a jaké byly první myšlenky. Je vysvětleno, co agrivoltaika zahrnuje a je pro čtenáře zdefinována. Názorně se podívám na jednotlivé typy struktur agrivoltaických systémů, jaké jsou jejich typy použití a výhody či nevýhody. Pod lupou si dám i celkový vztah mezi zemědělstvím a solárními panely. Zjistím zda je takové řešení vůbec nějak prospěšné a projdu všechny jeho benefity. Vědecká společnost se snaží odhalit spoustu otázek na téma agrivoltaika, takže provedu lehký náhled na tyto výzkumy. V neposlední řadě se v této kapitole podívám do zahraničí na již realizované systémy a porovnáám to se situací v ČR.

1.1 Co je to agrivoltaický systém

Abych v této práci mohl používat slovo **agrivoltaika**, nejdříve si jej potřebuji zdefinovat a popsat co si pod ním představit. Z lexikografického hlediska se jedná o slovo složené ze dvou jiných slov. První částí slova je "agri", které vzniklo z anglického slova *agriculture* (česky: zemědělství). Druhou částí slova je "voltaika", kde v tomto případě je původním slovem *fotovoltaics* (česky: fotovoltaika).

Na základě významu slov uvedu následující obecnou definici:

"Slovo agrivoltaika reprezentuje spojení zemědělství a fotovoltaických systémů. Jedná se o dvojí použití téhož místa pro účely pěstování plodin a generování solární energie."



(a) Ilustrační obrázek solární farmy [1]



(b) Ilustrační obrázek vinohradu [2]

■ **Obrázek 1.1** Ukázka dvou hlavních částí tvořící agrivoltaiku.

Díky tomuto nově vzniklému spojení se naší společností rozšiřují možnosti kde ekologicky generovat elektřinu. Obzvláště Evropa se potýká s nedostatkem místa pro instalaci větších solárních farem. V další kapitole jsou detailněji popsány další benefity, které agrivoltaické řešení nabízí.



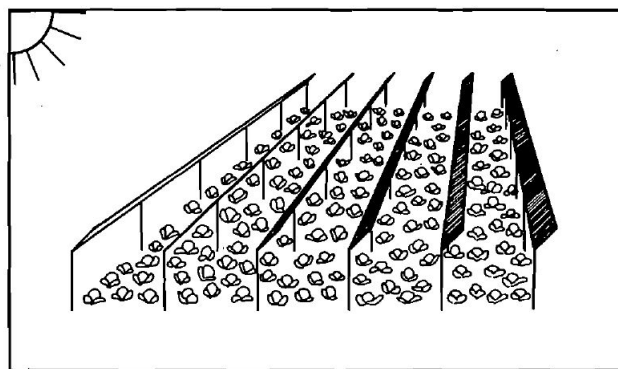
■ **Obrázek 1.2** Ukázková situace realizace agrivoltaického systému [3]

elektřiny například pro elektrifikaci zemědělské činnosti. Jedním ze základních stavebních kamenů, proč je vůbec možné nasazení IoT monitorovacího systému, jsou principy cirkulární ekonomiky.

Ale ještě než se podívám do současnosti, projdu krátce historii a vývoj agrivoltaiky do současnosti.

1.2 Historie

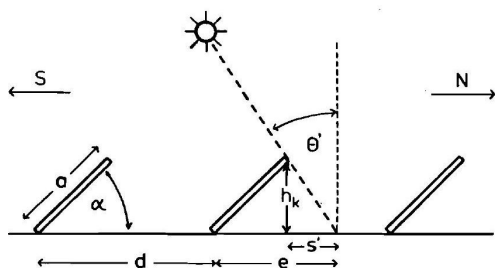
Za zrod agrivoltaiky se dá pokládat rok 1981, kdy ve *Fraunhofer-Institut A. Goetzberger* a A. Zastrow uveřejnili publikaci o koexistenci solárních panelů a pěstování rostlin.[4] V práci se pojednává o předchozím smýšlení, že instalace solárních panelů znemožňuje jakékoliv jiné použití pozemku. Touto publikací se snaží vyvrátit tyto myšlenky, že na teoretickém modelu agrivoltaického systému počítají, jak moc slunečního záření zastíní solární panely rostlinám.



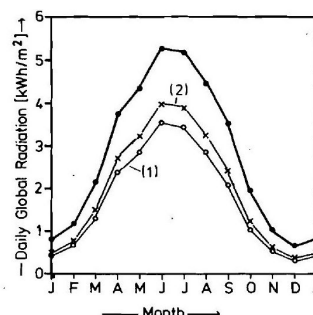
■ **Obrázek 1.3** Teoretický model struktury agrivoltaického systému použitý pro výpočty.[4]

¹Koncept, který se zabývá způsoby, jak vylepšit kvalitu životního prostředí pomocí zefektivnění produkce. Více informací zde.

Podstatnou částí práce je matematická analýza prostředí a definování si vztahů mezi parametry solárního panelu a izolovaným bodem na zemi. Tyto vztahy jsou obecně popsány nejdříve ve dvourozměrném a následně v třírozměrném prostředí. Výpočty jsou také závislé na zeměpisné šířce, kterou v jejich publikaci izolovali na 48° zeměpisné šířky.



(a) Základní schéma použité pro výpočty zastínění země.



(b) Výsledný graf zobrazující rozdíly mezi nezastíněnou a zastíněnou plochou panelu.

■ Obrázek 1.4 Vyňaté ilustrace z publikace.[4]

Na obrázku a je možné mnoho metrik použité pro výpočty, popsány jsou pouze ty nejdůležitější. Délka solárního panelu je označena písmenem a , úhel náklonu vůči zemi písmenem α , vzdálenost mezi jednotlivými panely písmenem d , délka stínu je označena písmenem s a mimo tento obrázek je důležitou metrikou výška instalovaného solárního panelu h . V grafu na obrázku b se nacházejí tři funkce. Neoznačená funkce zobrazuje přímé sluneční záření a funkce označené čísly 1 a 2 jsou dvě různé konfigurace solárních panelů:

- $a = 1$; $d = 3$; $h = 2$; $\alpha = 48^\circ$
- $a = 1$; $d = 4$; $h = 2$; $\alpha = 58^\circ$

Nejdůležitější sledovanou veličinou je poměr zastínění vůči přímému světlu. V publikaci se dopracovali k výsledkům, že po integraci napříč všemi měsíci, poměr slunečního záření, které se dostane k rostlinám, je **62%** v případě konfigurace číslo 1 a **71%** v případě konfigurace číslo 2.

V závěru publikace konstatují fakty o rozvíjejících se obnovitelných zdrojích energie a jak by částečné zastavění zemědělských pozemků mohlo pomoci k řešení energetických problémů s minimální újmou pro rostliny. Právě díky závěrům z této publikace se agrivoltaika začala více zkoumat. V následujících letech vznikaly nové práce zkoumající toto téma z různých aspektů jako například technického, zemědělského, ekonomického, ekologického a jiné.

Postupem času blíže současnosti můžeme pozorovat rozvoj a realizaci tohoto odvětví. Také s rostoucím počtem výzkumů začínají vznikat různé typy agrivoltaických systémů, které jsou popsány v následující podkapitole.

1.3 Typy konstrukcí

Každá rostlina potřebuje pro svůj růst různé podmínky. Některé rostliny potřebují vyšší teploty, více slunečního svitu či jiný typ půdy. Návrhy agrivoltaických systémů se tedy musí přizpůsobit prostředí, ve kterém žijí rostliny. Níže jsou představeny návrhy experimentálních, tak i realizovaných agrivoltaických systémů. Všechny ukázky jsou vhodné do rozdílných (maximálně podobných) prostředí a jsou uvedeny jejich hlavní přednosti. Někdy jsou uvedeny i případy nevhodného použití daného typu konstrukce.

1.3.1 Střecha

Tato konstrukce je inspirována klasickou střechou, kde jsou na jedné konstrukci osazeny statické panely ve dvou řadách. Řady ale mají různý náklon, takže poté ve výsledku konstrukci připomínající stříšku. Osazené panely nejsou nijak odlišné od konvenčních panelů. Jediný rozdíl je, že se mezi jednotlivými panely nachází mezery pro zvýšení propustnosti světla. Velkou výhodou tohoto návrhu je jeho jednoduchost na realizaci, nejsou potřeba žádné speciální úpravy konstrukce ani solárních panelů. Z toho proudí další výhoda, a to je cenová dostupnost tohoto řešení. Vhodným příkladem použití je například ve vinohradech či chmelnicích. Nevýhodou této konstrukce je neoptimální náklon panelů po většinu dne.



■ **Obrázek 1.5** Konstrukce připomínající střechu.
Foto: Ing. Jiří Bím

1.3.2 Polohovatelná konstrukce

Více komplexnějším řešením je polohovatelná konstrukce. Ta se klade za cíl maximalizovat získávání solární energie natáčením panelů ke slunci.[5] Toho je docíleno pomocí dodatečných technologií, které pravidelně upravují náklon jednotlivých panelů. Toto řešení je poměrně univerzální a je možné ho použít téměř v jakémkoliv prostředí. Nicméně na ilustraci je možno pozorovat jednu z hlavních nevýhod tohoto řešení, a to je hustota nainstalovaných panelů. Je tedy nutno větších rozestupů mezi jednotlivými panely, což na druhou stranu poskytuje větší množství slunečního záření pro rostliny pod nimi. Další limitací pro realizaci tohoto řešení jsou vyšší náklady, obzvláště kvůli již zmíněným technologiím pro polohování panelů.



■ **Obrázek 1.6** Polohovatelná konstrukce.
Foto: Ing. Jiří Bím

1.3.3 Vertikální konstrukce

Zde se pracuje úplně s jiným přístupem. Jednou z nevýhod předchozích konstrukcí je jejich výškové omezení. Tím pádem se ostatní konstrukce musí stavět poměrně vysoko, aby umožnili průjezd zemědělským přístrojům. Díky tomuto typu konstrukce problém s výškou agrivoltaického systému zmizel, ale vznikla jiná úskalí. Vertikální systémy bohužel nejsou tak efektivní jako ostatní konstrukce a nejsou vhodné pro vyšší typy rostlin jako například kukuřice, která by panely kompletně zastínila. Na druhou stranu tato konstrukce nijak nezastřešuje rostliny a poskytuje jim větší míru slunečního záření než jiné. Z těchto vlastností vyplývá, že konstrukce má poměrně úzké pole využití. Vhodným prostředím pro nasazení takového systému jsou pole s nízkými rostlinami, které potřebují hodně slunečního svitu, jako například obiloviny či řepka.



■ **Obrázek 1.7** Vertikální konstrukce.
Foto: Ing. Jiří Bím

1.3.4 Polopropustná konstrukce



■ **Obrázek 1.8** Polopropustná konstrukce.
Foto: Ing. Jiří Bím

Jak již ilustrace naznačuje, tato konstrukce je variací na široce používané skleníky. Rostliny ve skleníku obvykle potřebují stabilnější a vyšší teploty pro svůj růst, tedy více slunečního záření. Zde se může hovořit spíše o vylepšení konstrukce skleníku o dodatečné solární panely. Rozestupy mezi panely a celková propustnost je hodně závislá na pěstovaných rostlinách pod nimi. Hlavní myšlenkou tohoto řešení je energetická neutralita skleníku v rámci cirkulární ekonomiky, nikoliv generování velkého množství elektřiny. Jedná se o poměrně užší spektrum využití, kde ale ostatní konstrukce nemohou být efektivně realizovány.

Nutno podotknout, že skleníky se solárními panely je myšlenka, která částečně dala za vznik agrivoltaice. V tomto případě již konstrukce skleníku existuje, jen je potřeba nalézt správné řešení, aby toto spojení mohlo fungovat. Agrivoltaika nicméně pracuje s myšlenkou vybudování konstrukcí nad zemědělské pozemky, kde se doposud nevyskytovaly.

1.3.5 Mřížková konstrukce



■ **Obrázek 1.9** Mřížková konstrukce.
Foto: Ing. Jiří Bím

Problémem všech předchozích konstrukcí je, že stín tvořený solárními panely je ve formě pásů, které kompletně zakrývají rostlinu po určitou dobu. Následující návrh se pokouší velikost stínů minimalizovat separováním fotovoltaických článků na menší segmenty. To vytváří mnoho menších stínů, ale je mezi nimi mezera. Díky takovému rozčlenění solárních panelů sluneční záření dopadá na rostliny mnohem rovnoměrněji během celého dne. Při porovnání s běžnými solárními panely je struktura konstrukce totožná. Jediným rozdílem, který dělá celé řešení nákladnější, je právě rozdělení fotovoltaických článků do mřížky s mezerami.

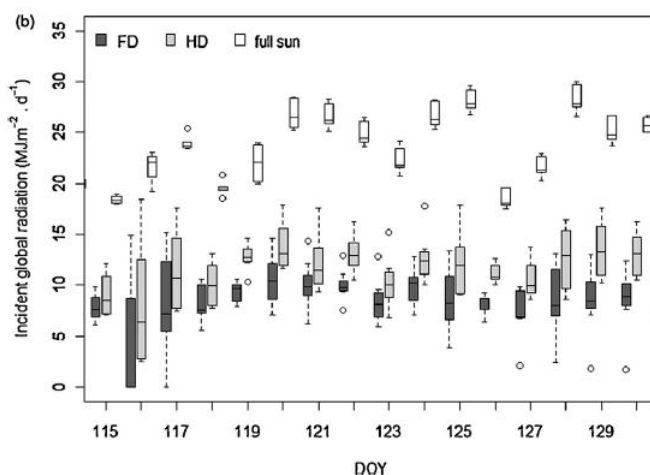
1.4 Benefity nasazení systému

Propojením zemědělství a solárních panelů vzniká zcela nové prostředí pro růst rostlin. V mnohých ohledech se jedná o symbiotické řešení. V této podkapitole jsou níže rozebrány hlavní faktory a benefity nasazení agrivoltaického systému jako například mikroklima vznikající pod solárními panely, optimalizace využití sluneční energie, dvojitý využití půdy, či omezení vypařování vody. V neposlední řadě se v této podkapitole můžete dočíst o ekonomické stránce věci a jak jeden pozemek může generovat dva různé typy výdělku.

1.4.1 Sluneční záření

Jeden z hlavních odstrašujících faktorů pro agrivoltaiku byl nedostatek slunečního záření pro rostliny. Za uplynulé roky byla provedena celá řada studií zkoumající efekty agrivoltaiky na různé typy rostlin. Většina prací dochází k velmi podobnému závěru, že zastínění nijak zásadně neovlivňuje konečné množství produkce. I přes řady výzkumů tyto závěry nejsou moc rozšířeny ve společnosti, snižujíc tím povědomí o benefitech agrivoltaiky.

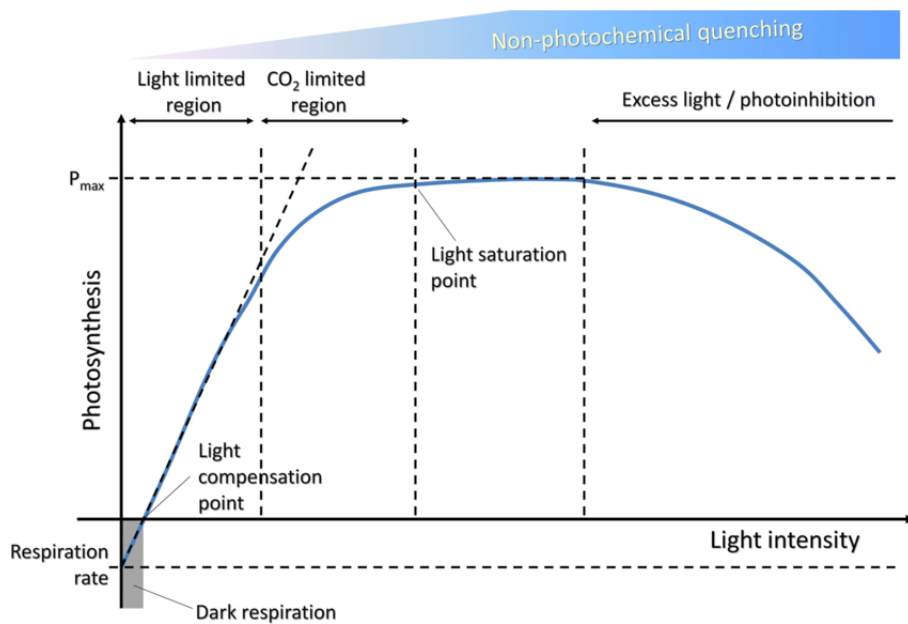
Uvádí se, že v počátečních fázích vývoje rostliny zastínění způsobuje pomalejší růst.[6] Stín totiž nutí rostlinu vytvořit větší kořenový systém, který poté umožňuje větší růst v pozdějších fázích života rostliny.



Obrázek 1.10 Graf ukazující spotové záření napříč dny v roce. Bílé bloky jsou hodnoty naměřené pod přímým sluncem, šedé bloky jsou hodnoty naměřené pod částečným nasazením solárních panelů a černé bloky jsou hodnoty naměřené pod plným nasazením solárních panelů.[6]

Navzdory většímu zastínění tento fakt neovlivňuje kvalitu života rostlin. Hlavní aktivitou, pro kterou rostlina potřebuje sluneční záření, je fotosyntéza. Během fotosyntézy se energie přijatá ze slunečního záření přetváří na energii chemických vazeb (cukry), které dále rostlina vstřebává pro svůj růst.[7]

Proces fotosyntézy ale neprobíhá vždy na plno, rostlina vstřebává sluneční záření postupně a nějakou dobu trvá, než dosáhne svého maximálního potenciálu. Zde jsou důležité dvě důležité události, které je potřeba znát. Aby fotosyntéza vůbec započala, se musí rostlině poskytnout dostatek světelného záření. Tento moment se nazývá *"Light compensation point"* (LCP). V tento moment rostlina začíná přijímat oxid uhličitý a rozkládá ho. Stejně jako u jakéhokoli živého organismu i rostlina se v průběhu dne nasýtí touto energií. Poté už nedokáže spotřebovat další sluneční záření a snaží se před zářením chránit. Moment, kdy se rostlina nasýtí, se nazývá *"Light saturation point"* (LSP).[8]



■ **Obrázek 1.11** Obecný graf znázorňující míru fotosyntézy ku intenzitě slunečního záření. Jsou zde vyobrazeny dva důležité body LCP a LSP. Nahoře je ještě možné vidět graf míry "Non-photochemical quenching" (nefotogemické zhášení), což je proces, který rostliny využívají k ochraně před účinky vysoké intenzity světla. [8]

Funkce, kterou můžete vidět výše, ukazuje jak obecně probíhá fotosyntéza. Nejdůležitějším bodem v grafu je LSP. Průběh funkce po tomto bodě už má klesající tendenci a naopak se zvyšuje hodnota nefotochemického zhášení nad grafem. Z toho plyne, že rostlina svůj potenciál pro fotosyntézu vyčerpá při dosažení LSP. Další energii slunečního záření už rostlina nedokáže využít a používá tuto energii pouze ke své ochraně. Nutno zmínit, že všechny hodnoty i podoba funkce se liší pro každou rostlinu a je potřeba toto brát v potaz.

Agrivoltaika tedy neomezuje rostliny v jejich růstu a zároveň napomáhá efektivnějšímu využití slunečního záření. Díky zastínění rostlina sice dosáhne svého LSP mnohem později, ale při správné volbě agrivoltaické konstrukce se zajistí dosažení LSP.

1.4.2 Dvojití využití půdy

Celá řada států se potýká s nedostatkem místa pro umístění obnovitelných zdrojů energie. Větrné elektrárny nejsou sice nákladné na prostor, ale jsou vcelku náročné na instalaci. Solární elektrárny jsou sice jednodušší na instalaci, ale vyžadují značné množství prostoru. Právě použitím agrivoltaiky se otevírá velké množství prostor, které můžeme jako společnost využít pro získávání obnovitelných zdrojů elektřiny.

V předchozí podkapitole bylo vysvětleno, že instalace panelů výrazně neomezuje rostliny a jejich produkci. Naopak z pohledu využití prostoru se agrivoltaické řešení ukazuje jako podstatně efektivnější, než když bychom stavěli současné solární farmy. Tým vědců ve Francii uvádí, že při správné volbě agrivoltaického řešení, může efektivita využití půdy být mezi 35 až 75 procenty.[9] Institut Franhofer uvádí ve své studii ještě pozitivnější čísla, a to až o 86 procent efektivnější využití půdy v případě brambor.[10]



■ **Obrázek 1.12** Názorná ukázka dvojího využití půdy. Konkrétní údaje jsou z roku 2018, kdy solární panely dokonce pomohly k větší úrodě brambor oproti roku 2017. Měření probíhalo v Heggelbachu v Německu.[10]

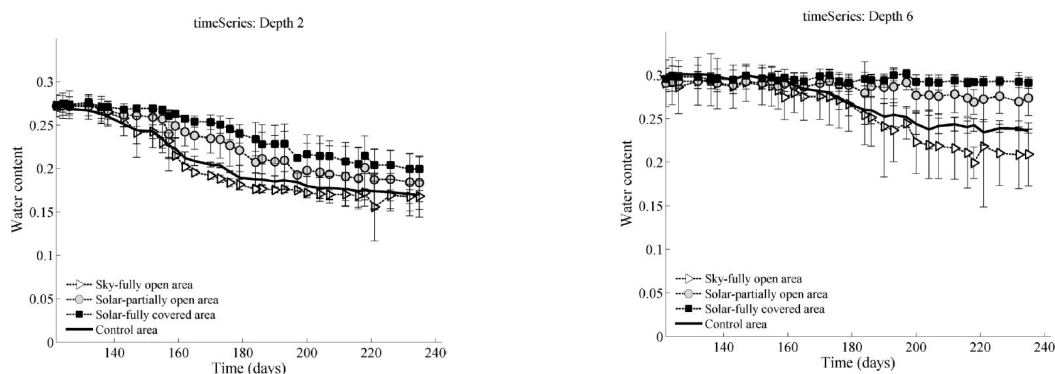
Efektivnějším využitím půdy pomocí agrivoltaiky pomůže i ve velmi závažných globálních otázkách. Současné předpoklady uvádějí, že světová populace dosáhne 8,5 miliardy lidí k roku 2030.[11] To je o půl miliardy více než v roce 2022. Proto se musí dbát na efektivnější využití místa, které zabíráme.

1.4.3 Hospodaření s vodou

Další velmi závažnou globální problematikou je nedostatek vody v budoucnosti. Pro rostlinu je voda nezbytnou součástí pro růst a fotosyntézu, kterou jsem popsal v podkapitole o slunečním záření. Zemědělství spotřebovává velké množství vody, takže je zde prostor pro zlepšení efektivity práce s vodou. V tomto případě nasazení agrivoltaického řešení může být také prospěšné.

Solární panely vytváří mikroklima nejen pro rostliny, ale i pro samotnou půdu, ze které rostliny čerpají vodu. Francouzský výzkum prováděl obsáhlou studii i na teplotu půdy. Přes den slouží solární panely jako stín, tudíž teplota půdy je chladnější přibližně o 2°C.[6] Naopak přes noc panely pracují jako izolace a udržují půdu teplejší o přibližně 1,5°C. Takové rozdíly se zpočátku mohou zdát jako nepatrné, ale v dlouhodobějším měřítku by mohly výrazně pomoci.

Dopady agrivoltaiky na teplotu půdy ovlivňují také její vlhkost. Toto je velmi důležité v lokalitách s horšími podmínkami pro zemědělství.[12] Díky dlouhodobému zastínění si půda dokáže uchovat větší množství vody během chladnějších měsíců, kterou poté využije v sušších letních měsících.

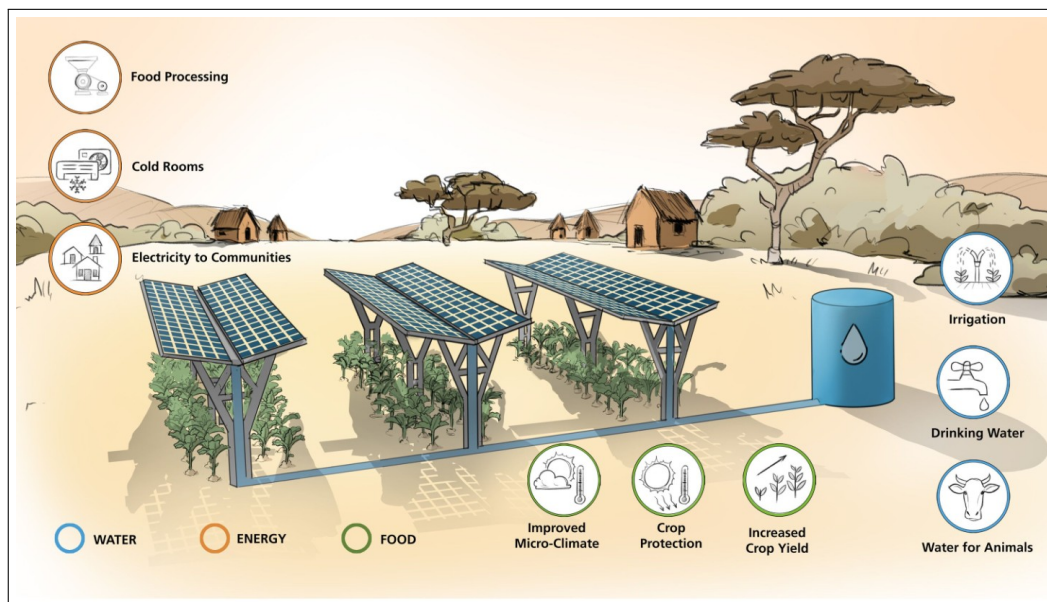


(a) Hloubka 0,2 m.

(b) Hloubka 0,6 m.

■ **Obrázek 1.13** Grafy znázorňující měření vlhkosti půdy v různých hloubkách. Měření probíhaly v různých prostředích: částečné zastínění (kolečko), plné zastínění (čtverec), žádné zastínění (trojúhelník).[12]

Z grafů je možno pozorovat značný rozdíl v míře vlhkosti podle typu zastínění. Obzvláště ve větší hloubce se vlhkost dlouhodobě drží na vysokých hodnotách. Tento rozdíl může být velmi prospěšný pro celou řadu rostlin, zvyšující jejich produkci a kvalitu.



Obrázek 1.14 Ukázka speciálního agrivoltaického řešení. Jedná se o právě probíhající projekt APV-MaGa od institutu Fraunhofer testující novou konstrukci panelů pro sběr dešťové vody.[13]

V neposlední řadě, v zemích se sušším klimatem, kde je voda ještě vzácnější zdroj, můžeme agrivoltaiku použít pro zachycování dešťové vody. Jako ukázkou již probíhajícího výzkumu institut Fraunhofer takové řešení již realizoval ve spolupráci se zeměmi Mali a Gambie, kde testují efektivitu výše ilustrovaného agrivoltaického systému APV-MaGa.[13] Právě takové řešení by mohlo být řešením pro africké státy, které poskytuje lepší hospodaření s vodou, stín pro pěstování rostlin, dodávky elektřiny do odlehlých míst a mnoho dalších.

1.4.4 Bezpečnější podmínky pro růst a stabilnější prostředí

Některé typy rostlin jsou citlivější na environmentální vlivy a právě agrivoltaické řešení poskytuje novou strukturu, která by mohla pomoci vytvořit bezpečnější prostředí pro růst.

Globální oteplování způsobuje velké výkyvy v teplotách a četnost extrémnějšího počasí jako například kroupy. Obzvláště rostlina, která je ve vegetativní fázi², je zranitelná na náhlé změny počasí. To způsobuje globálně velké ztráty, jako například u rostlin jako sója v extrémních případech až 60 procent úrody [14].

Dalším nebezpečím pro zemědělství je ptactvo. Invasze větších rozměrů může zničit podstatnou část úrody. Pro obě tyto situace, kroupy či ptactvo, by agrivoltaická konstrukce mohla poskytnout efektivní řešení jak natáhnout ochrannou síť nad rostliny. Takové řešení poskytuje zemědělství další způsob ochrany před nepříznivými situacemi.

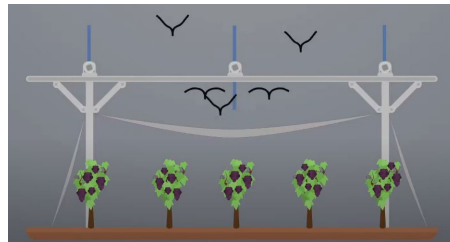
Ochranným prvkem je samotná prezenze panelů v nočních hodinách. Panely se během dne nahřívají a generují elektrickou energii. Teplota panelů během dne se v průměru pohybuje mezi 15 až 35 stupni Celsia[15]. Díky tomuto nastřádanému teplu vytváří mikroklima pro rostliny pod

²Vegetativní fáze, tzv. růstová, probíhá mezi fázemi prvotního vyklíčení z půdy a objevování květů. Více informací zde.

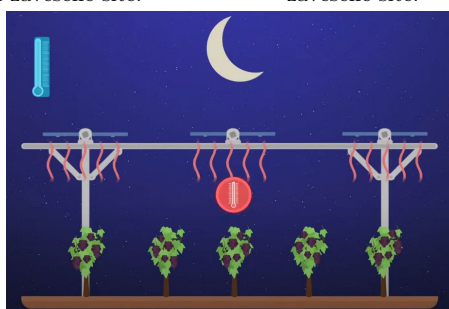
nimi a udržují je i během nočních hodin, kdy rostliny, obzvláště v jarních měsících, mohou být vystaveny nečekaným mrazům apod.



(a) Ochrana před kroupy pomocí zavěšené sítě.



(b) Ochrana před invazivním ptactvem pomocí zavěšené sítě.



(c) Během noci zahřáté solární panely pomáhají stabilizovat teplotu během studených nocí.

■ **Obrázek 1.15** Názorná schémata ukazující možnosti použití konstrukce agrivoltaických systémů. Vytváří ochrannou strukturu proti nepříznivým situacím, které mohou nastat. Ochrana proti extrémnímu počasí jako kroupy, studené noci nebo invazivním ptactvem. Obrázky byly vyňaty z videa.[16]

1.4.5 Dvojitý výdělek

Z ekonomického hlediska jsou agrivoltaické systémy taky velice zajímavé. V současnosti je trend, kdy menší farmáři, produkující lokální produkty, nedokáží udržet ceny s velkými zemědělskými firmami, které produkují velká množství potravin a díky takové masové produkci tlačí ceny níže. Jsou i případy, kdy menší farmáři nedokáží generovat dostatečné příjmy, aby udrželi chod jejich farmy. Další zajímavé uplatnění je v rozvojových zemích, kde naopak farmáři nemají téměř žádnou infrastrukturu a pracují na velmi zastaralých technologiích nebo s dieselovými přístroji. V tomto případě cena nafty a její dostupnost jsou hodně likvidační pro rozvojové země, takže zde je také agrivoltaické řešení vhodnou volbou.

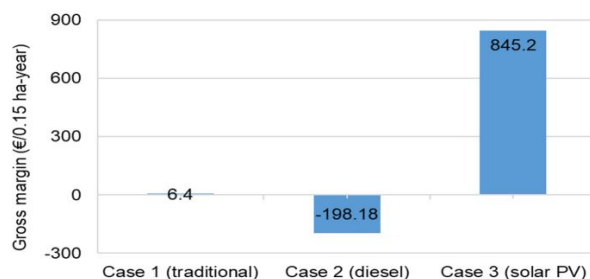
Hlavními motivacemi zavedení agrivoltaického systému jsou energetická nezávislost, používání obnovitelných zdrojů, ale především možnost generování dalšího výdělku. Pro farmáře by to znamenalo si financovat sám nebo spolufinancovat s investorem do instalace agrivoltaického systému. Farmáři by to přinášelo mnohem levnější a dostupnější zdroje elektřiny a možnost prodeje do sítě. Další výdělek farmářům pomůže k udržení se na trhu, ale zároveň pomáhá tímto všem lidem v okolí, pro které by nyní generoval elektřinu z obnovitelných zdrojů.

Pro ilustraci ekonomické proveditelnosti jsem použil studii[17], která provádí případovou studii proveditelnosti agrivoltaického systému v rozvojových zemích, konkrétně v Nigeru.

	Case 1, Traditional		Case 2, Diesel Powered Irrigation		Case 3, Solar PV Irrigation	
	CFA/ha-Year	(€/ha-Year)	CFA/ha-Year	(€/ha-Year)	CFA/ha-Year	(€/ha-Year)
Variable costs						
Human labor for different activities	60,000	91.50	1,000,000	1524.50	1,000,000	1524.50
Machinery use (hand tractor, plowing)	20,000	30.50	200,000	304.90	200,000	304.90
Seed	4000	6.10	600,000	914.70	600,000	914.70
Fertilizer	9000	13.70	700,000	1067.10	700,000	1067.10
Pesticides	1000	1.50	100,000	152.40	100,000	152.40
Miscellaneous (packaging, etc.)	3000	4.60	200,000	304.90	200,000	304.90
Irrigation use	0	0.00	5,000,000	7,622.40	437,307	666.67
Subtotal variable costs	97,000	147.90	7,800,000	11,891.0	3,237,307	4935.2
Fixed costs						
Depreciation of hand-made agro tools (for human labor)	10,000	15.20	10,000	15.20	10,000	15.20
Depreciation of diesel or solar-powered pump	0	0	937,086	1428.57	874,613.33	1333.33
Subtotal fixed costs	10,000	15.20	947,086	1443.80	884,613	1348.60
Financial costs	3567	5.00	291,570	444.00	137,397	209.46
Total costs	110,567	169.00	9,038,655	13,779.00	4,259,317	6493.26

■ **Obrázek 1.16** Rozpis všech nákladů spojených s pěstováním potravin pro 3 různé scénáře. První je tradiční případ bez použití jakýchkoliv elektrinou poháněných nástrojů. Druhý scénář započítává náklady spojené s použitím diesellového motoru pro zavlažování pole. Ve třetím scénáři se modeluje případ použití agrivoltaického systému k zavlažování. Hlavní pozornost by čtenář měl věnovat zvýrazněným hodnotám, které tvoří hlavní rozdíl mezi scénáři dva a tři.[17]

Zde můžeme pozorovat, jak by bylo ovlivněno farmaření při nasazení tradičního diesellového motoru a agrivoltaického systému. Hlavní roli v tomto případě životnost každého z řešení. V případě diesellového je uváděná životnost 7 let a jsou s ním spojeny velké náklady na kupování paliva, takže vymodelovaná roční cena pro toto řešení přesahuje 7500 € na hektar půdy. V případě agrivoltaického systému je očekávaná životnost odhadovaná na 25 let s tím, že toto řešení zároveň generuje další energii, která je odhadovaná na necelých 60 MWh ročně (po odečtení degradace a spotřeby elektřiny na provozování zavlažování)[17]. Tím pádem nastává případ dvojího výtěžku pro farmáře a případného investora v podobě prodávání vygenerované elektřiny. Ve výsledku je tedy agrivoltaické řešení levnější, než používání diesellového motoru a zároveň generuje další příjem, zvyšuje dostupnost elektřiny a také zvyšuje efektivitu zavlažování oproti tradičnímu scénáři č. 1.



■ **Obrázek 1.17** Graf nám uvádí hrubou marži jednotlivých scénářů, které byly popsány výše. Ukazuje nám profitabilitu jednotlivých scénářů a jejich dopady na proveditelnost jednotlivých řešení. Marže je uváděna pouze na 0,15 hektaru, protože tak velké jsou pole v modelové situaci.[17]

Hrubou marži lze pochopit jako přímý zisk pro osobu či společnost, kteří poskytují produkt či službu. Jedná se o rozdíl mezi příjmy z prodejů a náklady na výrobu. Často se uvádí v procentech. Více informací zde.

Z posledního obrázku lze pozorovat výslednou finanční proveditelnost daných řešení. U tradičního přístupu je velmi malý zisk, a to pouze z pěstování plodin. Pořízením dieselového motoru by se výrazně zjednodušily náklady na práci, ale dlouhodobým výsledkem jsou na druhou stranu vyšší náklady na provoz tohoto motoru, obzvláště kvůli cenám pohonných hmot. S agrivoltaickým řešením se však dostáváme do kompletně jiné situace, kde náklady na provoz motoru jsou pokryty solárními panely, ale i generování elektřiny poskytující další příjem.

1.5 Situace v ČR

V současné době je situace taková, že pro pojem agrivoltaiky a všeho co bylo zde prezentováno, nemá v České legislativě jakoukoliv zmínku natož přesnou definici a vymezení. Agrivoltaika je momentálně součástí fotovoltaických farem, kde se neuvažuje současné pěstování plodin a solárních panelů. To samozřejmě jde kompletně v rozporu s celou myšlenkou a jsou tedy nutné úpravy legislativy.

Jednou z prvních iniciativ je novela zákona o ochraně zemědělského půdního fondu[18], která zmiňuje agrivoltaické systémy, konkrétně jejich osvobození od odvodů z odnětí zemědělské půdy. V současné situaci jsou zákony nastaveny tak, aby zemědělství zachovávalo kvalitu a rozsah půdy pro maximalizování úrody. Při realizaci agrivoltaického systému by se v současnosti museli platit odvody za využití zemědělského půdního fondu pro jiné účely. Novela také plánuje zadefinovat pojem agrivoltaiky a její jasné vymezení, aby se mohla odtrhnout od současných fotovoltaických farem.

Dalším problémem v ČR pro agrivoltaiku je stavební zákon a neexistující zákonný rámec pro výstavbu agrivoltaického řešení. Není jasné definováno, zda se budou muset měnit územní plány pozemků. Tento problém je napojen na předchozí odstavec, a to na chybějící jasnou definici a spojení s klasickou fotovoltaikou.

Jak již bylo popsáno, agrivoltaické systémy by se mohly realizovat nad pěstováním celé řady plodin. V ČR bylo zatím rozhodnuto, že bude možné solární panely osadit pouze vinice, chmelnice a sady[19]. Je to zatím poměrně úzký výběr míst, kde by mohly být realizovány agrivoltaické systémy, ale jedná se o slibný začátek takových řešení v ČR.

Všechny tyto překážky reálně odrazují investory, či přímo zemědělské společnosti začít realizovat jakákoliv řešení. Česká Republika je stále poměrně malý trh a navíc nemají ani podporu ze strany státu. Nicméně, situace se každým měsícem vyvíjí a je možné, během roku 2023 by mohly být realizovány již první pilotní projekty pro agrivoltaiku v ČR. Společnost ZENERGO Energy s.r.o. již od roku 2021 propaguje témata okolo agrivoltaiky[20], začala zpracovávat pilotní projekty a přitáhla pozornost státní správy. Právě tato firma plánuje v roce 2023 realizaci prvního pilotního projektu.



■ Obrázek 1.18 Logo Zenergo s.r.o.[20]

1.6 Analýza prostředí agrivoltaického systému na vinohradu

Diplomová práce zkoumá agrivoltaické systémy, ale pro fázi návrhu a realizace je toto spektrum zúženo pouze na agrivoltaické systémy na vinohradech. Důvodem pro tento výběr je vhodnost prostředí vinohradů a vinných rév pro realizaci pilotních projektů v odvětví agrivoltaiky. Pro správný návrh monitorovacího systému je tedy zapotřebí provést detailní analýzu důležitých metrik pro vinohrady a solární panely, metrik, které tyto dvě hlavní součásti agrivoltaického systému ovlivňují nejvíce. V kapitole jsou detailně popsány metriky, které je potřeba monitorovat a jakým způsobem ovlivňují prostředí agrivoltaiky. Toto prostředí je hodně nové, takže se v kapitole diskutuje o vlivech na samotný monitorovací IoT systém a co by mohly způsobit.

1.6.1 Důležité metriky pro vinohrad

Vinohrad je polovinou agrivoltaického systému a bez něj by prostředí byla pouze solární farma. Níže je nahlédnuto na potřeby a faktory, které vinohrad nejvíce ovlivňují. Toto téma bylo diskutováno s majiteli vinohradů na jihu Moravy.

Teplota a vlhkost

Teplota a vlhkost jsou klíčovými aspekty, které ovlivňují růst a kvalitu vinné révy. Období výsadby a sklizně je také velice závislé na teplotě a vlhkosti prostředí vinohradu. Rostliny, stejně jako lidé, jsou na tyto změny prostředí velmi náchylní, ale rostliny ještě navíc mnohem více vnímají i teplotu vlhkost půdy, odkud berou podstatnou část živin a vody.

Ovzduší

Kvalita hroznů a výsledného vína je velmi ovlivněna právě teplotou a vlhkostí ovzduší. Vysoké teploty mohou vést k přezrávání hroznů, což může narušit přirozenou rovnováhu cukrů, kyselin a fenolických látek uvnitř hroznů.[21] Výsledné víno je poté nekvalitní, produkující jinou chuť, než původně mělo a často nepříjemné chutě. Ve vyšších teplotách, bez přísunu dešťových srážek, může docházet k vysoušení, čili nízké vlhkosti ovzduší. To může vést k celkové dehydrataci hroznů, menší úrodě a nižší kvalitě výsledného vína. Vhodné podmínky ovzduší jsou velice závislé na pěstované odrůdě, zeměpisných podmínkách, či typu přípravy vína, ale obecně rozmezí pro vývoj vinné révy během vegetačního období je 12 až 25°C a vlhkost v rozmezí 60% až 70%.[22]



■ Obrázek 1.19 Odrůda Syrah po úpalu způsobeným velkými vlnami horka.[23]

Půda

Nejen ovzduší, ale i teplota a vlhkost půdy hraje výraznou roli na kvalitě hroznů. Vysoké teploty půdy způsobuje přehřívání kořenů, což je může poškodit a zavinit horší vývoj kořenového systému a jako následek je nižší výnos při sklizni.[24] Také nižší teploty mají za vinu zpomalení růstu kořenů, takže rostlina dlouhodobě nemá tak dobře vyvinutý kořenový systém, opět ústící v nižší výnosnost při sklizni. Co se týče vlhkosti, tak vinná réva je obzvláště citlivá na příliš vlhkou půdu, která může vést k hnilobě kořenů. To poté může mít až za následek kompletní úmrtí rostliny, protože nedokáže získávat živiny z půdy. Obecně vhodným rozmezím vlhkosti půdy pro vinnou révu je mezi 60% a 80%, při vlhkosti nižší než 30% vinná réva přestává růst.[25]



■ **Obrázek 1.20** Nemoc zvaná černá hniloba. Způsobena houbou, která vzniká ve vlhčích prostředích v období ještě před tím než začnou růst první střípce hroznů. Projevuje se zejména kruhovými tečkami na listech a zčernáním hroznů, takže potom vypadají podobně jako sušené rozinky.[26]

Intenzita světla

Rostliny provádí fotosyntézu, během ní zpracovávají oxid uhličitý a produkují kyslík. Tento proces je přímo úměrný intenzitě slunečního záření a každá rostlina potřebuje jej v určité míře. Vyšší intenzita slunečního záření má obecně dobrý efekt, vyšší produkci polyfenolů a antokyanů, které mohou pozitivně ovlivnit chuť a aroma vína.[27] V extrémních případech však mohou způsobit oxidativní stres, který naopak snižuje výslednou kvalitu hroznů. Nedostatek slunečního záření může vést ke zpomalení růstu a vývoje hroznů, kde je výsledkem nižší cukernatost, kdy hrozny jsou kyselější a chybí jim aromatické látky zmíněné výše.

Důvod proč je ale vinná réva dobrým kandidátem pro realizaci agrivoltaických systémů je její **light saturation point** (LSP), který se pohybuje mezi 1000 až 2000 mikromolů fotonů na metr čtvereční za sekundu ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)[28]. Konkrétní hodnoty se liší od jednotlivých odrůd. Tato hodnota je relativně uprostřed na spektru pěstovaných, jako příklad rostlin s vyšším LSP jsou rajčata a rostliny s nižším LSP je obilí.

Dešťové Srážky

Dešťové srážky je věc, která nelze moc ovlivnit a má velký vliv na konečný výsledek. Nejvíce citlivá je vinná réva v období, kdy rostou střípce hroznů. Zde příliš velké množství dešťových srážek může vést k ředění, tedy snížení cukernatosti v hroznech a také, jak již bylo zmíněno, velká vlhkost je vynikajícím prostředím pro vznik různých plísní a hub.[29] Nedostatek dešťových srážek se naopak ovlivnit dá dodatečným zavlažováním, ale bez žádného zásahu tato situace může mít za výsledek snížení růstu hroznů a menší úrodu.

pH a hnojiva

Důležitou vlastností půdy je její kyselost, tedy pH. Kyselost půdy určuje množství vodíkových iontů, které ovlivňují dostupnost živin v půdě.[30] Příliš nízké, či vysoké pH má za důsledek absenci některých živin pro vinnou révu vedoucí k horšímu růstu a kvalitě hroznů. Určit optimální pH pro vinnou révu je hodně závislé na jednotlivých odrůdách a zeměpisné poloze, ale obecně se vhodné pH pohybuje v rozmezí 5,5 až 6,5. Pro zajištění správných podmínek pro pěstování vinné révy je potřeba pravidelných kontrol hladiny pH a adekvátní použití hnojiv, aby se správná hladina pH udržovala.

Hnojení je proces, kdy do půdy přidáváme dodatečné látky (často nějaká forma dusičnanů) za účelem lepší výnosnosti rostlin při sklizni. Hnojiva hrají výraznou roli při dosažení kvalitnějšího vína.[31] Je ale důležité správné dávkování hnojiv, protože přílišné hnojení může způsobit růst nadměrného množství listů. Tento případ vede k nedostatečnému růstu plodů, zhoršující celkovou kvalitu vína.

1.6.2 Důležité metriky pro solární panely

Druhou hlavní částí agrivoltaického systému jsou solární panely. Na ty každý den působí elementy, které mohou ohrozit jejich stav či výkon. Tím se tyto elementy stávají velmi zajímavými z pohledu monitorování a v návaznosti i detailní měření výkonu solárního panelu. Všechna sbíraná data by měla napomoci k detailní a lokalizované analýze stavu agrivoltaického systému a případnému včasnému zásahu údržby.

Výkon panelu

Měření výkonu panelu je důležitým nástrojem pro jeho optimalizaci. Výsledek je ovlivněn mnoha faktory jako je intenzita slunečního záření, náklon panelu nebo jeho teplota, ale nejdůležitější hodnotou je stále výkon uváděný ve Wattech. Právě jakékoliv změny oproti očekávanému výkonu značí možnou poruchu či nutnost zásahu údržby pro docílení maximálních hodnot.

Napětí a proud panelu

Pro určení výkonu se využívá závislost z Ohmova zákona. Potřebnými veličinami pro výpočet jsou elektrické napětí měřené ve voltech (V), a proud měřený v ampérech (A) generované solárním panelem. Pro získání hodnoty výkonu musíme tyto dvě měřené veličiny vynásobit,[32] výsledek je uváděn v jednotkách Watt (W).

$$P = U * I$$

V dnešní době se pro měření výkonu používají Wattmetry, který poskytují již vypočtenou hodnotu pomocí vzorce vysvětleného výše, ale detailnější monitorování může odhalit potenciální poruchy.[33] Hodnota napětí se může neočekávaně zvětšit, zlepšit tím celkový výkon solárního panelu, aniž by došlo ke změně proudu a naopak. Tyto změny oproti nominálním hodnotám, které má solární panel produkovat, mohou být potenciálním indikátorem poruchy a v horším případě by mohlo dojít k poškození panelu či zdroje.

Teplota panelu

Přímý vliv na výkon panelu má také jeho teplota. Obzvláště v letních měsících může být solární panel vystaven velmi vysokým teplotám po delší dobu, což může zapříčinit ztrátu celkového výkonu.[34] V extrémních případech teploty mohou způsobit degradaci panelu jako takového, majíc za výsledek kratší životnost. To, že se panel v letních měsících přehřívá, není moc ovlivnitelný faktor z pohledu monitorovacího systému, ale sběr takových dat může mít dlouhodobě pozitivní dopad na vývoj solárních panelů.

Intenzita slunečního záření

Množství vygenerované solární energie je přímo úměrné intenzitě a délce slunečního záření. Tato metrika je obzvláště důležitou pro výsledné měření efektivity solárního panelu. Všechny zmiňované metriky výše jsou závislé na slunečním záření a pozorováním závislosti je možné detekovat poruchy v případě neobvyklého chování jednotlivých metrik.

Stav baterií

Agrivoltaické systémy jsou zpravidla opatřeny baterií, která je potřeba i pro navrhovaný monitorovací systém. Aktuální kapacita baterie je důležitá metrika pro monitorovací systém, protože zaručuje chod systému v noci. Baterie navíc poskytuje přísun energie i pro lokální využití, takže je zapotřebí hlídat celkové zdraví baterie a jakou má reálnou kapacitu. Díky detailnímu měření stavu baterií je také možné předejít případným poruchám v případě přetížení baterie, které může vyústit ve zkrat baterie nebo její částečné poškození.

Kapitola 2

IoT v zemědělství

Kapitola se zabývá různými přístupy při realizaci IoT řešení. Jsou zde uvedeny možnosti a jaké jsou současné trendy. Nějaká IoT řešení již v zemědělství existují, jsou uvedeny jasné rozdíly oproti případu agrivoltaiky. Hodně společných rysů mají také projekty chytrých měst. Zde je proveden náhled na to, jak jsou realizovány širší sítě na velkých prostranstvích. Bližšímu zkoumání jsou podrobeny technologie pro vytvoření bezdrátové komunikace v sítích, jaké jsou jejich případy využití a volba vhodné technologie pro použití v agrivoltaických systémech. Obdobně zkoumány jsou protokoly pro posílání zpráv v sítích, zakončeno volbou vhodného kandidáta pro účely návrhu v další kapitole.

2.1 Technologie

Ve světě IoT se již nachází celá řada technologií. Cílem této kapitoly je si technologie projít, popsat a vybrat vhodného kandidáta pro využití v podmínkách agrivoltaického systému.

V kapitole se rozebírá jaké technologie jsou potřeba pro realizaci komunikace ať už bezdrátové či drátové a následně jaké protokoly na takové síti použít pro přenos zpráv. Popsány jsou případová použití jednotlivých technologií.

2.1.1 Drátové vs Bezdrátové zapojení

Sítě, jak je dnes známe, se dělí podle typu zapojení na drátové a bezdrátové. Oba přístupy mají své charakteristiky a jiné případy využití. Drátové zapojení je z historického hlediska starší a jedná se fyzické propojení dvou zařízení pomocí kabelu. Typy kabelů a standardy jsou různé. V dnešní době drátové sítě tvoří velkou část páteřních sítích napříč celým světem. Hlavními přednostmi drátového zapojení je dobrá stabilita sítě a vysoká přenosová rychlost. Na druhou stranu omezujícím faktorem je nutnost fyzického zapojení.

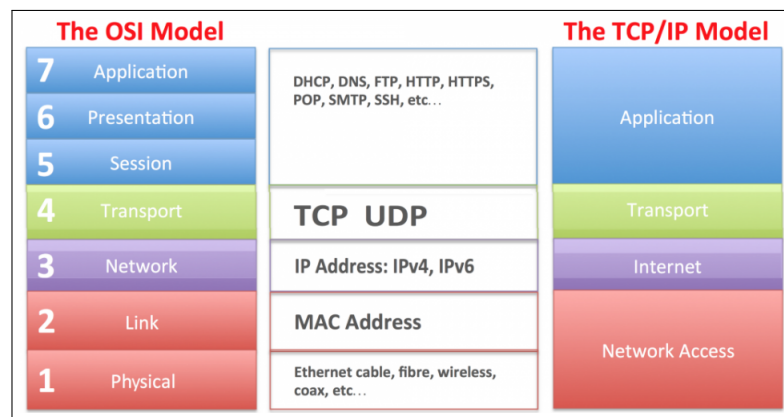
Na druhou stranu bezdrátové zapojení je naprostý opak. Jedná se o propojení dvou zařízení takzvaně *bez kabelu*, takže pro realizaci se používají elektromagnetické vlny o různých frekvencích. Technologie posílání signálů vzduchem začínala na velmi jednoduchých zařízeních jako například dálková ovládní. Nyní se však bezdrátové technologie používají velice hojně napříč všemi typy průmyslu pro navázání komunikace. I infrastruktura bezdrátových sítí, která je provozována pomocí vysílačů na vyvýšených místech či družicemi na oběžné dráze, je výrazně větší a neustále se rozšiřuje a nabírá na popularitě.

Popularita bezdrátových technologií je velmi velká i ve světě IoT. Hlavní výhodou je možnost přesunutí měřících zařízení na libovolná místa, aniž by za sebou musely táhnout kabel. Pro účely této diplomové práce má tedy smysl se nadále zajímat pouze o bezdrátové technologie a protokoly realizované na tomto typu sítí.

2.1.2 Technologie bezdrátové komunikace

V této části jsou popsány technologie realizující bezdrátovou komunikaci. Každá technologie je představena, jaké jsou její případy použití, hlavní přednosti technologie. Po výčtu technologií následuje zhodnocení vhodné technologie pro řešení agrivoltaického systému v rámci této diplomové práce.

Obecně všechny níže zmíněné technologie pracují na vrstvách 3 a 4 teoretického modelu ISO/OSI[35] (některé realizují i vyšší vrstvy). To bude popsáno blíže u jednotlivých technologií. Zaručují zařízením navázat spojení, unikátně se označit a umožňují směrování zpráv.



■ **Obrázek 2.1** Teoretický model ISO/OSI a TCP/IP. Oba tyto modely následují velmi podobná pravidla. Jediná změna u TCP/IP modelu je agregace spodních dvou vrstev na fyzickou vrstvu a vrchních tří na aplikační vrstvu.[36]

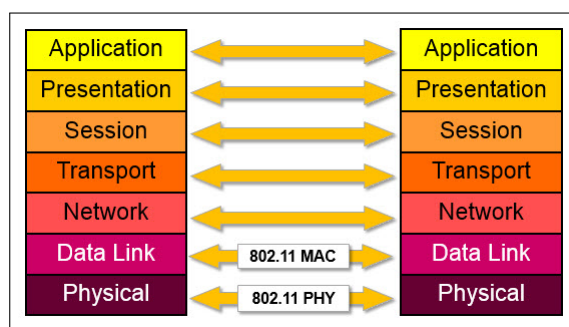
WiFi

Nejznámější technologií pro realizaci bezdrátové připojení je pravděpodobně WiFi. Jedná se o multifunkční technologii založenou na standardu IEEE 802.11 [37], který specifikuje bezdrátové lokální sítě (WLAN). Lokální síť je definována jako síť o rozsahu v řádek až jednotek kilometrů v otevřených prostorách, ale tento údaj je také velice závislý například na velikosti vysílače nebo rušení.

Každá WiFi síť musí mít přístupový bod (access point - AP)[38], který zajišťuje dostupnost signálu a možnost připojit se do dané sítě. Tím pádem WiFi síť tvoří hvězdicovitou topologii, kde se všechna zařízení připojují k jednomu přístupovému bodu, aby mohly spolu následně komunikovat.

Tato technologie je velice univerzální a široce používaná. Je velice jednoduše implementovatelná do jakéhokoli řešení a podporovaná téměř každým chytrým zařízením v dnešní době.

Díky již mnohaleté existenci, představena roku 1999[39], je tato technologie již velmi dobře zavedena a otestována. Poskytuje všem výrobcům jednoduchou a stabilní platformu pro realizaci dalších síťových vrstev. Na teoretickém modelu ISO/OSI WiFi realizuje data-linkovou a fyzickou vrstvu[40].



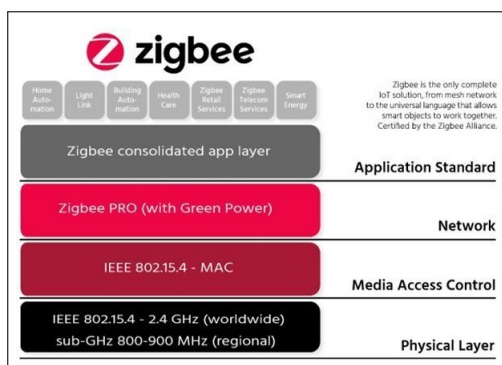
■ **Obrázek 2.2** ISO/OSI síťový model a znázorněné vrstvy, na kterých pracuje WiFi. Standard IEEE 802.11 definuje hodně detailně fungování WLAN sítí, takže pro upřesnění jsou zde ukázány dvě velmi důležité části tohoto standardu, a to 802.11 MAC a 802.11 PHY.[40]

Hlavními přednostmi technologie WiFi je její jednoduché použití, dobrý dosah a také přenosová rychlost. V dnešní době jsou už různé verze standardu pro WiFi, ale nejpoužívanější verze dosahují desítek až stovek Mbit/s bit-rate¹, takže je ideální na posílání libovolného množství dat.

Naopak hlavní nevýhodou WiFi je její vysoká energetická náročnost. Ve světě IoT mohou být zařízení napájena pouze z bateriových článků, takže je nutná značná optimalizace používání WiFi či volba jiné technologie. V případě agrivoltaického systému jsou zařízení přímo u zdroje generování elektřiny, tudíž by neměl být problém s napájením. Tento fakt tedy nevyřazuje WiFi jako kandidáta pro takové řešení.

ZigBee

Zigbee je technologie navržená na IEEE standardu 802.15[41]. Hlavní účel a využití této technologie je pro M2M² komunikaci v IoT sítích. Realizuje sítě o velikostech řádu jednotek až pár desítek metrů (WPAN³) a zaměřuje se na nízko nákladové přenosy dat. Technologie je navržena pro posílání malého množství dat uvnitř sítě, skládající se převážně pouze z jednoduchých hodnot, které si zařízení předávají.



■ **Obrázek 2.3** Ukázka celého technologického stacku Zigbee, kde poskytuje řešení napříč všemi vrstvami síťového modelu. V obrázku lze pozorovat mnohé vlastnosti této technologie jako například práce na různých frekvencích.[41]

¹Bit-rate nám udává množství bitů přenesených za jednotku času. Často se uvádí v kbit/s. Více informací zde

²M2M - komunikace probíhající pouze mezi 2 zařízeními bez narušení člověkem.

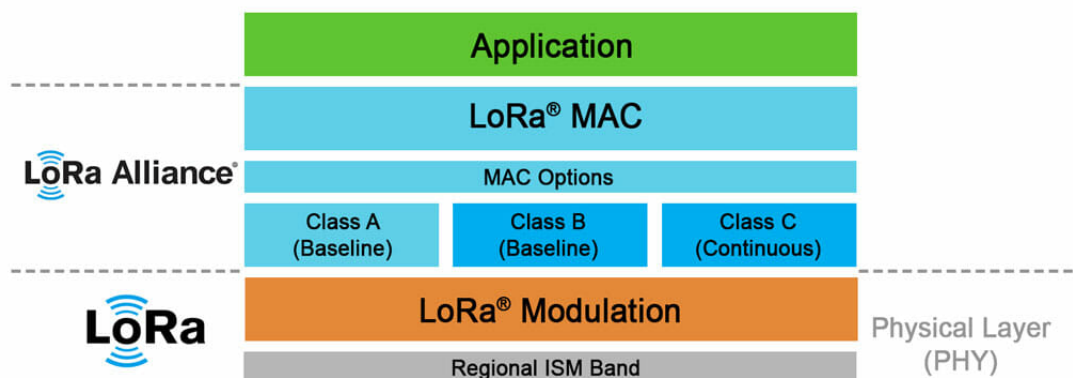
³Malá bezdrátová síť, která nepotřebuje skoro žádnou infrastrukturu, operující na krátké vzdálenosti. Typicky využito v rámci jedné místnosti pro bezdrátové propojení. Definice ze stránek NIST zde

Hlavní předností oproti technologii WiFi je topologie sítě, kterou Zigbee vytváří. Základní topologií je totiž mesh[42], která každé zařízení v síti spojí se částí nebo všemi ostatními zařízeními v dosahu. Takové řešení poskytuje kvalitní úroveň redundance, která zlepšuje stabilitu celé sítě.

Největší nevýhodou technologie Zigbee je však její specifická implementace a špatná kompatibilita mezi zařízeními od různých výrobců. Navíc samotný vývoj a používání této technologie není tak jednoduchý jako je WiFi. Jsou zde snahy o vytvoření lepší a hlavně jednotné platformy pro Zigbee (s příchodem Zigbee 3.0)[43], ale zatím se ukazuje, že je situace s kompatibilitou mezi výrobci stále poměrně nekonzistentní. Existuje velká řada firem a řešení používající Zigbee technologii, takže pro realizaci IoT sítě v agrivoltaickém systému je stále kandidátem.

LoRa

Velmi populární a pozornosti hodná je technologie LoRa. Tento název je zkratkou pro slova *Long Range* a jedná se o technologii používající radiových vln jako hlavního nosiče informací. Pro modulaci signálu LoRa používá *Chirp Spread Spectrum* (CSS)[44].



■ **Obrázek 2.4** Schéma práce LoRa technologie v rámci LoRa Alliance. Jednotlivé vrstvy jsou přibližně namapovány na teoretický síťový model ISO/OSI. Na spodních (fyzických) vrstvách pracuje právě zmiňovaná LoRa, vyšší vrstvy zajišťuje další produkt LoRa Alliance, a to LoRaWAN protokol, o kterém je psáno níže.[45]

Upravuje rádiové signály na krátké impulzy různé délky a frekvence ⁴ za účelem získání odolnosti proti různým typům rušení přenosu. LoRa operuje v nelicencovaných frekvenčních pásmech, které jsou pro každý kontinent jiné[45]:

- 169 MHz
- 433 MHz (Asie)
- 868 MHz (Evropa)
- 915 MHz (Severní Amerika)

Díky těmto vlastnostem, jako práce na radiových vlnách o nízkých frekvencích, dovoluje technologii LoRa vysílat informace přes velké vzdálenosti řádově desítky kilometrů bez překážek.

Celkový bit-rate této technologie je však velice nízký, takže není úplně vhodná pro posílání velkého množství dat obecně. Ideálním případem využití je lokálně monitorovat situaci a následnou změnu v podobě notifikace posílat na velké vzdálenosti. Například pro kontinuální sběr dat a následné přeposílání těchto dat není úplně ideální pro technologii LoRa.

⁴Video vysvětlující CSS modulaci pro technologii LoRa zde.

Této technologii by se dalo velice dobře využít pro propojení vícero agrivoltaických systémů či projení agrivoltaiky do již existujícího chytrého zemědělství. Tato práce však s napojením na chytré zemědělství nepočítá.

GPRS

Jako poslední relevantní technologie je GPRS. Jedná se opět o přenosovou technologii, která využívá rádiových vln pro přenos dat a navázání spojení. Většina čtenářů si tuto technologii může spojit s mobilními telefony, protože na ni stále fungují mobilní operátoři.

Hlavní klíčovou výhodou této technologie je téměř globální pokrytí, takže s dostupností signálu nejsou na běžných místech problémy. Horší pokrytí má pouze v hůře dostupných oblastech jako například horské oblasti. Obrovská výhoda je dosah, protože umožňuje odesílat data přímo do internetu nebo jakémukoliv jinému zařízení v síti, tedy kdekoliv na planetě.

Bohužel tato technologie má svá úskalí, a to nutnost použití SIM karet pro umožnění připojení do sítě. Další nevýhodou je také nízká přenosová rychlost, která činí až 170kB/s[46], ale v reálném světě se pohybuje spíše okolo 20-50kB/s. Takže není vhodná ani pro přenos většího množství dat.

V dnešní době je tato technologie vytlačena jinými jako jsou například LTE (4G) či 5G technologie. Principem se velmi podobají popisovanému GPRS, ale přenosová rychlost se mnohonásobně zlepšila a například s technologií 5G se také výrazně zlepšuje dostupnost.

2.1.3 Výběr vhodné technologie

Při výběru vhodné technologie pro agrivoltaické řešení se přihlíží na následující kritéria:

- Rozsah sítě, kterou technologie může vytvořit a spravovat
- Bit-rate, čili množství dat pohybující se v síti
- Energetická náročnost technologie při používání
- Složitost použití dané technologie

Pro přehledné porovnávání jsou všechny kategorie uvedeny ve sloupcích a jednotlivé výše zmíněné technologie v řádcích. Poté průnik každého řádku se sloupcem uvádí charakteristiku technologie pro danou kategorii.

Shrnutí charakteristik jednotlivých technologií				
Název technologie	Rozsah sítě	Bit-rate	Energetická náročnost	Složitost použití
WiFi	LAN	Vysoký	Vysoká	Jednoduché
Zigbee	PAN	Nízký	Nízká	Obtížnější
LoRa	WAN	Nižší	Nízká	Obtížnější
GPRS	WAN	Nízký	Vysoká	Jednoduché

■ **Tabulka 2.1** Tabulka porovnávající jednotlivé technologie. Zelené barva značí dobrý výsledek pro danou kategorii, červená špatný výsledek a oranžová barva neutrální.

Všechny zmíněné technologie můžeme rozdělit do dvou skupin podle rozsahu sítě.

Jednu skupinu tvoří technologie WiFi a Zigbee, které realizují síť v rozsazích LAN a PAN, což bychom mohli označit za menší síť. Pro použití v agrivoltaickém systému se tento typ rozsahu hodí pro realizaci komunikace přímo na místě pro komunikaci mezi zařízeními či lokální sběr dat. Při přihlídnutí na další charakteristiky lze pozorovat, že jsou si technologie takovým protikladem podle tabulky výše. WiFi má poměrně vysoký bit-rate, umožňující sběr velkého množství dat, ale toto je za cenu poměrně vysoké spotřeby energie v porovnání s technologií Zigbee. Rozhodujícím

faktorem je však samotná složitost použití, kde Zigbee je limitována na specifické čipy a výrobce, kteří technologii využívají. WiFi je v tomto hledisku mnohonásobně lepší a umožňuje použít celou škálu zařízení podporující tuto technologii. Obě technologie mají své užití ve světě IoT, ale jelikož v případě agrivoltaického systému kategorie energetické náročnosti není rozhodující, tak má WiFi jednoznačně navrch.

Druhá skupina jsou technologie LoRa a GPRS. Tyto sítě tvoří spojení na velké vzdálenosti a tedy se nabízí pro propojení agrivoltaického systému do zbytku světa. Další kategorie jsou bit-rate, což je v obou případech poměrně nízký, ale tady se předpokládá nízká frekvence posílání dat, tudíž není rozhodujícím kritériem. U energetické náročnosti je zde značný rozdíl, kde LoRa si zakládá na nízké spotřebě a tudíž je ideálním řešením pro případy, kdy energetickou náročnost potřebujeme minimalizovat. V případě agrivoltaického systému toto problém není, tudíž není opět rozhodujícím kritériem. Nakonec stejně jako u předchozí skupiny je rozhodující samotná složitost použití dané technologie, protože LoRa je opět omezena na specifické čipy umožňující použití této technologie. Obě tyto technologie jsou široce používané ve světě IoT, ale pro účely agrivoltaického systému se zdá technologie GPRS lepším kandidátem. Technologie LoRa by se dala použít například pro propojení agrivoltaického řešení do zbytku existujícího chytrého hospodářství pro další možnosti automatizace. Hlavní a rozhodující výhodou technologie GPRS je její velká dostupnost na odlehlejších lokalitách.

Vhodnou volbou technologií pro realizaci komunikace v agrivoltaických systémech jsou technologie WiFi a GPRS. Pomocí WiFi může probíhat lokální sběr dat a GPRS dokáže odesílat notifikace nebo reporty na velké vzdálenosti.

2.1.4 Protokoly pro posílání zpráv

Po navázání spojení mezi zařízeními a s vnějším světem je potřeba zjistit, jak konkrétně si budou zařízení zprávy posílat. To, jak taková komunikace může probíhat, je popsáno v této části kapitole, kde je zúžený výběr těchto technologií na ty relevantní pro svět IoT.

Obecně všechny níže zmíněné technologie pracují na vrstvách 5 až 7 teoretického modelu ISO/OSI[35]. je zde popsáno jak technologie funguje, jaké jsou její výhody či nevýhody v prostředí agrivoltaických systémů.

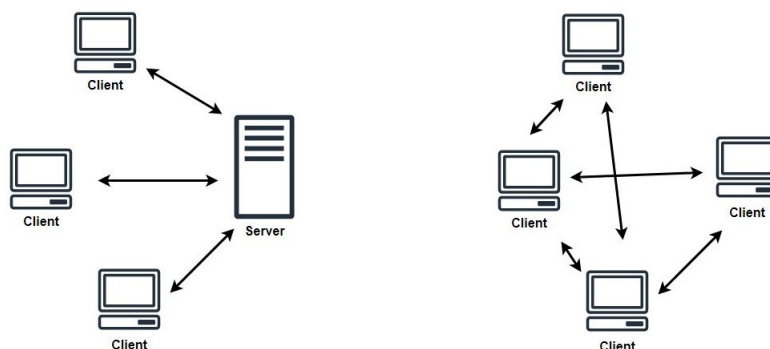
V závěrečné části této podkapitoly jsou shrnuty poznatky a charakteristiky jednotlivých možností a jaké technologie by bylo vhodné použít pro realizační část diplomové práce.

Principy komunikace

Z pohledu komunikace v síti jsou dvě skupiny, do kterých se protokoly mohou rozdělit. První skupina jsou protokoly komunikující na principu klient-server a druhá skupina je peer-to-peer.

Klient-server protokoly mají vždy jeden server, ke kterému se připojuje větší množství klientů[47]. Komunikace probíhá čistě mezi klientem a serverem, klienti mezi sebou na přímo nikdy nekomunikují.

Typickou charakteristikou klientů je, že je jich více než serverů, jsou obvykle připojeni pouze k pár serverům a posílají požadavky serveru. Na druhou stranu server je na tom téměř opačně, kdy k serveru je připojeno podstatně větší množství klientů, zpracovává a odpovídá na jejich požadavky. V případě sítí velikosti LAN, které přibližně budou v agrivoltaickém systému, se můžeme bavit o jednom, či velmi malém počtu serverů zpracovávající data od velkého množství klientů.



■ **Obrázek 2.5** Ukázky principů komunikace. Vlevo je princip klient-server a vpravo princip peer-to-peer.

Navazování komunikace v takovém lokálním prostředí tedy bude přímo se serverem, běžně tvořící hvězdicovou topologií. Pro tento případ je tedy favorizovaná spolupráce s technologií WiFi, která spojuje v hvězdicové topologii všechna zařízení v dosahu, takže by pro dobrou dostupnost stačilo umístit takový server do místa access pointu.

Peer-to-peer je technologie, kdy je vlastně celá komunikace decentralizována a neexistuje žádný server jako v předchozím případě[48]. Klienti navazují komunikaci přímo mezi sebou a vytváří si komunikační kanály.

Z pohledu celkové struktury takové sítě, tak pro peer-to-peer síť, je charakteristickou topologií mesh, kde se zařízení připojují na více zařízení ve svém dosahu. Takové sítě bývají často velice robustní, kdy při výpadku jednoho zařízení se většinou neztrácí dostupnost ke všem zařízením v síti, čili tvoří redundantní cesty. Naopak velkou nevýhodou takové sítě je nižší přenosová rychlost, právě na úkor vysoké redundance. V IoT světě se peer-to-peer sítě využívají velmi hojně například pomocí technologií Zigbee, ale lze je realizovat i na WiFi.

Obsah této diplomové práce je primárně zaměřen na téma sítě v IoT, takže v následujících podkapitolách bude pouze výběr pár protokolů, které se v současnosti velmi hojně používají. Tyto protokoly budou představeny a vysvětlen princip fungování a struktury celé sítě. Také budou vysvětleny jednotlivé přednosti každého protokolu a jak by se dal použít pro případ agrivoltaického systému.

MQTT

Jedním z nejrozšířenějších komunikačních protokolů je MQTT [49]. Celý název této zkratky je *Message Queuing Telemetry Transport*. Jedná se o protokol, který se zaměřuje na sdílení dat a komunikaci M2M na menších přenosových pásmech. Tento protokol se primárně zaměřuje na malá zařízení a snaží se minimalizovat jakoukoliv zátěž navíc pro CPU. MQTT protokol umí pracovat v sítích s měnící se latencí, či občasným omezením dostupnosti. To dělá tento protokol vhodným pro velkou škálu různých oblastí, jako je automobilový průmysl, logistika, výrobní průmysl, chytré domácnosti a jiné.

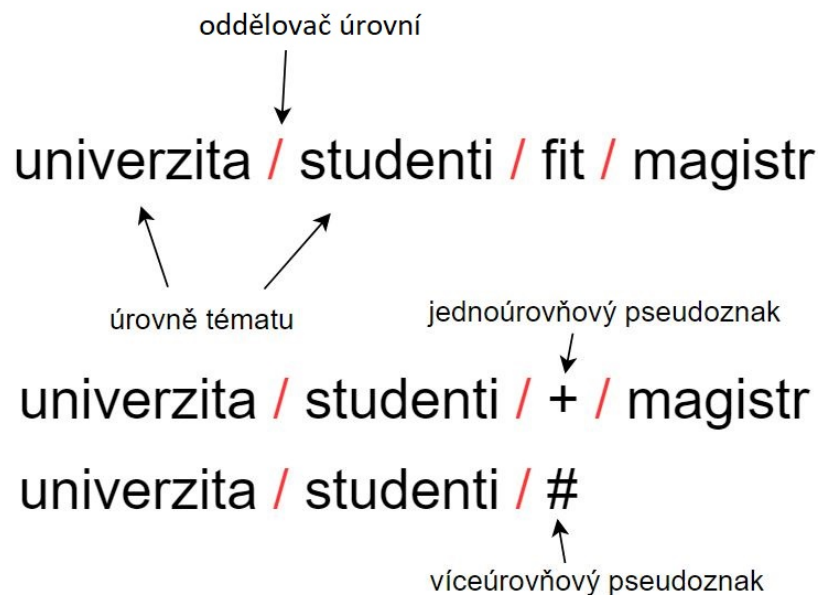
Princip fungování MQTT je hodně podobný modelu klient-server.[50] Jsou zde tedy dva typy zařízení, klient a broker neboli server. Oba typy zařízení se přihlašují do různých témat (topics) a následně mohou i publikovat zprávu do nějakého tématu. Následuje podrobnější popis jednotlivých aktérů a principů, které se v protokolu odehrávají.

Základním stavebním kamenem MQTT sítě je broker. Jedná se o server, který zastává roli takové prostředníka v celé síti. Pro představu by se fungování brokera dalo přirovnat k fungování pošty v reálném světě, kde klienti posílají své zprávy označené nějakým tématem, broker tyto zprávy přijímá a následně je odesílá všem správným příjemcům. Co se týče efektivity takového brokera, tak by měl dokázat zpracovávat velké množství zpráv a také velké množství klientů

(řádově klidně tisíce), stejně jako server v klient-server modelu. Na internetu se vyskytuje velká spousta různých MQTT brokerů ať už opensource nebo komerčních řešení. V tomto případě si člověk musí umět vybrat podle velikosti jeho sítě, škálovatelnosti, integrity atd. Pro příklad jedním z nejznámějších opensource brokerů je Mosquitto a z komerční sféry je to například HiveMQ, který je navržen pro enterprise řešení.

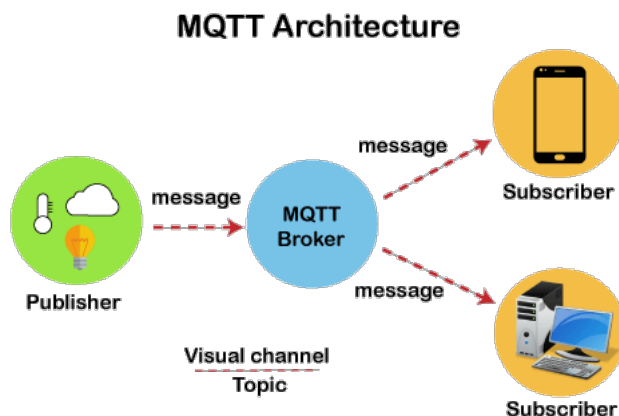
Broker sice zpracovává zprávy a posílá je všem správným adresátům, ale bez zařízení, které ty zprávy odesílá se taková síť neobejde. Tuto roli zastupuje MQTT klient. Klient má dvě možnosti, může se přihlásit k nějakému tématu, nebo může do něj publikovat nějakou zprávu. Možnost přihlásit se k tématu a publikovat zprávy do stejného tématu se nevylučují a v reálném užití klient využívá obou těchto možností. Naopak existují klienti, kteří pouze publikují zprávy, například čidla na měření dat bez další logiky, nebo naopak zprávy pouze odebírají, to mohou být koncová zařízení jako terminál nebo nějaký dashboard. V případě klientů neexistují hotová řešení jako pro brokery, ale existuje velké množství knihoven pro používání MQTT protokolu a napojení se do sítě s brokerem. Existují knihovny pro programovací jazyky jako C, C++ nebo Java, ale i pro specifická zařízení jako jsou Arduino či ESP.

Všechny zprávy v MQTT síti musí být označeny unikátním řetězcem znaků, tématem. Formát tématu je v UTF-8 a jediným požadavkem na téma je, aby název tématu měl alespoň jeden znak. Dále je důležité říct, že je MQTT citlivé na velikosti písmen, takže je nepsaným pravidlem, že se všechny témata píšou malými písmeny. Témata mohou také mít několik úrovní, které jsou odděleny lomítkem. Další důležitou vlastností při psaní témat je používání pseudo znaků (wildcards), které zastupují jednu nebo více úrovní v názvu témata:



■ **Obrázek 2.6** Příklad formátu téma v protokolu MQTT. Téma se skládá z několika úrovní jdoucí zleva doprava, které jsou odděleny lomítkem. Zde je víceúrovňové rozdělení témat použito nejdříve pro specifikování tématu univerzita, zúžení daného tématu pouze na studenti, poté na studenty FIT a v poslední úrovni pouze na studenty magisterského studia. Kdybychom chtěli zúžit toto téma přidáním další úrovně, tak bychom to mohli specifikovat na ročník nebo konkrétní předmět. Na druhém a třetím řádku jsou ukázány dva zástupné znaky pro jednoúrovňové a víceúrovňové zastoupení. V tomto příkladu znak plus zastupuje jednu úroveň a řekneme, že tato úroveň reprezentuje fakultu, na které studenti studují. Tím pádem by toto téma by pokrývalo všechny studenty na univerzitě, kteří studují magisterské studium. V případě znaku křížku se jedná o víceúrovňové zastoupení, tedy tady v tomto tématu jde o všechny studenty na univerzitě.

Aby klienti mohli dostávat nějaké zprávy, tak se tedy k nějakému tématu musí přihlásit. Broker si vede seznamy témat vyskytujících se v síti a ke každému tématu všechna zařízení, která toto téma odebírají. Klient může poslat zprávu do libovolného tématu. Když brokerovi přijde zpráva, vybere všechna témata, kterých se daná zpráva týká a přepośle jim celou zprávu.



■ **Obrázek 2.7** Diagram fungování MQTT sítě. Je možné vidět brokera a další tři klienty. Dva z nich odebírají témata, o která se zajímají, a třetí klient je zjevně nějaká meteorologická stanice, která publikuje všechna svá data do sítě. Při publikaci broker zprávu přijme a následně je odesílá správným adresátům.[51]

Nejdůležitějšími benefity proč použít MQTT protokol jsou:

- Nízké vytížení sítě (publikace a odebírání témat)
- Efektivní posílání dat, samotné zprávy jsou hodně malé
- Nízká energetická náročnost protokolu

Na druhou stranu velkým mínusem pro protokol MQTT je to, že zprávy nejsou šifrovány. Používá se jen TLS/SSL protokolu pro bezpečný přenos zprávy, ale samotný obsah není zašifrován.

Jak již bylo zmíněno, MQTT protokol se velmi hojně používá v IoT světě pro implementaci nejrůznějších řešení jako například synchronizace zařízení napříč sítě (požární hlásiče, automatické hašení, ...) nebo ve senzorových sítích sbírající velké množství dat. Všechny tyto vlastnosti protokol MQTT dělají vhodným kandidátem pro použití v agrivoltaickém řešení.

ESP-NOW

Za zmínku také stojí technologie ESP-NOW. Jedná se o komunikační protokol navržený pouze pro čipy od výrobce ESP. Takže využitelnost takové technologie je značně užší, nicméně tyto čipy jsou v poslední době poměrně populární, zejména kvůli své nízké ceně.

Zařízení spojená tímto protokolem jsou čistě peer-to-peer a poskytují zašifrovanou či nezašifrovanou komunikaci.[52] Velkou limitací tohoto protokolu je však omezený počet sousedů na 10 v případě šifrované komunikace.

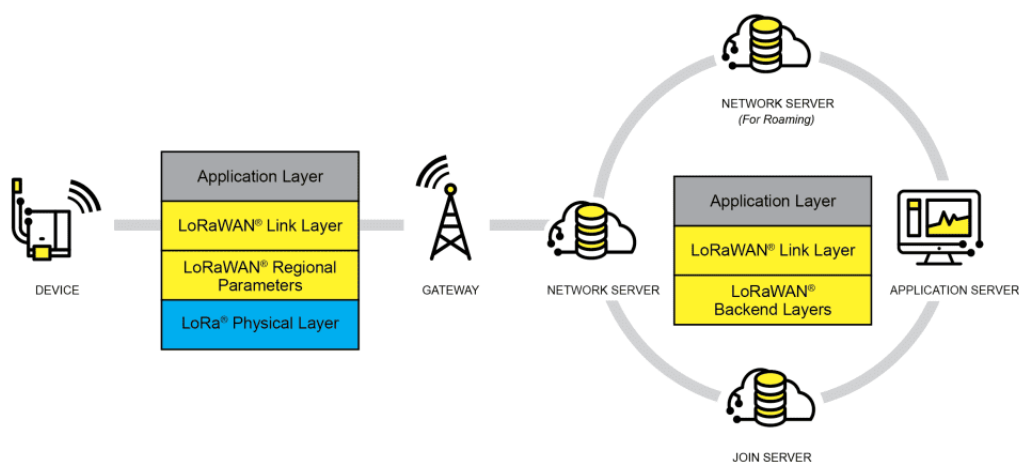
Pro účely realizace agrivoltaického systému je tento protokol hodně jednoduchý a s celkem velkou limitací. Bylo by potřeba implementovat celou nadstavbu pro tento protokol, která by řídila komunikaci v síti, když už kompletní řešení poskytují jiné protokoly.

Nicméně by se tato technologie dala využít pro kompletní vlastní implementaci nějakého rozšířeného protokolu. Navíc je to technologie od stejné firmy jako jsou čipy, tudíž se dá předpokládat nízká spotřeba a efektivní implementace daného protokolu.

LoRaWAN

Protokol LoRaWAN využívá technologie LoRa, která je popsána v předchozí sekci. Pro rychlé zopakování, přednostmi protokolu jsou vysoká vzdálenost spojení, nízká spotřeba baterie a již široké použití napříč různými odvětvími průmyslu. Je to protokol designovaný jako LPWA pro IoT svět.[53]

Veškerá komunikace v LoRaWAN síti probíhá mezi bránami (gateways) a jednotlivými zařízeními. Aby zařízení vůbec mohlo komunikovat pomocí toho protokolu, potřebuje být osazeno správným čipem, který dokáže přijímat a vysílat rádiovou komunikaci v modulaci jaké LoRa používá. Když je tento předpoklad splněn, zařízení následně může navázat spojení s bránou či bránami na poměrně velkou vzdálenost. Veškerá další komunikace putuje přes tyto brány do druhé poloviny sítě LoRaWAN, která je připojena k internetu.



■ **Obrázek 2.8** Schéma architektury protokolu LoRaWAN. Lze názorně vidět které vrstvy síťového modelu protokol zajišťuje nejdříve při spojení zařízení s bránou a pak v následné distribuci dat po internetu.[53]

Přenosové rychlosti se pohybují mezi 0,3 kbps až 50 kbps. Jak technologie LoRa, tak i LoRaWAN nejsou uzpůsobeny pro vysokorychlostní přenosy dat či posílání velkého množství malých zpráv. Toto samozřejmě v IoT světě tolik nevádí a zařízení si většinou postačí s velmi jednoduchými zprávami. Z bezpečnostního hlediska protokol používá dvě vrstvy kryptografie. Obě vrstvy AES s klíčem o délce 128 bitů pro šifrování komunikace mezi zařízením a serverem, kam se data posílají, a na aplikační vrstvě.

Využití protokolu LoRaWAN je pro účely agrivoltaického systému kompletně validní a v mnohých případech i vhodným řešením. Například při napojení agrivoltaického systému do zbytku chytrého zemědělství v rámci jedné konkrétní farmy či družstva. Jedinou potíž může znamenat pokrytí, čili nějaký přístup k bráně do LoRaWAN sítě. Tento požadavek nelze vždy splnit a případně by to vyžadovalo vytvoření úplně nové brány.

2.2 Problémy nasazení IoT technologií v agrivoltaickém systému

Nasazení IoT technologií v agrivoltaickém systému je kompletně nový případ užití, který má svou specifickou kombinaci problémů a požadavků k jejich zabránění. Je zde diskutováno o problémech jako absence stálého napájení, vystavení zařízení vlivům počasí nebo potřeba ochrany zařízení a celého objektu proti vandalismu.

2.2.1 Možnosti napájení

IoT technologie jsou závislé na infrastruktuře a přístupu ke stálému napájení ze sítě. To ovšem v zemědělství je podstatným problémem, protože mít přístup k napájení na poli není možné, takže jakákoliv realizovaná řešení se snaží používat bateriových zdrojů. Klíčovým faktorem je zde také optimalizace spotřeby energie, aby bateriové zdroje vystačily na dlouhou dobu a nemělo zbytečné náklady na údržbu celého řešení. Představa výměny či dobíjení baterií jednou za měsíc je naprosto nevyhovující, takže musí být kladen důraz na optimalizaci spotřeby energie.

Myšlenka agrivoltaického systému je však založena na poskytování solární energie lokálně a přebytečnou část prodávat do sítě ostatním. Tudíž problém s absencí stálého napájení agrivoltaický systém řeší a poskytuje úplně novou úroveň infrastruktury, která na polích a vinohradech doposud neexistovala. Nicméně agrivoltaika je stále ještě hodně mladým oborem a nepodařilo se mi zjistit, jakým konkrétním způsobem by byl systém schopen dodávat napájení pro IoT monitorovací systém. Pilotní myšlenkou je mít výstup pro napájení u každého solárního panelu a každé zařízení bude mít své vlastní bateriové zařízení. Ukazuje se, že možná vhodnějším řešením by mohlo být bateriové zařízení rozmístěno v síti po různých sektorech, aby bylo napájení dostupné napříč celým agrivoltaickým systémem a zařízení by se jen napojily k baterii.

2.2.2 Živelná rizika

Jelikož se řešení vyskytuje ve venkovní prostorách, je potřeba brát v úvahu i živelná rizika, která mohou ovlivnit chod monitorovacího systému. Předpokládá se, že systém bude fungovat v nepřetržitém provozu celý rok. To s sebou přináší první požadavky a těmi je **provozní teplota**, která musí vyhovovat teplotám v dané lokalitě napříč celým rokem.

Dalším velmi závažným rizikem jsou hmyz a škůdci. Při pěstování jakýchkoliv plodin se vyskytují nejrůznější druhy hmyzu a jakékoliv elektronické součástky musí být chráněny před možným poškozením.

Velkým rizikem pro veškerou elektroniku je přímý styk s vodou. Aby se předešlo poškození zařízení monitorovacího systému, musí být uzavřeny ve vodě odolné skříňce či obalu, který poskytuje dostatečnou ochranu. Pro tyto účely se používají stupnice krytí IP (Ingress protection) [54], které se skládají ze dvou čísel. První udává odolnost vůči pevným tělesům, jako například prach, a druhé číslo udává odolnost vůči kapalinám, například vodě.

Stupeň krytí	Popis
IP65	Ochrana proti prachu a střednímu proudění vody
IP67	Ochrana proti prachu a krátkodobému ponoření do vody
IP68	Ochrana proti prachu a trvalému ponoření do vody

■ **Tabulka 2.2** Příklady nejpoužívanějších stupňů krytí.

2.2.3 Vandalismus

Velmi závažnou hrozbou pro agrivoltaiku i monitorovací systém jsou lidé, kteří přichází za účelem poškození objektu. Předpokládá se, že objekt agrivoltaického systému je soukromý, tudíž není žádoucí, aby docházelo k nedovolenému vniknutí. Ve chvíli nedovoleného vniknutí na plochu agrivoltaiky není v možnostech monitorovacího systému zaručeně zabránit jakémukoliv poškození, ale žádoucí obranou je včasné uvědomění majitele. Aby případné poškození systému bylo dokazatelné, je zapotřebí provádět videozáznamy minimálně o příchodu osoby na soukromý objekt. Požaduje se tedy, aby monitorovací systém byl vybaven kamerami pro případ nedovoleného vniknutí na objekt agrivoltaického systému. Tento kamerový systém by měl být schopen zaznamenávat své okolí i v nočních hodinách.

Kapitola 3

Architektura sítě pro agrivoltaické systémy

Kapitola popisuje detailně strukturu IoT sítě pro agrivoltaický systém. Na základě předchozí analýzy budou vybrány vhodné kombinace technologií. Hlavní doménou této kapitoly je úvaha a návrh rozložení sítě pro agrivoltaický systém tak, aby řešení bylo použitelné v reálných podmínkách. Pozorování z těchto návrhů jsou shrnuta a jako výsledek je poskytnuto vhodné rozložení sítě. V neposlední řadě je zde diskutováno o možnostech zabezpečení a jak zabránit potenciálním útočníkům před narušením monitorovacího systému.

3.1 Požadavky na síť a využití technologií

Než vůbec přikročíme k modelování a navrhování struktury sítě pro agrivoltaické systémy, potřebujeme si určit, jaké jsou hlavní požadavky na daný návrh. V případě instalace agrivoltaického systému nad vinohradem se předpokládá, že umístění takového systému bude izolované a značně odlehlé od další infrastruktury. Tedy hlavními požadavky na návrh jsou:

■ Přístup k internetu

Tento bod je základní funkcionalitou IoT systémů, takže je její potřeba dodržet. Bez této funkcionality by nebylo možné poskytovat monitorovaná data uživatelům, vzdálená správa či notifikace.

■ Dostatečné pokrytí

Pokrytím se rozumí procentuálně vyjádřená plocha agrivoltaického systému s dostupnou sítí ku celkové ploše. Jasným cílem je mít pokrytí co nejvyšší, ale zároveň je nutno pozorovat množství použitých zdrojů pro dosažení daného pokrytí.

■ Možnost komunikovat napříč celou sítí

Jelikož je agrivoltaický systém považován jako izolovaný celek, je potřeba, aby zařízení umístěná na poli mohli mezi sebou komunikovat. Tento požadavek je nutný pro pozdější možnost rozšíření automatizace práce na poli jako například automatické lokální zavlažování.

■ Redundance a odolnost systému

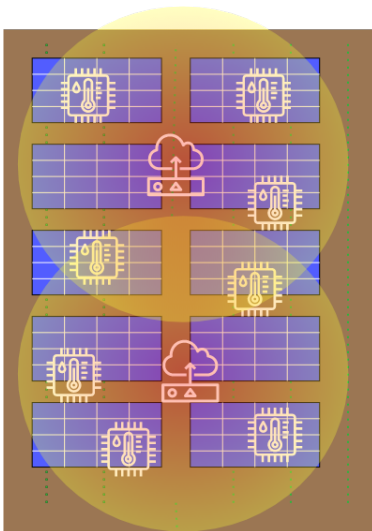
Samotná síť by neměla mít v návrhu jedno úzké hrdlo, přes které budou téct všechny informace. Při výpadku jednoho zařízení nemůže spadnout celý systém a je nutno najít vhodné řešení. V ideálním případě bychom mohli také požadovat, že při výpadku zařízení by mohla ostatní zařízení dále komunikovat a pracovat bez problému.

■ Bezpečnost

Připojení k síti či samotná komunikace v síti by měla být zabezpečena před manipulací. Změny dat v systému mohou ohrozit výsledné metriky a tedy chování systému. Cílem systému je poskytovat pravdivé hodnoty o současném stavu v agrivoltaickém systému.

Nyní nastává reálná otázka jak organizovat zařízení v síti. Asi největším úskalím tohoto systému je první požadavek, a to připojení k internetu. Tento požadavek by se dal ještě analogicky změnit i jako nutnost připojení k jiné infrastruktuře, která má přístup k internetu. Z předchozí analýzy vychází zde, že vhodné řešení pro zaručení přístupu internetu na vinohradu by mohla být technologie GPRS. K tomu, aby zařízení mohlo mít přístup k této technologii, však potřebuje separátní modul zajišťující komunikaci a SIM kartu pro připojení se do sítě operátora.

Pro splnění tohoto požadavku je nyní potřeba uvážit různé scénáře pro docílení přístupu k internetu. Pro případ, kdy by pouze jedno zařízení v takové síti mělo přístup k internetu pomocí technologie GPRS, stalo by se úzkým hrdlem pro celou síť, tedy bychom nedokázali splnit požadavek redundance a odolnosti. Naopak druhý extrém tohoto řešení je, že by každé zařízení v síti bylo osazeno takovým modulem a mohlo autonomně posílat svá data do internetu. Nevznikala by žádná úzká hrdla v tomto případě, ale na druhou stranu, uvažujeme desítky zařízení, by vznikalo zahlcení technologie GPRS na poměrně malém prostoru, tudíž by mohly vznikat kompletní výpadky připojení pro jednotlivá zařízení. V tomto případě zde již není nutný požadavek komunikace napříč celou sítí, jelikož by si zařízení mohla posílat zprávy přes internet. Však tato operace je poměrně náročná, vedlo by to k velkému vytěžování sítě operátora. Takže je zřejmé, že bude potřeba najít řešení někde uprostřed, kdy ne všechny zařízení budou osazena moduly pro přístup do internetu, ale zároveň jich bude dostatečné množství pro dosažení vhodné redundance a celkové odolnosti systému. Analogicky se vše vztahuje úplně stejně na připojení do jiné infrastruktury, která má připojení k internetu. V tomto případě by se jen nejednalo o technologii GPRS, ale o technologii LoRa.



■ **Obrázek 3.1** První návrhy sítě pro agrivoltaický systém.

Za vhodné řešení by se tedy mohlo považovat něco mezi dvěma scénáři popsanými výše, takže další otázkou je, jak budou zařízení, která nemají přístup k internetu, komunikovat v síti a směřovat svá data tak, aby se dostali do internetu. Pro zajištění komunikace uvnitř sítě se analyzovala řada technologií, ale jako nejvhodnější se ukázala technologie WiFi. Jedná se zde jednoznačně o nejpraktičtější řešení, které je v současnosti na trhu nabízeno, technologie pojme desítky zařízení, přenosová rychlost je vysoká a dosah WiFi je také dostačující pro podmínky agrivoltaického systému na vinohradu.

Jedním z dalších požadavků na zmíněnou síť je možnost komunikovat napříč sítí. V případě WiFi technologie můžeme uvažovat dva hlavní přístupy. Prvním je zapojit všechna zařízení do sítě s topologií mesh, kde jsou si všechna zařízení rovna, nebo využít topologie hvězda. V případě mesh topologie je podstatně náročnější organizace v síti a implementace dalších protokolů či algoritmů pro vytváření dalších funkcionalit systému. Naopak topologie hvězda je již velmi známou a často používanou pro IoT řešení. Typicky je v síti jedno zařízení realizující přístupový bod pro síť a ostatní zařízení se připojí k síti s nejlepší kvalitou signálu.

3.2 Možnosti rozložení topologie sítě

Již je známa struktura sítě z pohledu použitých technologií a jaká zařízení budou použita. Další otázka, kterou je nutno si položit, je topologie sítě, aby splňovala požadavky pro agrivoltaický systém. Zde je šestice nejdůležitějších faktorů, sestavených po konzultaci s firmou Zenergo a.s., pro topologii sítě pro agrivoltaický systém:

■ Celková spotřeba energie

Je potřeba uvážit celkovou spotřebu energie celé sítě a snažit se tuto položku minimalizovat. Cílem není plně spotřebovat vygenerovanou energii agrivoltaickým systémem, ale poskytnout lehké řešení, které bude mít minimální dopad na výkon solárních panelů.

■ Pokrytí

Topologie sítě by v ideálním případě měla pokrývat celý agrivoltaický systém. Není však požadavkem docílit kompletního pokrytí, ale co možná největšího v kombinaci s ostatními faktory. Požadavkem je tedy alespoň většinové pokrytí agrivoltaického systému.

■ Redundance

Monitorovací systém by v návrhu topologie měl myslet i na redundanci celého řešení. Sít by měla mít více možností připojení k internetu, kdy v případě výpadku jedné cesty mají zařízení možnost odeslat svá data jinou cestou.

■ Cena

Celková cena řešení a celkový počet zařízení je významným faktorem pro realizovatelnost takového řešení. Při návrhu je tento faktor velmi důležitý a minimalizace ceny by měla být prioritou, za předpokladu splnění všech ostatních požadavků

■ Dostupnost a latence

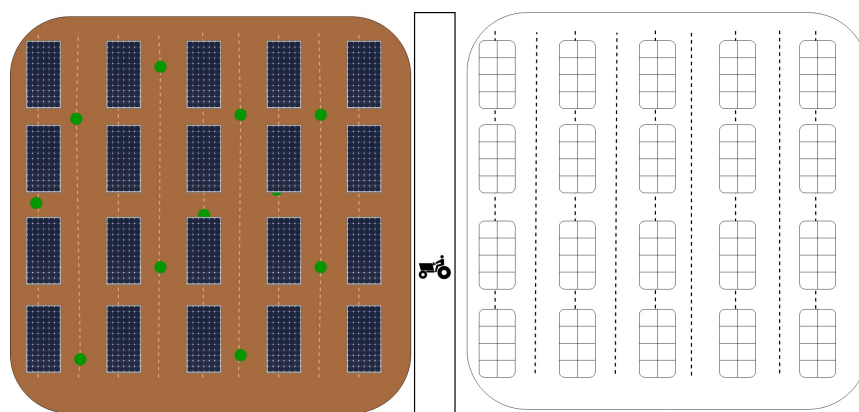
Více zatěžované zařízení v síti, obzvláště přístupové body, mohou být velkou slabinou celého systému. Výpadek jednoho zařízení nemůže paralyzovat celou síť a návrh by měl hledět na to, jak rozložit tuto zodpovědnost do vyhovujícího počtu zařízení, aby si systém v případě výpadku udržel aspoň částečnou dostupnost a minimální latence při větším provozu.

■ Škálovatelnost

Při prvotní realizaci agrivoltaického systému se škálovatelnost takového systému tolik neřeší, jedná se spíše o izolovaný a samostatný objekt v zemědělství. Nicméně návrh by měl aspoň uvažovat budoucí rozšíření a jak by se topologie sítě mohla dále rozšiřovat.

Požadavky na návrh topologie sítě jsou již známy, nyní si ale potřebujeme stanovit rozlohu agrivoltaického systému. Velikost a rozměry takového systému se mohou lišit podle podmínek terénu, celkové rozlohy pole, či finančních prostředků pro nasazení samotného systému. Při konzultacích s firmou Zenergo a.s. jsme se dostali na přibližnou velikost průměrného agrivoltaického systému na 1 hektar, nebo-li plocha 100 metrů na 100 metrů.

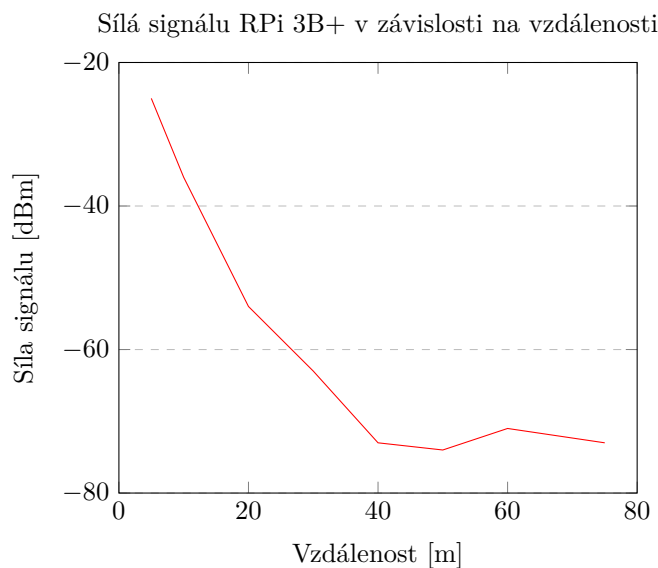
Navrhovaná topologie by měla tedy co nejlépe pokrýt plochu jednoho hektaru, na kterém bude samotný systém instalován. Topologie však musí také uvažovat i přístupovou cestu k samotnému objektu agrivoltaického systému, který může být potenciálním nebezpečím jako jsou například nechtění návštěvníci. Proto je o to důležitější mít dobré pokrytí na straně systému, který je sdílen s přístupovou cestou. Zde je pracovní schéma, které je využito pro modelování topologie.



■ **Obrázek 3.2** Pracovní schéma agrivoltaického systému. Nalevo je barevná verze pro lepší vyobrazení a pochopení. Napravo je černobílá pracovní varianta stejného schématu. Uprostřed je také cesta, která je jediným přístupovým bodem.

Při volbě zařízení, která budou tvořit páteřní síť pro menší zařízení bylo zvoleno Raspberry Pi model 3B+ (dále jen RPi), které disponuje dobrou výpočetní silou, pamětí a celkovou robustností pro možnou zátěž. Otázkou je nyní jak velkou oblast dokáže toto zařízení pokrýt. Jako přístupový bod šíří WiFi signál všemi směry, tudíž vytváří kolem sebe kruhovou síť. Podrobil jsem toto zařízení měření ve venkovních podmínkách, abych zjistil s jak velkým pokrytím se může počítat, když neprovedu žádnou modifikaci pro zvýšení síly signálu jako přidáním externí antény.

Měření byla provedena pomocí mobilního telefonu a ESP32 a následně zprůměrována. Každá vzdálenost byla měřena minimálně pětkrát každým zařízením a vše bylo následně zaokrouhлено na jednotky.



■ **Obrázek 3.3** Manuální měření síly signálu modelu RPi 3B+ ve venkovních podmínkách. Měřené veličiny jsou síla signálu vůči vzdálenosti. S přibývajícím vzdáleností síla signálu klesá a od 40 metrů a dále se pohybuje ve velmi nestabilních hodnotách.

Z měření je zřejmé, že s rostoucí vzdáleností síla signálu zařízení výrazně klesá. Od 40 metrů a dál se již signál pohybuje ve velmi nízkých hodnotách, které se mohou označit jako za nestabilní spojení. Prvních 20 metrů od zařízení jsem byl schopen vidět síť stále a dostupnost byla bez výpadků. Okolo 30 metrů je již síť s menší silou signálu, ale ještě stále s nepřetržitou dostupností. Pro další návrhy budu tedy uvažovat 30 metrů až 35 metrů poloměr kruhu jako dostatečné pokrytí jedním zařízením.

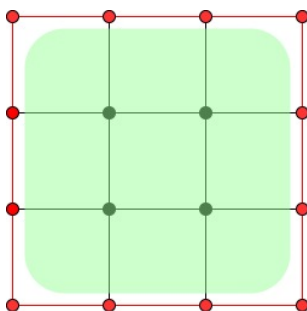
Před samotným modelováním a diskutováním nad jednotlivými možnostmi je problém zanalyzován na teoretické úrovni.

3.2.1 Teoretické řešení pokrytí

Řešení tohoto problému, jak zajistit dobré pokrytí agrivoltaického systému, se dá připodobnit problému v teoretické informatice - minimální vrcholové pokrytí. Jelikož struktura agrivoltaického systému je hodně pravidelná, předpokládejme graf tvořící 2D mřížku. Ještě je potřeba nejdříve zadefinovat tento problém.

Problém vrcholového pokrytí spočívá v nalezení nejmenší množiny vrcholů V_p , kde $V_p \subseteq V$, v neorientovaném grafu $G = (V, E)$, která pokryje všechny jeho hrany E . Jinými slovy, jde o hledání minimálního počtu vrcholů takových, že každá hrana v grafu má aspoň jeden koncový vrchol v množině V_p . Tento problém je NP-těžký, což znamená, že neexistuje známý efektivní algoritmus pro jeho řešení v celé jeho obecnosti.[55]

Když problém minimálního vrcholového pokrytí převedeme na konkrétní problém pokrytí agrivoltaického systému, můžeme si představit graf 2D mřížky s neorientovanými hranami. Pro bližší přirovnání k reálné situaci je využita čtvercová mřížka. Pro kompletní pokrytí by byla potřeba využití obvodových i vnitřních vrcholů grafu, ale v reálném prostředí jsou požadavky trochu jiné.

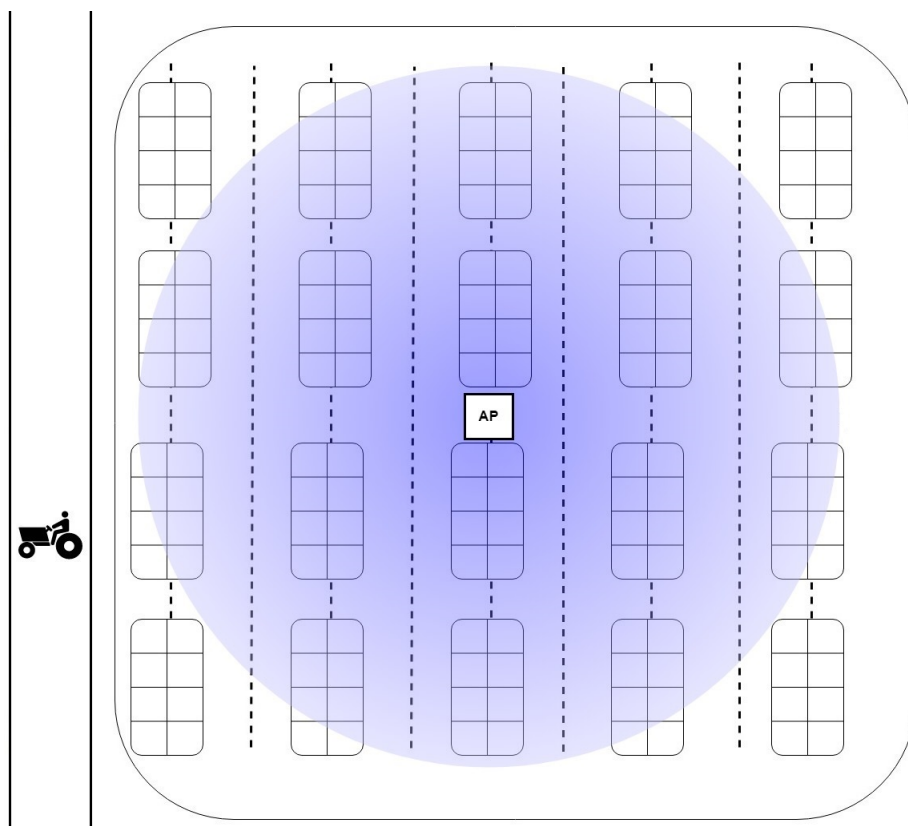


■ **Obrázek 3.4** Teoretické schéma agrivoltaického systému. Krajní body neefektivními kandidáty pro řešení vhodného pokrytí, takže jsou označeny červeně. Vhodnými kandidáty musí být nějaká kombinace výběru vnitřních bodů. Celá mřížka představuje agrivoltaický systém o velikosti jednoho hektaru, tedy jedna hrana je přibližně 33 metrů dlouhá.

Jedním z požadavků na začátku podkapitoly je dostatečné pokrytí agrivoltaického systému, ideálně kompletní (není nutná podmínka). Postačuje právě většinové pokrytí a navíc, kdyby byl přístupový bod sítě na obvodu mřížky, půlka jeho pokrytí by přišla vniveč. Proto obvodové hrany a vrcholy vůbec nemusím uvažovat, takže vhodné řešení většinového vrcholového pokrytí bude spočívat ve výběru vnitřních vrcholů.

Na dalších stranách jsou ukázány možnosti, jak by mohla vypadat topologie sítě pro monitorování agrivoltaického systému v reálných podmínkách. Jsou diskutovány charakteristiky sítě a jak splňují či nesplňují požadavky na realizaci návrhu.

3.2.2 Síť s jedním přístupovým bodem



■ **Obrázek 3.5** Návrh topologie s jedním přístupovým bodem. V tomto případě je přístupový bod modifikován o přídatnou anténu, aby byl schopen pokrýt většinu plochy. Pokrytí je naznačeno modrým kruhem. Přístupový bod sítě je označen zkratkou **AP**. Nalevo je přístupová cesta k agrivoltaickému systému.

Nejjednodušší topologií je využití pouze jednoho přístupového bodu. Z měření dosahu zařízení ale zařízení nedokáže pokrýt celou samu, takže je potřeba přístupový bod vybavit externí anténou, aby se tento nedostatek vyřešil. Další požadavky na tuto síť jsou popsány níže, kde každý nápis je označen barvou, podle toho jak dané kritérium splňuje. Zelená znamená plně vyhovující, oranžová částečně vyhovující nebo vyhovující po úpravách, červená je nevyhovující vlastnost.

■ Celková spotřeba energie

Spotřeba energie by byla velice nízká. V předchozích částech jsou podrobně rozepsány spotřeby energie jednotlivých zařízení. Menší zařízení, která jsou osazena moduly, je stále stejný počet a navíc jejich spotřeba je řádově menší. Právě velkou část spotřeby energie tvoří zařízení vhodná pro funkci přístupového bodu, takže v tomto případě mít pouze jedno zařízení je velice úsporné.

■ Pokrytí

Scénář obsahuje pouze jeden přístupový bod, tudíž bez dodatečných modifikací pro Raspberry Pi by taková síť měla velmi nízké pokrytí. Pro zvýšení pokrytí by byla nutná instalace externí antény, aby vůbec tato varianta splňovala požadavky na pokrytí. Další charakteristikou, ne úplně vhodnou této topologie, je horší pokrytí blízko přístupové cesty k agrivoltaickému systému.

■ Redundance

Tato síť má velký nedostatek, a to v podobě úzkého hrdla v přístupovém bodu. Kdyby přístupový bod vypadl nebo nebyl schopen posílat zprávy do internetu, celá síť je kompletně vyřazena z provozu.

■ Cena

S menším počtem přístupových zařízení také výrazně klesá cena. Tedy z pohledu ceny se jedná o nejhodnějšího kandidáta pro realizaci. Problémem jsou další kritéria, které tato síť nespĺňuje.

■ Robustnost

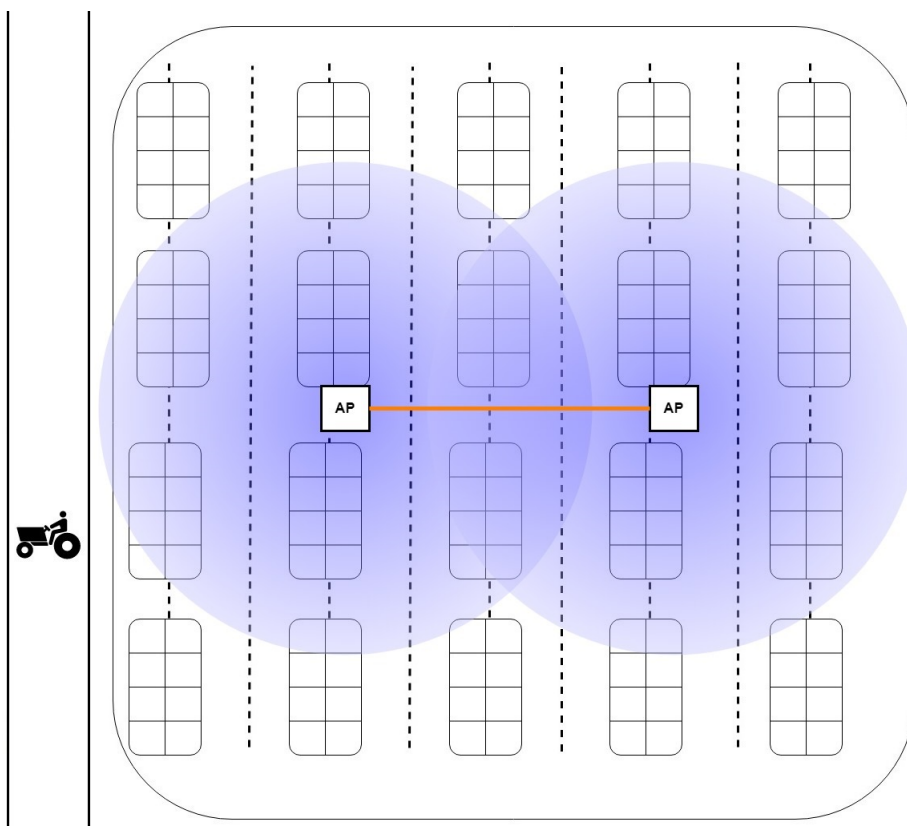
Tato kategorie hodně souvisí s celkovým počtem malých zařízení připojených do sítě. Lze ale již teď předpokládat, že zařízení nebudou jednotky, spíše nízké desítky. Tento předpoklad je hodně alarmující z pohledu dostupnosti, protože větší počet připojených zařízení může způsobit výpadky přístupového bodu, přehlcení nebo velké latence.

■ Škálovatelnost

Případné rozšíření tohoto řešení o sousední agrivoltaický systém by vyžadovalo využití kompletně jiné technologie, než je v této práci plánováno. Možnost spojení těchto sítí do jedné je taky nemožné, to by vyžadovalo přístupový bod blíže okraji systému. Toto řešení moc škálovatelné není ani z pohledu zvyšování počtu zařízení v síti.

Tato varianta je vhodnější na menší řešení a s menším počtem zařízení. Jestli uvažujeme agrivoltaický systém o velikosti jednoho hektaru s nižšími desítkami malých zařízení, lepším řešením jsou varianty s více přístupovými body.

3.2.3 Síť s dvěma přístupovými body



■ **Obrázek 3.6** Návrh topologie s dvěma přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou **AP**. Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik obou sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno přemostění obou sítí. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.

Druhým scénářem je topologie, skládající se ze dvou přístupových bodů do sítě. V tomto případě je pokrytí sítě dostatečné, takže není potřeba dodatečných modifikací zařízení o externí anténu. Novým prvkem topologie je přemostění sítě mezi jednotlivými přístupovými body, které dovoluje zařízením z jedné sítě komunikovat se zařízeními ze sítě druhé. Další požadavky na tuto síť jsou popsány níže, kde každý nadpis je označen barvou, podle toho, jak dané kritérium splňuje.

■ Celková spotřeba energie

I přes zdvojnásobení počtu přístupových bodů do sítě je celková spotřeba stále plně vyhovující. Počet malých zařízení v síti se nemění, tedy nedělají žádný rozdíl pro celkovou spotřebu sítě.

■ Pokrytí

Pokrytí tohoto řešení je srovnatelné s jedním modifikovaným přístupovým bodem. Hlavní výhodou zde je, že modifikaci provádět nemusíme, stačí nám dosah výchozí antény na přístupovém bodu. Navíc díky dvěma přístupovým bodům je lepší pokrytí na krajích agrivoltaického systému, takže přístupová cesta je lépe pokryta pro případné monitorování. Nicméně stále pokrytí není kompletní a zařízení na krajích dále od přístupových bodů nemusí být pokryta.

■ Redundance

Zde je situace již podstatně lepší co se týče redundance. Při kompletním výpadku jednoho přístupového bodu zůstává stále více než jedna polovina sítě funkční, protože je zde částečný průnik pokrytí jednotlivých zařízení. Při výpadku přístupu do internetu jednoho z přístupových bodů je síť stále plně funkční, protože všechny zprávy mohou být posílány pouze jedním přístupovým bodem.

■ Cena

Zde je cena stále vyhovující, kde jediný rozdíl je nákup jednoho RPi modelu navíc. Tento návrh si stále drží nízkou cenu, vzhledem k ostatním řešením.

■ Robustnost

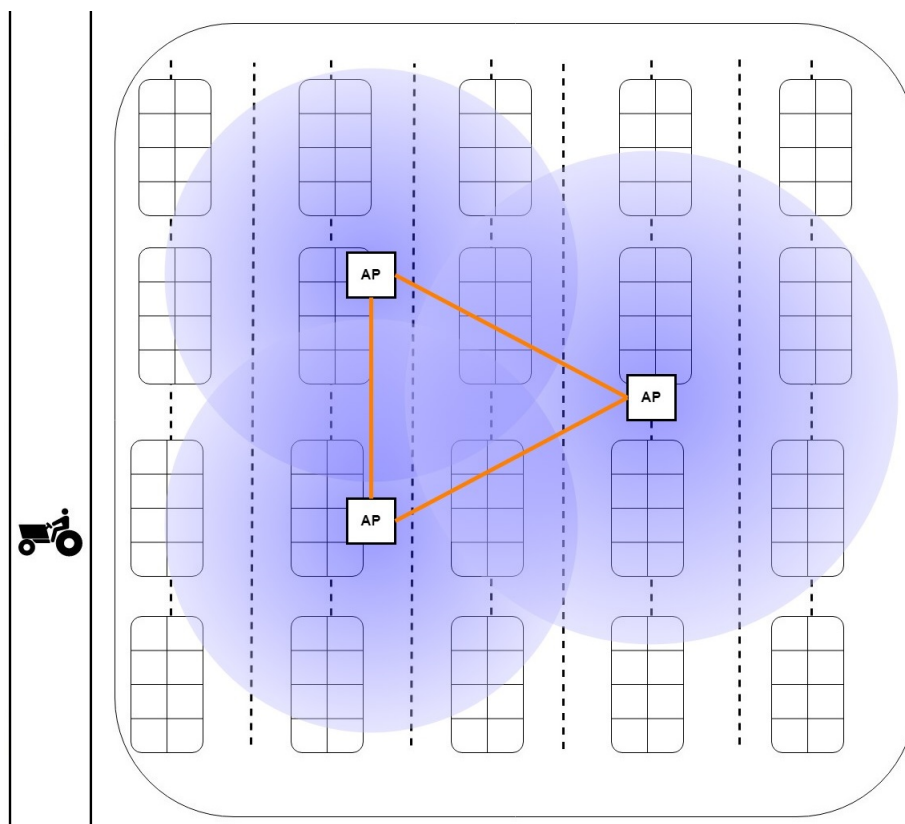
Rozložením zátěže mezi dvě zařízení vzniká mnohem robustnější řešení v porovnání s jedním přístupovým bodem. Přítomnost redundance v případě výpadku připojení k internetu jednoho z přístupových bodů zvyšuje také celkovou robustnost systému.

■ Škálovatelnost

Umístění přístupových bodů blíže k okrajům agrivoltaického systému poskytuje možnost škálování systému z pohledu rozšíření plochy agrivoltaického systému. Napojení na sousední agrivoltaický systém je v tomto případě mnohem jednodušší díky lepšímu pokrytí a možnému přemostění. Škálování z pohledu zvětšování počtu malých zařízení je zde mnohem lepší, protože je zátěž rozložena mezi dva body. Pokud by však nová zařízení byla specificky v jedné části agrivoltaického systému, možná rozšíření sítě o další přístupový bod by bylo vhodnější.

Toto řešení je nejmenší možné, které obsahuje prvky redundance a škálovatelnosti. Může být tedy pokládáno za relevantního kandidáta pro realizace. Nicméně přidáním více zařízení dosáhneme ještě lepších vlastností viz další varianty sítě.

3.2.4 Síť se třemi přístupovými body



■ **Obrázek 3.7** Návrh topologie se třemi přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou **AP**. Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik všech sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno propojení sítě, které tvoří kruhové propojení. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.

Tato varianta je již komplexnější, než jen přemostění dvou sítí. Zde již máme tři přístupové body, které mezi sebou tvoří cyklické spojení. V tomto případě se jedná o mesh spojení těchto přístupových bodů, které spravují svoji vlastní síť a v případě potřeby přeposílají data do sítě sousední. Přístupový bod vpravo na obrázku má větší pokrytí než ostatní dva, protože je zamýšlena modifikace o externí anténu pro zvýšení dosahu, ale pro splnění požadavků není potřeba. Další požadavky na tuto síť jsou popsány níže, kde každý nadpis je označen barvou, podle toho jak dané kritérium splňuje.

■ Celková spotřeba energie

Přístupové body v síti jsou největším spotřebitelem energie, tudíž mít už tři taková zařízení není úplně ideálním řešením. Je otázkou optimalizace, jak moc se dá spotřeba těchto zařízení omezit, ale je řádově vyšší než u malých zařízení. Také správa propojení mezi sousedními sítěmi je náročnější pro spotřebu energie.

■ Pokrytí

Pozice jednotlivých přístupových bodů je zde zamýšlena s větším pokrytím strany agrivoltaického systému sousedícím s přístupovou cestou. Toto pokrytí umožňuje stabilnější zapojení malých zařízení pro případně zabezpečení a monitorování objektu. Třetí přístupový bod, který je uvnitř agrivoltaického systému slouží hlavně k pokrytí zbytku sítě. Také by toto

zařízení mohlo by být dodatečně vybaveno externí anténou k docílení téměř maximálního pokrytí, ale podle měření je i výchozí vybavení zařízení dostačující.

■ **Redundance**

S rostoucím počtem přístupových bodů k internetu a generujících sítí roste celková redundance. Tedy tato varianta byla již shledána jako plně vyhovující z pohledu redundance po konzultacích s firmou Zenergo. Výpadky ovlivní menší množství malých zařízení a nedostupnost připojení k internetu v síti je méně pravděpodobná.

■ **Cena**

Rostoucí celková cena za přístupové body již není úplně ideální, ale stále alespoň částečně vyhovující po konzultacích.

■ **Robustnost**

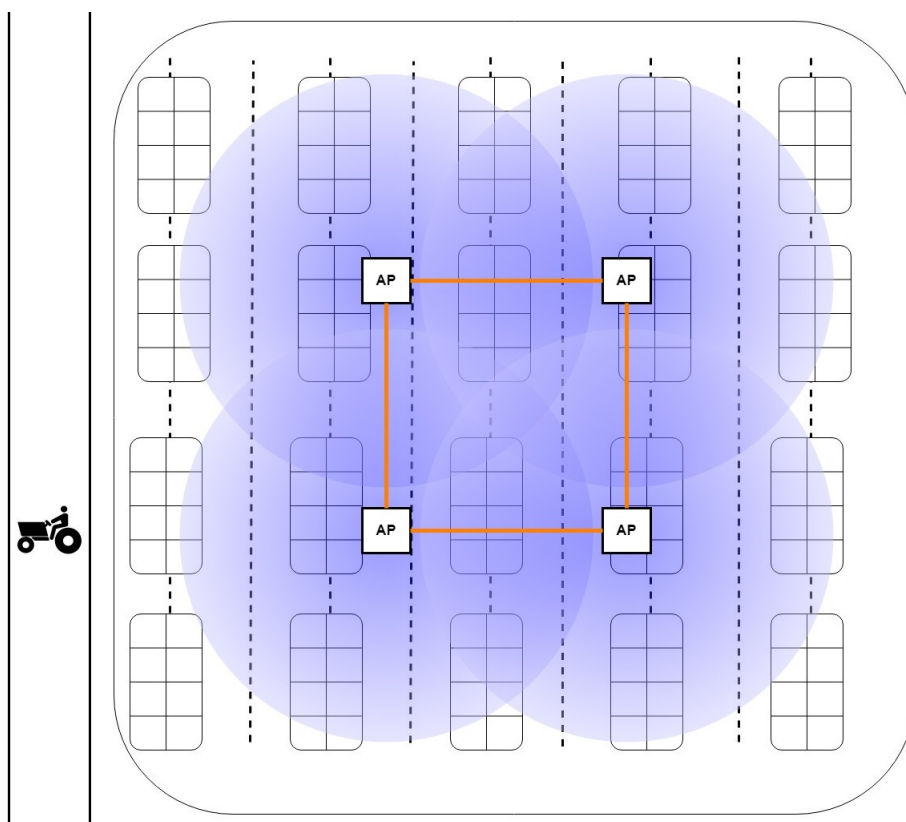
Tato varianta poskytuje již vysokou stabilitu ve všech částech sítě. Na druhou stranu je zde otázka rušení velkého množství sítí v místech, kde se překrývají, ale tento problém je stále řešitelný použitím různých kanálů, které technologie WiFi nabízí. Umístění dvou přístupových bodů blíž k cestě je také prvek, který zvyšuje robustnost, protože se předpokládá potřeba instalace malých zařízení zajišťující bezpečnost agrivoltaického systému.

■ **Škálovatelnost**

Rozložení přístupových bodů v této variantě je hodně specifické, kde jsou dva body poblíž cesty a jeden uvnitř agrivoltaického systému. Možné další rozšíření podél cesty je poměrně přímočaré, kde by se opakoval stejný vzor, jako je zde. Přístupové body poblíž cesty by se snadno mohly spojit do řetězu a při nedostatečném pokrytí by se přidal i další přístupový bod uvnitř agrivoltaického systému. Potenciálně méně vhodným rozšířením by bylo takzvané do hloubky, kde jediným bodem na napojení do sítě je ten vnitřní. Takové zapojení by nebylo moc redundantní. Co se týče zvyšování počtu malých zařízení, tato síť má dostatečné množství přístupových bodů pro rozložení zátěže.

Mít tři přístupové body v síti již přináší novou komplexitu do řešení, ale přináší celou řadu dobrých vlastností. Lepší pokrytí, škálovatelnost a celková robustnost systému výrazně vzrostla. Při prezentování všech variant firmě Zenergo a.s. se jeví tato jako nejlepší kandidát pro realizaci. Firmě se především líbilo rozložení sítě s důrazem na poskytnutí větší stability pro zabezpečení objektu u přístupové cesty.

3.2.5 Síť se čtyřmi přístupovými body



■ **Obrázek 3.8** Návrh topologie se čtyřmi přístupovými body. Přístupové body do sítě jsou označeny zkratkou **AP**. Pokrytí sítě je označeno modrými kruhy, lze vidět i průnik všech sítí. Oranžovou čarou mezi AP je naznačeno propojení sítě, které tvoří kruhové propojení. Nalevo je cesta k agrivoltaickému systému.

Jak již kapitola s teoretickým řešením problému pokrytí naznačovala na obrázku, tak po odebrání obvodových hran a vrcholů zůstávají pouze čtyři vnitřní vrcholy. Tato varianta umísťuje na všechny tyto zbyvající vrcholy přístupové body, díky kterým dostáváme kompletní pokrytí grafu a také agrivoltaického systému. Zařízení jsou spojena do cyklické sítě, kdy v případě potřeby mohou posílat data do sítě sousední. Další požadavky na tuto síť jsou popsány níže, kde každý nadpis je označen barvou, podle toho jak dané kritérium splňuje.

■ Celková spotřeba energie

Analogický problém, jako u varianty se třemi přístupovými body, je celková spotřeba energie. Přidáním dalšího zařízení vzroste spotřeba energie, která by měla být co nejmenší v návrhu. Čím méně energeticky náročné řešení bude ve fázi návrhu, tím lepších výsledků poté síť dosáhne při realizaci včetně dalších optimalizací.

■ Pokrytí

Zde se dá již mluvit o kompletním pokrytí celého agrivoltaického systému. Jediná nežádoucí vlastnost této varianty ve vlastnosti pokrytí je hodně průniků sousedních sítí, potenciálně tvořící hodně rušení. Nicméně při takovém počtu sítí WiFi by stále tento problém neměl být diskvalifikující tuto variantu.

■ Redundance

Zde je redundance obdobná jako u zapojení tří přístupových bodů. Každý bod má totiž vždy dvě sousední sítě, do kterých může přeposílat zprávy v případě výpadku připojení k internetu.

■ Cena

Při snaze minimalizovat cenu je tato varianta hodně drahou za to, jaké vlastnosti přináší. Kdyby otázka ceny systému nebyla v požadavcích, toto řešení by se dalo pokládat za téměř ideální.

■ Robustnost

Kvalita připojení je dostačující ve všech částech agrivoltaického systému. Kompletní výpadek jednoho přístupového bodu neohrožuje síť ani z jedné čtvrtiny, kvůli velkému množství průniků se sousedními sítěmi. Možnost odesílat zprávy sousedům při výpadku internetového připojení je stejně jako u tří přístupových bodů, stále vyhovující.

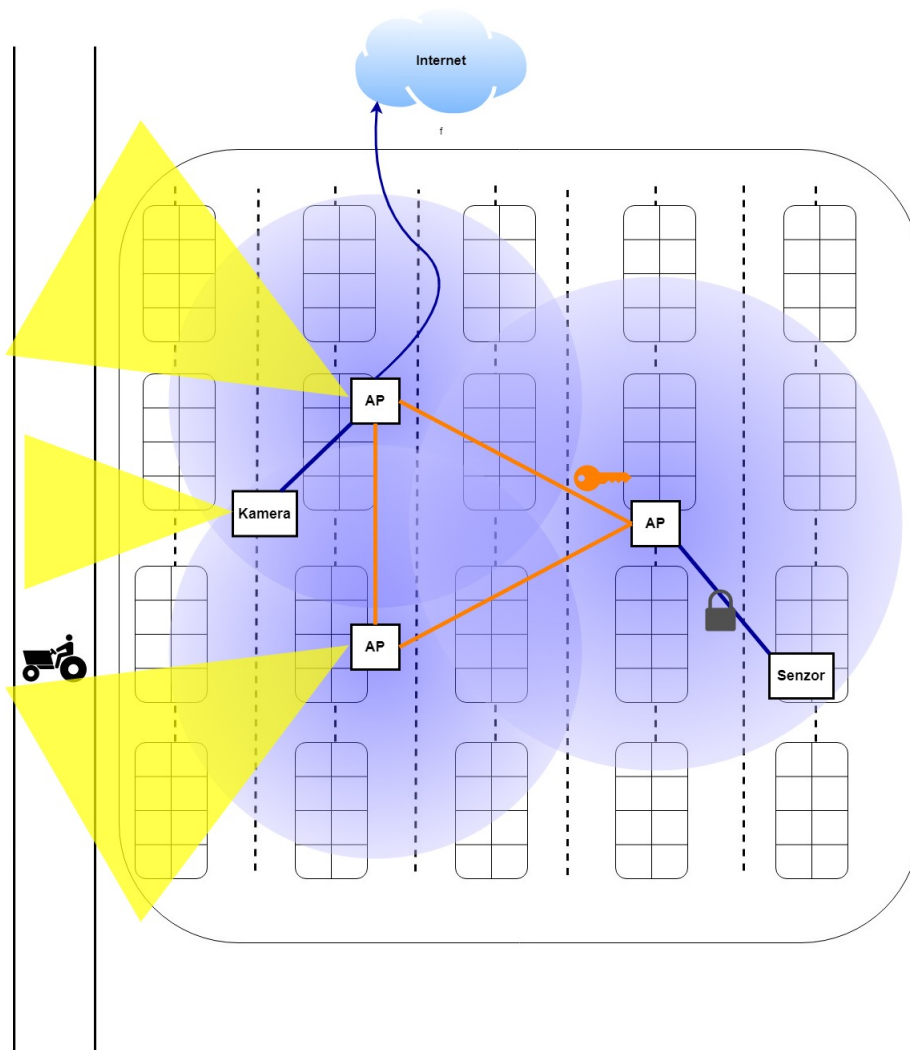
■ Škálovatelnost

Symetrické rozložení přístupových bodů naznačuje dobrou škálovatelnost sítě v případě rozšíření agrivoltaického systému. V obou případech rozšíření podél cesty i do hloubky stačí symetricky přidat dva nové přístupové body. V případě rozšíření také roste i redundance spojení pro některé přístupové body, kdy budou mít tři nebo při velkých rozšířeních čtyři sousedy. Toto výrazně neovlivní chování jednotlivých bodů, pouze budou mít více sousedů v případě výpadku. Co se týče zvyšování počtu malých zařízení, tato síť má dostatečné množství přístupových bodů pro rozložení zátěže.

Varianta symetrického uspořádání sítě dodává řešení jednoduchost a přehlednost v zapojení. Lze jednoduše identifikovat jednotlivé přístupové body, protože i při dalším rozšíření jsou uspořádány v mřížce. Při prezentování vlastností jednotlivých řešení firmě ale nakonec nevíťezila, a to hlavně kvůli vyšší spotřebě energie a ceně. Kompletní pokrytí a jednodušší škálování nebyly vlastnosti, které by byly rozhodující, ale právě cena byla velmi důležitým faktorem. Cílem bylo poskytnout vyhovující vlastnosti sítě s minimální cenou. Nižší spotřebu energie lze také analogicky převést na ušlý zisk, byť téměř zanedbatelný.

3.3 Zabezpečení sítě

Síť pro monitorovací systém také musí poskytovat možnosti zabezpečení. Zde se téma zabezpečení dělí na dvě hlavní kategorie, a to na zabezpečení komunikace v celém systému a na zabezpečení agrivoltaického objektu.



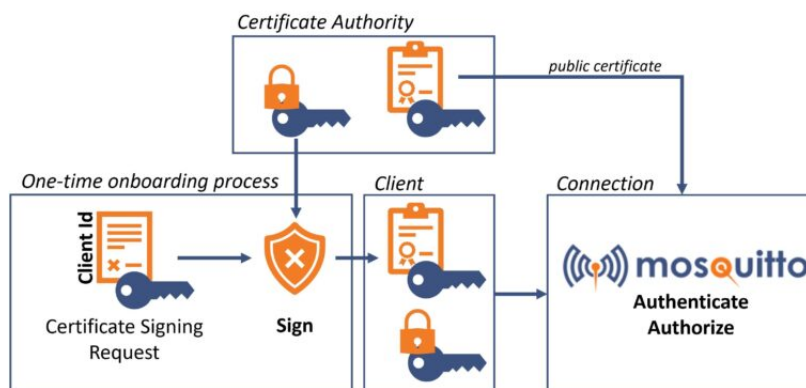
■ **Obrázek 3.9** Schéma bezpečnostních operací v monitorovacím systému. Operacemi na obrázku jsou připojení senzorů do sítě přístupového bodu, propojení sítí dohromady, přístup k internetu a kamerový systém.

3.3.1 Zabezpečení komunikace

Hlavní technologií, využívaná pro realizaci sítě monitorovacího systému, je WiFi, která poskytuje několik bezpečnostních protokolů[56]. Tyto protokoly jsou: Wired Equivalent Privacy (**WEP**) a Wi-Fi Protected Access (**WPA**). Protokol WPA má již několik verzí a je doporučeno používat tu nejnovější, kterou dané zařízení podporuje. Nepoužívanější a momentálně nejvíce podporovanou verzí je WPA2 a WPA2-PSK, které poskytují bezpečnost pro bezdrátovou komunikaci šifrováním dat algoritmem AES. Tyto protokoly jsou považovány za robustní a poskytují

silnou ochranu před většinou typů útoků na síť. Nicméně existují útoky, které dokážou prolomit toto zabezpečení a je potřeba používat silná hesla. Lepší ochranu poskytuje nová verze protokolu WPA3, kterou ale stále nepodporuje velké množství zařízení.

Poskytnutí další úrovně zabezpečení může být řešeno na úrovni MQTT protokolu. Jedna z možností je například použití hesla pro připojení k brokerovi, ale jakmile by byl útočník uvnitř sítě, lze toto heslo odposlechnout velice jednoduše například pomocí nástroje **Wireshark**. Pro navázání bezpečné komunikace v rámci MQTT může být využito protokolu TLS, který právě vytváří bezpečný kanál a zaručuje integritu dat posílaných po tomto kanále[57].



■ **Obrázek 3.10** Schéma používání certifikátů pro zabezpečení komunikaci MQTT protokolu za použití brokeru od firmy Mosquitto.[58]

Všechny zmíněné praktiky výše by měly být aplikovány i pro komunikaci mezi jednotlivými přístupovými body, aby byla zajištěna bezpečnost napříč celým monitorovacím systémem.

Navázání internetového spojení je prováděno přes technologii GPRS, která je provozována operátory mobilních sítí jako jsou například **O2** či **Vodafone**. Při získání přístupu k internetu je zapotřebí použití SIM karty, která je dodávána přímo operátorem sítě a právě operátor je následně zodpovědný za zabezpečení komunikace. SIM karta je v tomto případě vnímána jako bezpečnostní prvek a výrobci jako **Thales**[59] se snaží posouvat technologie v oblasti bezpečnosti SIM karet dál.

3.3.2 Fyzické zabezpečení

Fyzickým zabezpečením je myšlena ochrana celého agrivoltaického systému před nechtěným vniknutím na pozemek, manipulací se zařízeními či vandalismu. Pro tyto případy je potřeba monitorovací systém vybavit kamerami, které budou schopny monitorovat přístupovou cestu k agrivoltaickému systému. Objekt musí být monitorován 24 hodin denně, tudíž je potřeba, aby kamery v systému byly schopny pořizovat snímky a natáčet i během nočních hodin. Minimálním požadavkem pro monitorování je přístupová cesta, ale systém by měl být vybaven vícero kamerami pro monitorování částí jako například rozvodná skříň nebo jiné kritické části agrivoltaického systému. Tyto prvky fyzického zabezpečení nedokáží zabránit vzniku škod, ale slouží jako nástroj pro informování majitelů, aby proběhly včasné kroky pro zabránění větších škod.

■ Cena

Tento požadavek je velice proměnlivý vzhledem k současné situaci na trhu, ale návrh musí přihlížet i na cenu celkového řešení a právě výpočetní zařízení je tou nejdražší položkou v celém systému.

V současné době jsou na trhu k dispozici tři hlavní platformy využívané ve světě IoT. Nejznámější a velice široce používaná platforma Arduino. Jedná se o velmi kvalitní platformu pro realizaci IoT projektů obecně. Druhou platformou jsou čipy ESP od firmy Espressif. Jsou si velkými konkurenty v této oblasti, kde obě platformy poskytují téměř stejné možnosti. Nicméně platformě Arduino nebude věnováno více prostoru, protože nespĺňuje jeden ze základních požadavků, kterým je přítomnost technologie WiFi.[60] Samozřejmě lze tuto technologii poskytnout na této platformě při opatření rozšiřujících modulů, ale v tom vyniká naopak platforma ESP, kde je WiFi již zabudována. Také s větší potřebou opatřování rozšíření pro platformu Arduino znamená vyšší cenu.

Třetí platforma na poli IoT je RaspberryPI. Jedná se o jednodeskové počítače s operačním systémem, takže technické parametry jsou o úroveň výše v porovnání s předchozími dvěma platformami. Tato platforma je obzvláště vhodná pro zařízení, která v síti budou potřebovat vyšší výpočetní sílu a schopnosti.

4.1.1 ESP

Firma Espressif vyrábí dva hlavní produkty pro IoT, ESP32 a ESP8266.[61] Obě řešení splňují přítomnost technologie WiFi, jsou malé a také mají možnosti pro správu spotřeby energie. Navíc jsou obě varianty poměrně energeticky úsporné. Hlavními rozdíly jsou cena a technické parametry. Velice zjednodušeně se dá říct, že ESP32 je výkonnějším dvojnásobkem ESP8266. Největší rozdíly jsou právě ve výpočetní síle a velikosti operační paměti. Některé vlastnosti ESP8266 nemá jako například programovatelná paměť ROM.

Jelikož firma vyrábí tyto mikročipy ve velkém množství variant, uvedu pouze jednu od každého mikročipu. Ostatní varianty se liší primárně v podporovaných technologiích jako například WiFi standardy, verze Bluetooth, možnost připojit externí anténu a jiné.

Porovnání čipů ESP32 a ESP8266				
Název	CPU	Paměť	WiFi	Bluetooth
ESP32-wroom-32e	Xtensa dual-core 32-bit až 240 MHz	448 kB ROM 520 kB SRAM 16 kB SRAM in RTC až 16 MB SPI flash	802.11b/g/n až 150 Mbps	v4.2
ESP8266-wroom-02d	Tensilica L106 32-bit až 160 MHz	ROM nelze programovat < 50 kB RAM až 16 MB SPI flash	802.11 b/g/n až 150 Mbps	nemá

■ **Tabulka 4.1** Tabulka porovnávající dva modely mikročipů od firmy Espressif. Všechny informace o těchto byly vybrány přímo z dokumentací uvedených na stránkách firmy.[62][63] Lze pozorovat jednoznačný rozdíl ve výpočetní síle a robustnosti mikročipu ESP32, který skoro v každé kategorii poráží ESP8266.

Cena obou čipů je však překvapivě velmi obdobná, stránky výrobce uvádí stejnou nákupní cenu za jeden kus. Na trhu se však neseťkáváme běžně s holými mikročipy, ale již s deskami plošných spojů, kde je daný mikročip osazen. Důvodem je zjednodušení programování a manipulace, protože je potřeba použití programátoru, stabilizátorů napětí a spousty dalších drobných součástek. Toto zjednodušení zpřístupnilo používání tohoto mikročipu veřejnosti a je velice populárním řešením.

Ještě podstatnou metrikou, pro výběr vhodných mikročipů, je spotřeba energie. Oba ESP mikročipy mají celkem 4 hlavní režimy, které se liší svým odběrem a běžícími funkcionalitami. Výchozím stavem je takzvaný aktivní mód, kde jsou k dispozici všechny funkcionality jako WiFi, Bluetooth či periférie. První velkou úsporou energie je režim nazývaný spánek modemu, kde procesor a hodiny zůstávají aktivní, ale ostatní funkcionality jsou vypnuty nebo omezeny. Aby se zde ušetřila energie, ale zároveň udrželo spojení pro WiFi či Bluetooth, modul tyto části vypíná a zapíná v určitých intervalech (100 ms až 1000ms obvykle). Tímto si udržuje spojení s přístupovým bodem a zároveň šetří spoustu energie. Lehký spánek je podobný režim jako spánek modemu, ale s rozdílem, že se navíc využívá techniky "clock-gating"¹. Čtvrtým režimem je hluboký spánek, kde je proces modulu vypnutý kompletně. Jediné aktivní části zůstávají RTC hodiny a ULP koprocesor. Díky ULP koprocesoru je modul stále schopen číst data ze senzoru, které se následně společně s hodinami dají použít pro probuzení. Zde jsou detailnější spotřeby energie pro jednotlivé režimy u obou ESP mikročipů:

ESP8266:

Režim	Minimální proud	Maximální proud
Hluboký spánek	0,02 mA	1 mA
Lehký spánek	0,4 mA	2 mA
Spánek modemu	15 mA	30 mA
Vysílání (802.11b)	70 mA	170 mA
Přijímání (802.11b)	45 mA	75 mA

■ **Tabulka 4.2** Přibližná spotřeba energie modulu ESP8266 ve všech zmíněných režimech, aktivní režim je rozdělen na vysílání a přijímání dat při využití WiFi. Reálné hodnoty se mohou lišit, údaje jsou uváděny v dokumentaci výrobce.[64]

ESP32:

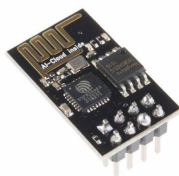
Režim	Minimální proud	Maximální proud
Hluboký spánek	0,05 mA	1 mA
Lehký spánek	0,8 mA	5 mA
Spánek modemu	3 mA	20 mA
Vysílání (802.11b)	120 mA	260 mA
Přijímání (802.11b)	80 mA	160 mA

■ **Tabulka 4.3** Přibližná spotřeba energie modulu ESP32 ve všech zmíněných režimech, aktivní režim je rozdělen na vysílání a přijímání dat při využití WiFi. Reálné hodnoty se mohou lišit, údaje jsou uváděny v dokumentaci výrobce.[65]

Lze pozorovat, že moduly s mikročipem ESP8266 jsou mírně energeticky úspornější než mikročipy ESP32. To je spojeno analogicky také s výkonem a specifikacemi obou mikročipů výše, kde ESP32 poskytuje větší paměť i výpočetní sílu. Pro nejmenší možný odběr energie je tedy vhodný kandidát mikročip ESP8266, ale jeho největší slabinou je jeho celkový výkon. Naopak pro náročnější operace a více zatěžované zařízení v síti je vhodnější ESP32, i přes jeho vyšší spotřebu energie.

Při hledání vhodného kandidáta pro agrivoltaický systém je jedním z hlavních cílů udržet si funkcionality mikročipu a zároveň se pokusit, o co nejmenší možný design. Proto prvním kandidátem byl ten nejmenší možný na trhu, modul **ESP8266 ESP-01**.

¹clock-gating - technika, která se používá pro snížení spotřeby energie v obvodech. Tato technika umožňuje vypínat hodinový signál do určitých částí obvodu, které zrovna nepotřebují být aktivní. Více informací zde



■ **Obrázek 4.1** ESP8266 ESP-01, nejmenší varianta ESP8266, kterou lze na trhu pořídit. Zdroj: e-shop Drátek.

Největší předností tohoto zařízení je jeho velikost a jednoduchost (velikost přibližná jednomu článku prstu). Na druhou stranu je zde poměrně náročná programovatelnost a použitelnost. Destička je osekána o jakékoliv funkcionality v podobě programátoru či stabilizátoru napětí, takže jsou tyto požadavky převedeny z destičky na uživatele. To mi způsobilo celou řadu problémů ve fázi hledání vhodného modulu, kdy jsem se snažil ESP-01 zprovoznit. Nahrát kód, napájet či přepínat z běžícího do programovacího módu je velice nepraktické a ačkoliv se dodávají programátory pro tuto destičku, tak to neřeší celý problém. Narazil jsem na celou řadu potíží s konektivitou přes WiFi. Pravděpodobně minimální velikost zařízení způsobuje také určité vady na kvalitě spojení. Nakonec jsem se s touto destičkou zastavil u problému, kdy neviděla síť WiFi, přestože zařízení bylo ve velké blízkosti vysílače. Tyto problémy s testováním a použitelností destičky způsobily prodlevy na diplomové práci a ve výsledku jsem byl nucen vyřadit ESP-01 z listu kandidátů. Cena tohoto zařízení je ale velmi příznivá, stojí totiž pouze 97 Kč na českém internetovém obchodu Drátek.

Z důvodů znemožňující mi práci na předchozím kandidátovi, rozhodl jsem se vyzkoušet **ESP8266 ESP-12F**. Předchozí destička měla ještě jednu zásadní vadu, a tím je omezený počet přístupných pinů, kterých bylo pouze 8. Dalším zásadním problémem byla neschopnost správy spotřeby energie. Ta se provádí přivedením signálu na specifický pin mikročipu, který však není připojen na žádný z 8 možných pinů. Takže bez manuálního připojení pinu mikročipu k výstupnímu pinu je správa paměti nemožná. Tady tyto problémy řeší ESP-12F, kde je přístup ke každému pinu na mikročipu.



■ **Obrázek 4.2** ESP8266 ESP-12F. Zdroj: e-shop LáškaIT.

Jedná se stále o velmi kompaktní destičku, pouze o trochu větší než předchozí ESP-01. Hlavní výhodou je kompletní přístup k pinům na mikročipu, nicméně je zde stále stejný problém s manipulací a programovatelností. Prochází sice požadavky na funkcionality, ale není stále ideálním řešením. Pro programování je silně doporučeno programovací rozšíření, kam pouze destičku vsadíte a můžete pohodlně programovat. Cena samotné destičky je 114 Kč, tedy velmi podobná jako ESP-01.

Stále všichni kandidáti měli stejný problém se špatnou manipulovatelností, který způsoboval značné potíže při vypracovávání této diplomové práce. Je tedy zapotřebí provést ústupky v požadavcích na minimální velikost a sáhnout po univerzálnějším řešení. Destička, která se sama postará o stabilitu napájení či jednoduchou programovatelnost. Dalším možným kandidátem, také podle ceny, je destička **NodeMcu ESP8266**.



■ **Obrázek 4.3** NodeMcu ESP8266. Zdroj: e-shop Drátek.

Tato destička poskytuje již už poměrně komplexní řešení. Je zde integrován programátor pro zpracovávání a nahrávání kódu, stabilizátor napětí i celá řada rezistorů pro bezpečnou práci s piny, které jsou všechny vyvedeny podél obvodu destičky pro snadné použití. Také tlačítko pro manuální restart či snadné přepnutí do programovacího módu pro nahrání kódu jsou velice příjemným doplněním. V neposlední řadě je k destičce připojen micro USB konektor pro snadné napájení či programování. Jediné dvě nevýhody oproti předchozím kandidátům je cena a velikost. Co se týče velikosti, pohybujeme se u dvojnásobné v porovnání s ESP-12F. Cena je sice dražší, nejnižší momentální cena je 147 Kč, ale rozdíl činí pouze 50 Kč v českých internetových obchodech. Když se však nárůst ceny vyčíslí v procentech, tak se jedná o více než 50 procentní nárůst ceny za jeden čip, tudíž je potřeba toto brát na zřetel a je to nutno zahrnout ve výsledném projektování ceny.

Předchozí kandidáti byli pouze z řad mikročipů ESP8266, ale jak bylo již psáno výše, některá zařízení v síti budou více vytěžována a potřebovala by vyšší výpočetní sílu a paměť. Pro tyto účely je potřeba se podívat do řad mikročipů ESP32. Po poučení z úskalí u předchozích kandidátů se jako nejlevnější kandidát jeví **Doit ESP32**.



■ **Obrázek 4.4** Doit ESP32. Zdroj: e-shop Drátek.

Tentokrát je již používání velice jednoduché. Destička má integrované všechny funkcionality jako předchozí kandidát pro mikročip ESP8266. Jediný rozdíl je cena destičky, která se pohybuje od 200 Kč a výše za kus. Opět v porovnání s nejlevnějším ESP-01 se jedná už o dvojnásobnou cenu, takže četnější používání této destičky se může projevit ve výsledné projektované ceně.

Je také velice důležité upozornit na klony těchto mikročipů. Výrobci těchto destiček sáhnou pro klon originálního čipu, který je velice srovnatelný, ale může být více poruchovější nebo některé věci nemusí vůbec správně fungovat.

4.1.2 RaspberryPI

Výpočetní síla mikročipu ESP32 by sice mohla stačit pro účely agrivoltaického systému, ale nemusí být vhodným řešením pro komplexní operace a správu celé sítě. Pro tyto účely je vhodnější volba kompletně jiné platformy, kterou by mohly být jednodeskové počítače (PCB). Největším výrobcem je Raspberry Pi foundation, která produkuje stejnojmenné PCB Raspberry Pi. Na

trhu se však pohybuje spousta jiných výrobců PCB jako například Odroid, BANANA Pi a jiní, kteří by byli potenciálními kandidáty, ale pro jednoduchost se tato sekce zaměřuje pouze na PCB od Raspberry Pi foundation. Alternativní výrobci jsou zde však zmíněni z důvodu nedostupnosti jakýchkoliv RPi PCB, v době kdy byla psána tato práce.

Existuje celá řada různých modelů RPi a jejich variant, takže pro přehlednost jsou zde uvedeny v pořadí podle jejich výpočetní síly.

Model	CPU	Paměť	Vydání	Cena
RPi Zero	BCM2835 (1 GHz)	512 MB	Listopad 2015	200 Kč
RPi ZeroW	BCM2835 (1 GHz)	512 MB	Únor 2017	240 Kč
RPi 1A+	BCM2835 (700 MHz)	512 MB	Listopad 2014	480 Kč
RPi 1B+	BCM2835 (700 MHz)	512 MB	Červenec 2014	600 Kč
RPi 2B	BCM2836 (900 MHz)	1 GB	Únor 2015	800 Kč
RPi 3B	BCM2837 (1.2 GHz)	1 GB	Únor 2016	800 Kč
RPi 3B+	BCM2837B0 (1.4 GHz)	1 GB	Březen 2018	800 Kč
RPi 4B	BCM2711 (1.5 GHz či 1.8 GHz)	1, 2, či 4 GB	Červen 2019	850-1800 Kč

■ **Tabulka 4.4** Modely RPi seřazeny podle jejich výpočetní síly. V tabulce je také možno vidět porovnání výpočetních pamětí a kdy daný model byl vydán.[66]

Z tabulky výše je možné vidět, že určitá část modelů je již značně zastaralá, proto nebudou podrobněji popsány v této sekci. Jedná se o modely Zero, 1A+, 1B+, 2B a 3B, protože všechny tyto modely jsou buď zastaralé a ve stejné cenové relaci je možné pořídit novější model, nebo mají přímo svého následovníka jako například v případě modelu Zero. Tedy potenciálně zajímavými kandidáty jsou modely RPi ZeroW, 3B+ a 4B.

Nejlevnější variantou z relevantních kandidátů je RPi ZeroW, který je zároveň také nejkompaktnější. Obsahuje všechny základní vlastnosti jako ostatní modely jako možnost připojení k WiFi, Bluetooth, GPIO piny a jiné. Navíc v porovnání s mikročipy ESP32 výpočetní síla a operační paměť je výrazně vyšší.



■ **Obrázek 4.5** Raspberry Pi zero WH. Zdroj: e-shop LáskalIT.

Nicméně pro účely přístupového bodu WiFi sítě, na který bude připojeno velké množství dalších zařízení a celkový provoz na síti bude velký, tak stále vlastnosti RPi ZeroW nemusí být dostačující pro zaručení bezproblémového provozu. Z dalších kandidátů je tu RPi model 3B+. Cena tohoto modelu je však výrazně vyšší, ale za předpokladu, že takových zařízení nebude v síti mnoho, můžeme jej stále pokládat za relevantního kandidáta. Oproti RPi ZeroW je výpočetní síla i operační paměť modelu 3B+ výrazně vyšší, dělajíc z něj vhodnější volbou pro zaručení stabilního chodu sítě.



■ **Obrázek 4.6** Raspberry Pi model 3B+. Zdroj: e-shop RPishop.

Posledním z kandidátů je nejnovější model od Raspberry Pi foundation, model 4B. Existuje v několika variantách, liší se v množství operační paměti (1 GB, 2 GB, 4 GB). Zvětšující se operační paměť má také za důsledek výrazný růst celkové ceny za jeden kus, takže je potřeba uvážit, která varianta tohoto modelu je pro nás relevantní. Samozřejmě, kdybychom neřešili cenu, tak z hlediska spolehlivosti a výkonu bude nejlepší varianta se 4 GB operační paměti. Do požadavků pro návrh agrivoltaického systému je také zahrnuta cena, takže ve výsledku jsou modely 3B+ a 4B velice porovnatelné, pokud je uvažována varianta s 1 GB operační paměti. Navíc nároky na spotřebu elektřiny jsou dalším z faktorů, které musí být zahrnuty do výběru vhodných zařízení, takže model 4B je v tomto případě dokonce horším kandidátem v porovnání s modelem 3B+.[67] Zde je pro porovnání vypsána spotřeba jednotlivých modelů:

- RPi ZeroW: 150mA až 250mA @ 5V
- RPi 3B+: 500mA až 1A @ 5V
- RPi 4B: 600mA až 1.5A @ 5V

4.2 Metriky, úložiště a zobrazení

V této podkapitole se pojednává detailněji o návrhu monitorování agrivoltaického systému z pohledu sběru dat, jejich ukládání a následné zobrazování. Jsou zde popsány klíčové aspekty této sítě a jakým způsobem se mohou implementovat. Pro sběr dat je potřeba určit vhodné senzory poskytující data na základě analýzy v kapitole o prostředí agrivoltaického systému. V části o ukládání dat jsou diskutovány přístupy jakým způsobem data mohou být uložena. Na to nutně navazuje sekce jakými nástroji uložená data vizualizovat tak, aby z nich bylo možné získat cenné informace o stavu agrivoltaického systému.

4.2.1 Měření veličiny agrivoltaického systému

Díky analýze o prostředí agrivoltaického systému jsou již známy jevy a veličiny, které se zde objevují. Zde je popsáno jaké veličiny je potřeba měřit monitorovacím systémem, aby poskytl relevantní data pro další zpracování. Je do hloubky popsáno umístění jednotlivých senzorů pro dosažení požadovaných dat a je diskutováno jakou frekvencí je potřeba tyto data měřit. V neposlední řadě jsou zde uvedeny myšlenky, jak vylepšit systém o další prvky, které by mohly v budoucnu rozšířit funkcionality tohoto monitorovacího systému.

Požadované měřené veličiny

■ Teplota a vlhkost

Naprostο základními veličinami pro život rostlin jsou teplota a vlhkost. Proto je nutné tyto veličiny monitorovat pro mikroklima v agrivoltaickém systému. Díky sběru těchto dat je možné hlídat podmínky, ve kterých rostliny žijí, a případně tyto podmínky upravovat například napojením na zavlažovací systém.

■ Intenzita slunečního záření u rostlin

Velkým problémem rozvoje agrivoltaického průmyslu je názor, že rostlinám se nedostává dostatečné množství slunečního záření pro fotosyntézu. V analýze je ukázáno, že rostlina dosahuje bodu nasycení LSP, kdy již nedokáže absorbovat více slunečního záření. To mění kompletně perspektivu na tento problém, který spíše přináší možnost optimalizace využití slunečního záření. Tato veličina je velice kritickou pro mikroklima agrivoltaického systému, tudíž je ho potřeba monitorovat.

■ Referenční hodnoty

Pro porovnatelnost všech předchozích veličin je potřeba také měřit takzvané referenční hodnoty, které budou měřeny mimo agrivoltaický systém. Díky takovým hodnotám je možné pozorovat pozitivní i negativní vlivy agrivoltaického systému na mikroklima, které vytváří.

■ Teplota solárních panelů

Solární panely jsou nedílnou součástí agrivoltaického systému a proto je nutné je monitorovat. Solární panely jsou navrženy tak, aby vydrželi celodenní vystavení slunečnímu záření, ale v závislosti na poloze a ročním období mohou být vystaveny extrémním teplotám, při kterých mohou ztrácet svoji efektivitu. Pro tyto účely je důležité monitorovat samotnou teplotu solárního panelu.

■ Intenzita slunečního záření na solárních panelech

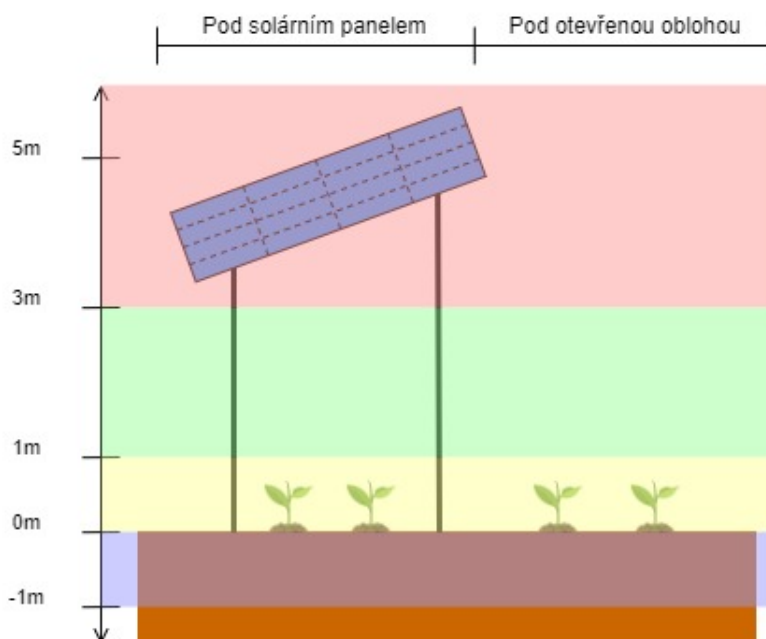
Výroba solární energie pomocí solárních panelů je přímo závislá na intenzitě slunečního záření. Je tedy velice zajímavou veličinou pro monitorování a pozorovat závislost intenzity slunečního záření a teplot solárního panelu na množství vygenerované energie.

■ Kamerový systém

Nutnou bezpečnostní složkou monitorovacího systému jsou kamery. Jak již bylo v topologii popsáno, přístupová cesta je potenciálním nebezpečím pro agrivoltaický systém a je potřeba mít způsob, jak monitorovat, kdo se v blízké lokalitě pohybuje.

Umístění senzorů

Pro správné rozmístění senzorů po agrivoltaickém systému je nejprve nutno si zadefinovat, jaké možnosti rozmístění existují. Hlavním rozdílem, který můžeme pozorovat, je samotné umístění rostliny. Zde se mohou zadefinovat dvě možnosti, a to umístění rostliny přímo pod solárními panely a umístění pod otevřenou oblohou. Zastřešení rostlin vytváří úplně jiné mikroklima obzvláště z pohledu vlhkosti půdy, protože se k zastřešeným rostlinám nedostane kompletně dešťová voda.



■ **Obrázek 4.7** Schéma agrivoltaického systému s konstrukcí střechy, které je rozděleno do sektorů různých částí mikroklimatu. Každý sektor má jiné charakteristiky, tudíž je potřeba v každém sledovat různé metriky. Modrý sektor je půda, jdoucí jeden metr do hloubky. Žlutý sektor je mikroklima v blízkém okolí rostlin, na obrázku první metr od země. Zelený sektor je mikroklima ovzduší, které je mezi jedním až třemi metry nad zemí. Červený sektor je mikroklima v blízkosti solárního panelu, přibližně od tří do pěti metrů nad zemí. Dalším typem rozdělení je podle umístění rostlin, zda se nachází přímo pod solárním panelem či pod otevřenou oblohou. Zmíněné výškové hodnoty se mohou lišit podle povahy pěstovaných rostlin nebo typu prostředí.

Jak již obrázek výše naznačil, druhým hlavním rozdělením je podle výšky. Nejzajímavějšími sektory pro monitorování a sběr dat jsou právě žlutý a modrý sektor, kde se vyskytují rostliny. V modrém sektoru je potřeba monitorovat teplotu i vlhkost jak přímo pod panely, tak i pod otevřenou oblohou. Analogicky tato nutnost platí i ve žlutém sektoru čili v blízkosti rostlin. Zde je ještě potřeba monitorovat rozdíl intenzity slunečního záření pro obě dvě možnosti, aby bylo možné pozorovat vliv stínění solárních panelů v závislosti na pozici rostliny.

Měření teploty a vlhkosti ovzduší, zelený sektor, pro obě možnosti ztrácí na významu, protože se předpokládají stejné vlastnosti tohoto mikroklima. Navíc správné měření venkovní teploty probíhá zásadně ve stínu, takže zde stačí monitorovat pouze možnost zastřešenou solárními panely.

Červený sektor obsahuje přímo solární panely, kde se požadavky na metriky výrazně mění. Zde je nejdůležitější, v jakém prostředí solární panely pracují, tedy intenzita slunečního záření, kterému jsou vystaveny, a teplota samotného panelu. Tyto metriky jsou obzvláště zajímavé z pohledu měření efektivity solárního panelu.

Pro umístění kamer v monitorovacím systému je vhodný červený sektor a vrchní část zeleného sektoru. Důvodem výběru těchto sektorů je docílení co nejlepšího výhledu kamery. Umístění kamer v nižší výšce je nevyhovující hlavně kvůli rostlinám v agrivoltaickém systému, které by výrazně zhoršily výhled kamerovému systému.

Rozšířením monitorovaných sektorů může být měření vlhkosti v hloubkách větších jeden metr pod zemí. Tento sektor by byl relevantním pro rostliny, které sbírají vodu ve větších hloubkách.

Frekvence měření

Četnost neboli frekvence jednotlivých měření je velice závislá na povaze sbíraných dat, energetické náročnosti zařízení, rychlostní či datové kapacity sítě. Frekvence se tedy může lišit od několika sekund až po jednu za hodinu například.

V případě monitorování agrivoltaického systému předpokládáme, že řešení by mělo být nasaženo roky, ideálně po celou životnost solárních panelů. Sběr dat musí také probíhat nepřetržitě dnem i nocí. Z pohledu povahy dat, převážně teplota, vlhkost a intenzita slunečního záření, lze konstatovat, že v dlouhodobém měřítku není potřeba provádět měření častěji než **jednou za hodinu**. Když předpokládáme uchovávání velkého množství dat po dlouhou dobu, frekvence sběru dat by měla být co nejmenší z pohledu datové kapacity sítě. Nejintenzivnější operací v tomto případě je odesílání dat ze sítě do internetu.

Při prezentování návrhu firmě Zenergo se však tato frekvence zdála z jejich strany nevyhovující. Byl vznesen požadavek na častější sběr dat přes část dne, kdy svítí slunce. Jelikož je průmysl agrivoltaiky hodně nový, tak pro výzkumné účely je požadavek pro častější a detailnější sběr dat. Frekvence měření je tedy prováděna **každých 15 minut** s tím, že všechny data budou mít dobu expirace, aby se ošetřily případné potíže s ukládáním velkého množství dat.

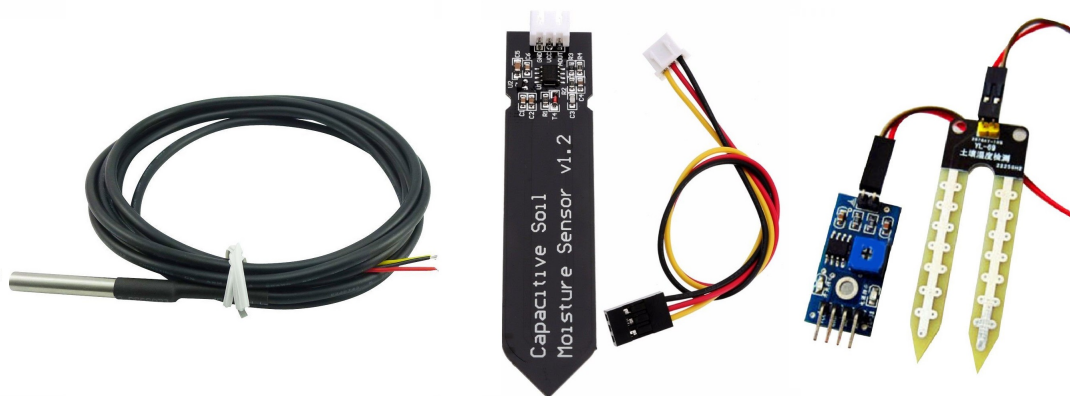
Vhodné senzory

Existuje celá řada senzorů pro měření **vlhkosti a teploty** vzduchu. Nejlevnější variantou jsou senzory **DHT22** či **DHT11**, které jsou zároveň i široce používané. Druhou velmi široce používanou možností je senzor **BME280**. Tyto senzory jsou řešením jak pro měření vlhkosti, tak i teploty. Senzor BME280 navíc měří i barometrický tlak, který však není součástí požadovaných metrik pro agrivoltaický systém. Tyto senzory mohou být použity pro monitorování teploty a vlhkosti sektoru v blízkosti rostlin i ovzduší.



■ **Obrázek 4.8** Senzory pro měření vlhkosti a teploty vzduchu. Nalevo je senzor BME280 a napravo senzor DHT22. Zmiňovaný senzor DHT11 vypadá totožně jako senzor DHT22. Zdroj: **e-shop Drátek**.

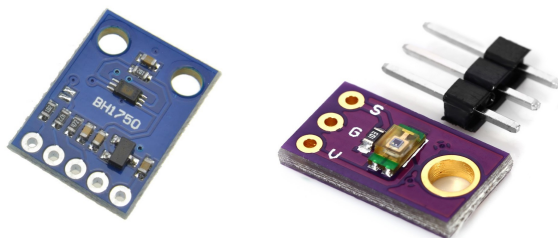
Pro měření **teploty a vlhkosti půdy** jsou nutné senzory, které jsou vodotěsné a nepodléhají korozi. Řešením pro měření teploty půdy může být vodotěsný senzor **DS18B20**, který je dodáván s různými délkami kabelu. Vhodným řešením pro měření vlhkosti půdy mohou být kapacitní či odporový senzor vlhkosti půdy. Oba modely jsou vyráběny velkým množstvím výrobců a na trhu se převážně pohybují klony těchto výrobků, které mají celou řadu vad. Navíc odporový senzor vlhkosti půdy podléhá korozi a není vhodným dlouhodobým řešením. Kapacitní senzor vlhkosti půdy je podstatně lepším řešením, ale jak bylo již zmiňováno, tyto senzory přichází s celou řadou vad a při hledání vhodných senzorů jsem osobně narazil na 5 nefunkčních.



■ **Obrázek 4.9** Sensory pro měření vlhkosti a teploty půdy. Nalevo je senzor DS18B20, uprostřed je kapacitní senzor vlhkosti půdy a vpravo odporový senzor vlhkosti půdy. Zdroj: **e-shop Drátek**.

Požadavek na měření **teploty solárních panelů** lze realizovat pomocí všech výše zmiňovaných senzorů. Jedinou potřebnou modifikací je instalace tohoto senzoru v těsné blízkosti na spodní straně solárního panelu.

Požadavek pro sběr dat intenzity světla lze například splnit pomocí senzorů **BH1750** nebo **TEMT6000**. Oba měří intenzitu slunečního záření v luxech, ale liší se ve způsobu měření a přesnosti. TEMT600 je foto tranzistorový senzor, kde se čte analogová hodnota na senzoru (rozmezí 0-1024), která se potom dá procentuálně vyjádřit. BH1750 je naopak digitálním senzorem, který udává hodnotu intenzity slunečního záření přímo v luxech. Oba senzory mají své využití, ale pokud je požadavek na detailní měření, vhodnější kandidát je senzor BH1750.

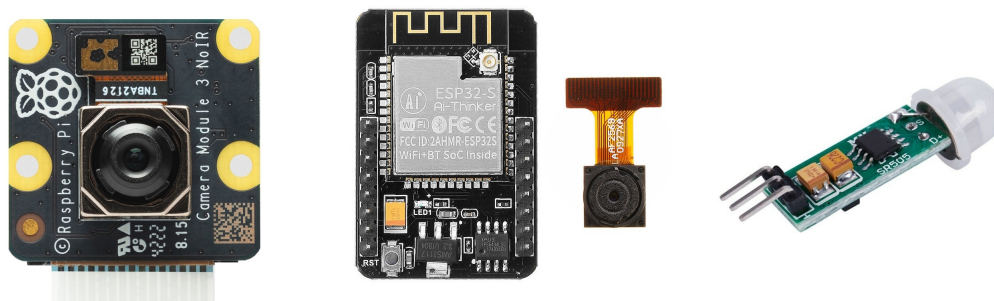


■ **Obrázek 4.10** Sensory pro detekci intenzity slunečního záření. Vlevo je senzor BH1750, vpravo TEMT6000. Zdroj: **e-shop Drátek**.

Zajištění **kamerového systému** pro monitorování objektu je nutnou součástí. Lze využít zařízení ESP32 a RPi a osadit je kamerami. Bohužel mikročip ESP8266 není dostatečně výpočetně silný na to, aby dokázal provozovat kamerové řešení. Firma Espressif nabízí přímo kamerové řešení mikročipu ESP32, které nazývají **ESP32-CAM**. Jedná se o velmi levné a kompaktní tohoto požadavku. Mikročip je dodán na destičce umožňující připojení kamery OV2640. Hlavní nevýhodou kamery je, že obsahuje infračervený filtr, který kameru dělá nepoužitelnou pro noční vidění. Existují však na internetu návody jak filtr odstranit. Druhou možností je zapojení kamery k modulu RPi. V tomto případě existuje kamera přímo od firmy Raspberry Pi foundation bez infračerveného filtru. Důležitou poznámkou je, že obě zařízení potřebují být dodatečně vybaveny infračerveným zdrojem světla, které poskytuje viditelnost v nočních podmínkách.

Dodatečně musí kamery spolupracovat se senzory pro detekci pohybu. Tímto spojením je docíleno vyšší efektivity systému, protože kamera bude aktivní pouze v období, kdy je detekován pohyb. Možností jak dodat tuto funkcionalitu je mnoho, ale vhodným kandidátem může

být senzor pohybu **HC-SR505**. Sensory nemusí být nutně v blízkosti kamery, ale mohou být umístěny separovaně, aby se docílilo pokrytí požadovaných oblastí.



■ **Obrázek 4.11** Vlevo na obrázku je RPi camera 3 NoIR pro modul RPi, uprostřed je ESP32-CAM s kamerou OV2640 a napravo senzor pro detekci pohybu HC-SR505. Zdroj: e-shop **Drátek**. a **RPishop**.

Aby mohly být všechny měřené metriky přeposílány do internetu, je potřeba mít modul, který dokáže používat službu GPRS. Dostupným řešením je modul **SIM800L**. Tento modul je vhodný pro použití v IoT systémech kvůli jeho malé velikosti a nízké spotřebě energie. Je snadno ovladatelný pomocí AT ² příkazů a dokáže poslat zprávu, uskutečnit hovor nebo přenášet data. V případě agrivoltaického systému je nejdůležitější funkcionalitou přenášení dat.



■ **Obrázek 4.12** GSM a GPRS modul SIM800L s externí anténou. Zdroj: e-shop **Drátek**.

Senzorů, které poskytují požadované metriky pro monitorovací systém, je na trhu velké množství. Tento text je pouze ukázkou, jaké senzory by se mohly použít pro případ použití agrivoltaického systému. Pro zajištění větší spolehlivosti senzorů je nutno se podívat po průmyslových senzorech, které jsou mnohonásobně dražší možností. Nicméně pro ověření konceptu jsou zmiňované senzory dostačující, ale při reálném nasazení celého systému je faktor spolehlivosti a poruchovosti senzorů mnohem důležitější. Internetový obchod **Mouser electronics** je dobrým zdrojem kvalitních průmyslových senzorů pro Českou republiku.

²AT příkazy jsou textové příkazy, používané pro konfiguraci modulů přes sériové rozhraní. Příkazy mají obvykle formu "AT" následované konkrétním příkazem. Více informací zde

4.2.2 Ukládání dat a zobrazení

Secke popisuje přístupy ukládání nasbíraných dat a jejich následné zobrazení. Uvažuje se zde nad různými přístupy práce s daty a jaké jsou současné možnosti na trhu. V současnosti se rozhoduje, zda přecházet do cloudových řešení či používat lokální řešení. Jsou podrobněji popsány výhody a nevýhody každého z přístupů a jaký by byl vhodnějším pro monitorovací systém.

Přístupy jak ukládat data

Při navrhování monitorovacího systému pro sběr dat je nutné si jasně určit, kde budou všechny data ukládány. V tomto případě jsou zde dvě hlavní možnosti: Lokální ukládání dat nebo ukládání dat do Cloudového úložiště. Oba přístupy mají své výhody a nevýhody, takže je potřeba si je vypsát a zjistit, který přístup je vhodnější pro prostředí agrivoltaického systému.

Lokální úložiště

- + Není zapotřebí internetového připojení pro ukládání dat
- + Jste vlastníkem kompletního řešení, takže si jej můžete upravovat dle libosti
- + Lokální ukládání je mnohem rychlejší než posílání do cloudu
- + Může být hodně levným řešením
- - Všechna data jsou uložena lokálně, tedy leží na poli
- - Správa lokálního úložiště je dlouhodobě podstatně nákladnější oproti cloudu

Cloudové úložiště

- + Data jsou přístupná odkudkoliv, když jste na internetu
- + Správa úložiště je kompletně na poskytovateli
- + Některá řešení jsou zdarma pro malé množství dat nebo platíte úměrně podle využití
- + Velmi jednoduchá škálovatelnost, stačí říct poskytovateli
- - Jste závislí na připojení k internetu
- - Poskyvatel cloudového řešení je zodpovědný za bezpečnost

V porovnání jsou jednotlivá řešení naprosto rozdílná. Lokální úložiště spoustu pozitivních vlastností a je velice jednoduchým řešením pro nasazení. Také počáteční cena by měla být menší. Bohužel velkým problémem jsou dvě negativní vlastnosti zmíněné výše. Fakt, že všechna data budou uložena lokálně je pro řešení v případě agrivoltaického systému velmi nevyhovující, protože prostředí je kompletně izolované a přístup k datům by nebyl možný. Druhým velmi nepříjemným bodem lokálního úložiště je dlouhodobá správa či údržba. Jakákoliv změna nebo nutnost rozšíření úložiště vyžaduje manuální zásah do systému, což je také velmi nevyhovující vlastnost. V případě, že by firma měla nasazených více agrivoltaických systémů, průběžná údržba by byla nákladnou položkou.

Cloudové úložiště má téměř opačné vlastnosti ku úložišti lokálnímu. Velkým rozdílem je, že data jsou přístupná odkudkoliv, kde je přístup k internetu. Tato vlastnost je naprosto vyhovující, protože přístup k datům může mít nejen správce systému, ale i klient. Veškeré změny mohou být také dělány na dálku přes internet a v případě škálování úložiště, tak veškeré kroky realizace jsou na straně poskytovatele cloudového úložiště. Negativem je nutnost připojení k internetu jak ze strany monitorovacího systému, tak i ze strany uživatele. Nicméně přístup k internetu je jedním ze základních požadavků pro návrh IoT sítě, takže toto negativum není překážkou.

Dalším negativem je, že nemáte fyzickou kontrolu na daty. Poskytovatel je zodpovědný za správné nakládání s daty a jejich bezpečnost. Povaha sbíraných dat v agrivoltaickém systému není nijak osobní, tudíž není se tolik starat o bezpečné ukládání dat. Kdyby nastal únik dat ze strany poskytovatele, lidé by se dozvěděli jaká byla teplota a vlhkost v agrivoltaickém systému. Jediné potenciální riziko by byla manipulace s daty a jejich úmyslná úprava, která by znehodnotila sběr dat celého systému.

Výsledkem porovnání je, že přístup použití lokálního úložiště má nevyhovující vlastnosti pro prostředí agrivoltaického systému. Navíc dnešní technologie směřují do cloudových řešení a tato volba poskytuje řešení na velkou škálu problému spojených s ukládáním dat. Většina těchto problémů a zodpovědností je právě převedena na poskytovatele. Na druhou stranu je zde povinnost pravidelně platit poskytovateli za jeho služby, a to na základě množství dat, které je do jejich řešení zapsáno, uchováváno a dále zpracováváno. Presentování jednotlivých přístupů a konzultace s firmou Zenergo vyústily ve velice pozitivní vztah ke cloudovému řešení i z hlediska byznysu, kdy velká část infrastruktury a práce je převedena na třetí stranu.

Převodem zodpovědností na poskytovatele cloudu se ale vytváří nová povinnost, a to výběr poskytovatele. Na internetu je možností celá řada, ale pro krátký přehled je zde uvedeno pár poskytovatelů.

AWS

Firma Amazon provozuje největší internetový obchod na světě, který nese stejné jméno. Toto odvětví je jedním z největších zdrojů příjmů pro tuto firmu a roku 2006 [68] se rozhodla rozšířit své pole působnosti tím, že začala jako jedna z prvních poskytovat cloudové služby. Dnes je jedním z největších a nejkompexnějších řešení na trhu, poskytující více než 200 různých služeb v prostoru jejich cloudu. Pro účely ukládání dat z agrivoltaického systému nabízí například službu **AWS Timestream**, což je databáze navržená pro ukládání dat v časových řadách.



■ **Obrázek 4.13** Logo služby Amazon Web Services od firmy Amazon. Jedná se o jednoho z největších poskytovatelů cloudových služeb. Zdroj: **AWS**

Google Cloud

Celosvětově nejpoužívanější internetový vyhledávač Google je jen kapkou v moři produktů, které stejnojmenná firma poskytuje. Od roku 2011[69] se firma také rozhodla vkročit do trhu poskytování cloudových služeb, platforma byla sice ohlášena dříve, ale dostupná začala být až od roku 2011. Google Cloud nabízí velkou škálu nejrůznějších služeb, ale pro účely uskladnění dat v časových řadách je přímo poskytována služba **Cloud Bigtable**. Jedná se o velké univerzální řešení, které poskytuje databáze všeho druhu, ale v našem případě také možnost použít tuto službu pro ukládání časových řad.



■ **Obrázek 4.14** Logo služby Google Cloud od firmy Google. Firma kromě nejpoužívanějšího vyhledávacího nástroje na světě je také jedním z velkých poskytovatelů cloudových služeb. Zdroj: **Vector-LogoZone**

InfluxDB Cloud

Předchozí dva poskytovatelé jsou vyloženě obři na poli cloudových řešení. Problém cloudového uskladnění dat pro agrivoltaický systém je specifický případ a na trhu jsou poskytovatelé přímo pro uskladnění dat v časových řadách. Jedním z hlavních poskytovatelů, pro tento případ užití, je firma InfluxData, která oficiálně vznikla v roce 2015[70]. Hlavním produktem firmy je databáze určená pro sběr dat v časových řadách, InfluxDB, která je open-source řešením. InfluxDB může být nasazena lokálně kompletně zdarma, nicméně firma již nabízí variantu tohoto produktu zvanou **InfluxDB Cloud**. Značnou výhodou pro oblast IoT řešení je, že firma také vyvíjí a podporuje nástroj **Telegraf**, který zajišťuje jednoduchý sběr a ukládání dat do databáze.



■ **Obrázek 4.15** Logo firmy InfluxData. Tato firma vyvíjí a podporuje open-source produkt InfluxDB. Je hodně používaným poskytovatelem v oblasti IoT. Zdroj: **SeekVectorLogo**

Zajímavostí je, že toto řešení poskytuje firma Influx Data, ale zároveň jej můžete mít k dispozici u velkých cloudových poskytovatelů jako jsou zmiňovaní Amazon a Google. Hlavním faktorem při výběru poskytovatelů je cena. Diplomová práce uvažuje realizaci a nasazení monitorovacího systému na pouze jeden agrivoltaický systém, tudíž současné řešení je natolik malé, že množství dat i počet čtení by měl být stále v omezeních bezplatného plánu pro InfluxDB Cloud. Z byznysového hlediska, když by se monitorovací řešení začalo aplikovat na více agrivoltaických systémů nebo by se zvětšilo množství zařízení a sbíraných dat, bezplatný plán od Influx Data by nemusel stačit. Všichni tři poskytovatelé nabízí měsíční platby za jejich služby na základě využívání. Zde jsou přehledně seřazeny ceny za využívání služeb u všech zmiňovaných poskytovatelů.

Služba	Zápis dat	Čtení dat	Ukládání dat
AWS Timestream	\$0.0125/GB	\$0.0113/GB	\$0.0407/GB/hod
Google Cloud Bigtable	\$0.78/hod	\$0.78/hod	\$0.03/GB/měsíc
InfluxDB Cloud	\$0.002/MB	\$0.09/GB	\$0.09/GB/hod

■ **Tabulka 4.5** Srovnání cen pro AWS Timestream[71], Google Cloud Bigtable[72] a InfluxDB Cloud[73]. Google Cloud Bigtable má jinou cenovou politiku, kde se platí hodinová částka za běžící uzel v jejich cloudovém řešení, takže cena není jednoduše porovnatelná s ostatními poskytovateli. Zápis a čtení poté není zpoplatněno.

Vizualizace nasbíraných dat

Cloudové služby pro poskytnutí uskladnění jsou již komplexním řešením sami o sobě a dovolují vizualizovat data, které ukládají. Jedinou nevýhodou tohoto přístupu je, že není možnost oddělit logický přístup k vizualizaci a uskladněným datům. Proto by bylo vhodnější využití jiného řešení pro vizualizaci uskladněných dat a kompletně tyto dvě funkcionality oddělit. Jelikož součástí diplomové práce není řešení škálování monitorovacího systému, je zde uváděno pouze na teoretické rovině a jaké by byly přístupy, takže z předchozí části je patrné, že vyhovujícím řešením pro uskladnění dat je InfluxDB Cloud. Nyní pro toto uskladnění je zapotřebí najít službu, která poskytuje vizualizaci dat. Jedním z lídrů na trhu pro zobrazení metrik je firma Grafana, která zároveň podporuje propojení s InfluxDB. Takže kompatibilita obou služeb je zaručená a navíc Grafana také poskytuje bezplatnou verzi svých služeb.

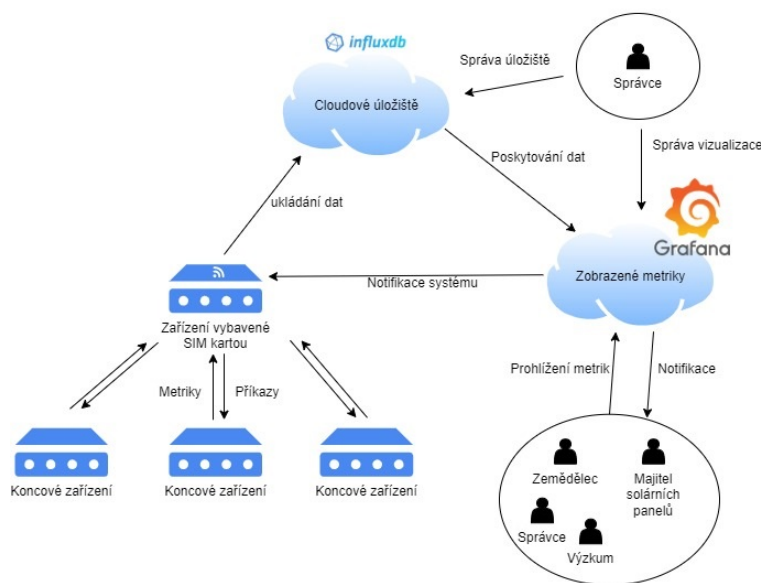


■ **Obrázek 4.16** Logo firmy Grafana. Grafana vyvíjí a podporuje stejnojmenný open-source software pro vizualizaci a analýzu dat. Zdroj: [WikipediaCommons](#)

V případě potřeby škálování tohoto řešení Grafana nabízí dvě placené varianty[74]. Verze Pro, která stojí fixní měsíční poplatek \$29, a verzi Advanced, kde měsíční poplatek činí \$299. Opět v tomto případě je bezplatná verze naprosto postačující.

Diagram aktivit monitorovacího systému

Zde je názorný diagram aktivit monitorovacího systému z pohledu síťového provozu. Je zde detailně popsáno, jak se systém chová a jak ho mohou uživatelé ovlivnit. Diagram obsahuje všechny základní aktivity, které v systému mohou nastat.



■ **Obrázek 4.17** Diagram aktivit monitorovacího systému s využitím cloudových řešení. Diagram obsahuje fyzická zařízení, cloudové služby a uživatele.

Se systémem mohou interagovat čtyři základní typy uživatelů. Správce je typ uživatele, který musí být přítomen pro spravování a případné upravování celého systému. Může spravovat cloudové služby, prohlížet si vizualizované metriky a dostává notifikace v případě chyb v systému. Agrivoltaický systém nemůže existovat bez zemědělce, který vlastní celý objekt a stará se o rostliny pod solárními panely. Majitel solárních panelů může být také zemědělec, ale jsou i scénáře, kdy solární panely financuje někdo jiný. V neposlední řadě je zde uživatel z akademické sféry, který provádí výzkum na poli agrivoltaiky. Všichni tyto uživatelé musí mít přístup k sledování vizualizovaných metrik. Notifikace dostává zemědělec, případně i vlastník solárních panelů, týkající se stavu objektu.

Fyzická zařízení, která se nacházejí v agrivoltaickém systému, se dělí na dvě kategorie. První kategorií jsou malá zařízení, která jsou součástí sítě a sbírají metriky, případně reagují na příkazy od přístupového bodu sítě. Druhá kategorie obsahuje zařízení, která jsou vybavena SIM kartou, tudíž mají přístup k internetu. V této kategorii se nachází zařízení s větší výpočetní silou, protože jsou zároveň přístupovými body, které tvoří celou síť pro monitorovací systém. Zařízení vybavená SIM kartou sbírají metriky od malých zařízení a následně je ukládají v cloudovém úložišti.

Prostor mimo agrivoltaický systém se nachází na internetu, resp. v cloudu u poskytovatele. V případě služby cloudového úložiště je zde využito poskytovatele InfluxData se službou InfluxDB Cloud. Tato služba přijímá metriky agrivoltaického systému od zařízení vybavených SIM kartou. Dále poskytuje data vizualizační službě. Správa úložiště může být prováděna správcem řešení. Vizualizace metrik probíhá v cloudové službě od firmy Grafana, která je propojená s úložištěm a doluje z něj požadovaná data. Správce opět tuto službu může jako jediný spravovat, ale všichni uživatelé si mohou prohlížet vizualizovaná data. Někteří také mohou dostávat notifikace v případě zjištění neobvyklých hodnot. Dále služba může zpětně notifikovat zařízení vybavené SIM kartou o nejrůznějších událostech.

4.3 Projektovaná cena

Monitorovací systém byl velmi detailně popsán a navržen, aby vyhovoval požadavkům technickým, tak i byznysovým. Pro finanční proveditelnost je však zapotřebí odhadnout cenu za nasazení monitorovacího systému. Tato položka není pevně daná částka a záleží na celé řadě faktorů jako potřeba většího počtu zařízení pro měření či volba jiných senzorů.

Do kalkulace musí být zařazeny náklady na fyzická zařízení, senzory, cloudové služby, SIM karty a spotřebu elektřiny. Pro stanovení odhadu je potřeba si určit množství zařízení, které budou nasazeny v monitorovacím systému. Jako příklad bude použit následující scénář:

- Fyzická zařízení
 - 3x RPi 3B+
 - 2x ESP32-CAM
 - 20x ESP8266
- Sensory
 - 2x RPi camera 3 NoIR
 - 10x kapacitní čidlo vlhkosti půdy
 - 10x vodotěsné teplotní čidlo DS18B20
 - 20x čidlo teploty, vlhkosti a barometrického tlaku BME280
 - 15x čidlo pro detekci intenzity slunečního záření BH1750
- Ostatní součástky
 - 3x SIM karta
 - 3x modul SIM800l
 - 4x paměťová karta pro kamery

Ceny jednotlivých položek byly získány z velkých internetových obchodů v České republice jako **Drátek** (odkaz) a **RPishop** (odkaz). SIM kartu pro IoT účely nabízí operátor **Vodafone** (odkaz) a cena paměťových karet byla zjištěna na obchodě **Alza** (odkaz).

Pořizovací cena monitorovacího systému

Položka	Cena za kus	Počet	Cena
Raspberry Pi model 3B+	1 199 Kč	3 KČ	3 597 Kč
ESP32-CAM	310 Kč	2 KČ	620 Kč
ESP8266	147 Kč	20 KČ	2 940 Kč
Rpi camera 3 NoIR	695 Kč	2 KČ	1 390 Kč
Čidlo vlhkosti půdy	47 Kč	10 KČ	470 Kč
DS18B20	69 Kč	10 KČ	690 Kč
BME280	289 Kč	20 KČ	5 780 Kč
BH1750	57 Kč	15 KČ	855 Kč
HC-SR505	45 Kč	3 KČ	135 Kč
SIM800I	279 Kč	3 KČ	837 Kč
SIM karta	449 Kč	3 KČ	1 347 Kč
Paměťová karta 16GB	159 Kč	4 KČ	636 Kč
Cena celkem:			19 297 Kč

Odhadovaná roční cena energií

Zařízení	Spotřeba energie (v mA)	Počet zařízení	Celkem spotřeba
Raspberry Pi model 3B+	1000	3	3000 mA
ESP32-CAM	200	2	400 mA
ESP8266	100	20	2000 mA
Denní spotřeba (24 hodin)			0,13 kWh
Roční spotřeba (365 dní)			47,304 kWh
Cena za kWh			6,00 Kč
Cena energií ročně			283,82 Kč

■ **Obrázek 4.18** Odhadovaná pořizovací cena monitorovacího systému a náklady na provoz.

Možná rozšíření systému

Při diskuzích s firmou Zenergo bylo ještě zmíněno pár funkcionalit, které nejsou součástí momentálních požadavků na monitorovací síť, ale jsou to možnosti, jak by se tento systém mohl rozrůst. Potenciálním rozšířením sbíraných dat by mohly být povětrnostní podmínky uvnitř a vně agrivoltaického systému. Tato metrika by se stala relevantní, kdyby se na agrivoltaický systém instalovala ochranná síť pro ochranu rostlin před nepříznivými vlivy počasí či ptactvem. Další kompletně novou funkcionalitou pro tento systém by mohlo být automatické zavlažování, které by mohlo být lokalizováno. Na tuto myšlenku bylo navázáno adaptací agrivoltaického systému na sběr dešťové vody, která by stékala po panelech, tudíž detekce deště a hlídání kapacity nádrže s dešťovou vodou by byla kompletně nová funkcionalita pro tento systém. Myšlenka automatického zavlažování je podstatně komplexnější, kde by bylo potřeba vymyslet jak ovládat potrubní systém, aby se voda dostala do správné lokality. Dalším bezpečnostním prvkem by také mohl být detektor otevřených dvířek pro rozvodové krabičky pro solární panely.

Implementace a realizace řešení

Vzhledem k cenové náročnosti kompletního navrhovaného řešení je nemožné provést realizaci v plném rozsahu. Proto je celá implementace je vedena ve formátu ověření navrhovaného konceptu s cílem splnit všechny požadavky na systém. To znamená implementaci všech nutných součástí monitorovacího systému od sběru fyzických dat po jejich zobrazení ve službě Grafana. Je zde popsáno jakých prostředků se používá pro získání požadovaných metrik, jejich následné shromáždění v síti, odeslání do cloudového úložiště InfluxDB, struktury ukládaných dat a spojení se službou Grafana pro jejich výsledné zobrazení.

Po implementování základního případu užití monitorovacího systému pro sběr dat. Dále popsáno fyzické zabezpečení pomocí kamer a způsob řešení logiky kamerového systému. Kapitola je rozvržena do sekcí, které kopírují životní cyklus sbíraných dat. V neposlední řadě je kladen důraz na energetickou úspornost celého systému, takže jsou uvedeny metody a pokusy jak implementaci udělat efektivnější.

5.1 Sběr dat z agrivoltaického systému

Základním požadavkem pro řešení je realizace sběru dat. K tomu je zapotřebí zprovoznit síť WiFi na zařízení RPi, zapojení senzorů k zařízením ESP a posílání sbíraných dat pomocí protokolu MQTT. RPi také potřebuje detailní konfiguraci MQTT brokera, připojení do internetu a cloudovému úložišti. Všechny tyto body jsou popsány v části kapitoly níže. Následující zapojení a konfigurace jsou popsány ve formě detailního návodu pro jednoduchou reprodukci navrhovaného řešení.

5.1.1 Konfigurace sítě monitorovacího systému

Zařízení RPi bylo vybráno jako ideální kandidát pro realizaci klíčového bodu v síti monitorovacího systému. Je to především kvůli požadavkům systému na přítomnost dostatečně výkonného zařízení, které dokáže provozovat MQTT brokera a dokáže realizovat síť pomocí technologie WiFi. Samozřejmě lze tyto role v systému oddělit, ale pro úspornost řešení je vhodnějším řešením mít vše v jednom zařízení, protože bez sítě WiFi je MQTT broker k ničemu a naopak.

Následující konfigurace a zapojení RPi jsou předpoklady:

- RPi s nainstalovaným operačním systémem jako například Rasbian
- Je možné se připojit k zařízení přes SSH
- Pokročilé znalosti používání terminálu a správy sítí

Možností jak nastavovat RPi je mnoho, ale nejjednodušším přístupem je použití SSH připojení k zařízení a použití čistě příkazové řádky. Tomuto přístupu se říká "headless RPI", což znamená používání bez jakýchkoliv periférií.

Nastavení přístupového bodu

Následující část sekce obsahuje podrobný popis konfigurace RPi 3B+, aby mohl sloužit monitorovacímu systému jako přístupový bod.[75] Součástí postupu je také konfigurace modulu SIM800L, který slouží k připojení do internetu.[76]

1. Připojte se k zařízení RPi pomocí SSH účtu, který musí mít práva používat příkaz sudo.
2. Aktualizujte zařízení pomocí následujících příkazů:

■ Výpis kódu 5.1 Aktualizace RPi.

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade
```

3. Pro provozování RPi jako přístupový bod sítě WiFi jsou zapotřebí aplikace **hostapd** (nástroj pro správu přístupového bodu) a **dnsmasq** (program pro automatické přidělování IP adres v síti). Pro správu SIM modulu je nutné nainstalovat aplikace **ppp**, **screen** a **elinks**. Aplikace nainstalujte pomocí následujících příkazů:

■ Výpis kódu 5.2 Instalace aplikací hostapd a dnsmasq pro WiFi. Instalace aplikací pro používání SIM modulu.

```
$ sudo apt-get install hostapd dnsmasq
sudo apt-get install ppp screen elinks
```

4. Jakmile jsou aplikace nainstalovány, nyní je zapotřebí je nakonfigurovat. Nejdříve ale musí být zastavena aplikace hostapd. To se provede příkazem:

■ Výpis kódu 5.3 Zastavení hostapd.

```
$ sudo systemctl stop hostapd
```

5. První konfigurací, kterou je potřeba provést, je nastavení statické IP adresy pro bezdrátové rozhraní **wlan0** (jméno se může lišit) v konfiguračním souboru **/etc/dhcpd.conf**. Následující řádky přidejte do konfiguračního souboru a uložte:

■ Výpis kódu 5.4 Statická konfigurace rozhraní

```
interface wlan0
    static ip_address=192.168.4.1/24
```

6. Bezdrátové rozhraní má svoji IP adresu, dalším krokem je poskytnout dalším zařízením v síti dostatečnou IP konfiguraci, aby mohly komunikovat v síti okamžitě po připojení. Následující konfigurace se aplikuje v souboru **/etc/dnsmasq.conf** a poskytuje rámeč 30 IP adres pro zařízení připojující se k rozhraní wlan0.

- **Výpis kódu 5.5** Kofigurace automatického přidělování IP adres.

```
interface=wlan0
dhcp-range=192.168.4.2,192.168.3.32,255.255.255.0,24h
```

7. Poslední velkou konfigurací je nastavení aplikace hostapd. Pomocí následujících řádek je možné spravovat spoustu důležitých vlastností sítě WiFi. Nejdůležitějšími řádky jsou interface (rozhraní realizující síť WiFi), ssid (jméno sítě) a wpa_passphrase (heslo sítě). Konfigurace obsahuje spoustu dalších řádků, které budou popsány níže v části zabezpečení monitorovacího systému. Následující konfiguraci přidejte do souboru `/etc/hostapd/hostapd.conf` nebo soubor vytvořte:

- **Výpis kódu 5.6** Konfigurace přístupového bodu.

```
interface=wlan0
driver=nl80211
ssid=NazevSite
hw_mode=g
channel=7
wmm_enabled=0
macaddr_acl=0
auth_algs=1
ignore_broadcast_ssid=0
wpa=2
wpa_passphrase=HesloProPristup
wpa_key_mgmt=WPA-PSK
wpa_pairwise=TKIP
rsn_pairwise=CCMP
```

8. Nyní se namapuje konfigurace z předchozího kroku, aby mohla být použita při spuštění zařízení. Následující řádek přidejte do `/etc/default/hostapd`:

- **Výpis kódu 5.7** Nastavení automatického spouštění hostapd.

```
DAEMON_CONF="/etc/hostapd/hostapd.conf"
```

9. Nastavení sítě WiFi je hotové, následuje konfigurace SIM modulu, pro který byly nainstalovány aplikace v kroku číslo 2. První nutnou konfigurací je soubor `ppp-peer`, který nastavuje základní vlastnosti zařízení jako cesta k zařízení nebo symbolovou rychlost (baud rate). Následující konfiguraci přidejte do souboru `/etc/ppp/peers/ppp-peer`:

- **Výpis kódu 5.8** Nastavení ppp-peer souboru, obsahující základní konfigurace.

```
/dev/ttyAMA0
115200
noauth
local
persist
defaultroute
usepeerdns
noipdefault
```

10. Po nastavení základních vlastností zařízení je potřeba určit jakým způsobem se SIM modul bude připojovat do sítě operátora. Vytvořte soubor `ppp-chat`, který bude poté použit při inicializaci zařízení. Je zde velice důležitá proměnná v konfiguraci, a to řetězec **APN**. Tato

hodnota musí být upravena na základě jakou SIM kartu používáte. Následující konfiguraci přidejte do souboru `/etc/ppp/peers/ppp-peer`:

- **Výpis kódu 5.9** Nastavení ppp-chat souboru, obsahující základní konfigurace.

```
' ' ATZ
OK AT+CGDCONT=1,"IP","APN"
OK ATD*99#
CONNECT
```

11. Třetí a poslední krok, který je potřeba udělat v rámci inicializace SIM modulu je vytvoření spouštěcího skriptu `chat-connect`. Tento skript dovoluje aplikaci PPP použít výše vytvořené soubory pro navázání spojení, tím, že slinkuje příkaz `chat` s `ppp-chat`. Proto následující soubor vytvořte v `/usr/sbin/chat-connect`:

- **Výpis kódu 5.10** Spouštěcí skript pro aplikaci PPP

```
#!/bin/sh
/usr/sbin/chat -v -f /etc/ppp/ppp-chat
```

12. Nakonec stačí povolit spouštění skriptu, spustit aplikaci PPP a restartovat aplikace `hostapd` a `dnsmasq`:

- **Výpis kódu 5.11** Aktivace SIM modulu a restart aplikací pro WiFi.

```
$ sudo chmod +x /usr/sbin/chat-connect
$ sudo pon ppp-peer

$ sudo systemctl restart dnsmasq
$ sudo systemctl restart hostapd
```

Výsledkem by měla být nová síť WiFi, která obsahuje zvolené jméno a lze se k ní přihlásit pomocí zvoleného hesla. Také by RPi by mělo být schopné odesílat data do internetu, což se dá jednoduše ověřit například přes webový prohlížeč nebo použitím příkazu `ping` a získat odpověď od libovolné internetové stránky.

Propojení zařízení

Na nově nakonfigurované síti je nyní potřeba vytvořit MQTT brokera. V návrhu byly uvedeny možnosti různých brokerů. Vybraným řešením je Mosquitto broker, jelikož se jedná o open-source řešení, které lze bezplatně používat a je velmi oblíbený.

Zde je instalace velice jednoduchá, systém je již aktualizovaný z předchozí části, takže stačí provést instalaci balíčku pomocí `apt - get`:

- **Výpis kódu 5.12** Instalace MQTT brokera Mosquitto a nastavení automatického spouštění služby.

```
$ sudo apt install -y mosquitto mosquitto-clients
$ sudo systemctl enable mosquitto.service
```

Zde po dokončení instalace se služba sama ihned spustí a pro základní použití stačí výchozí konfigurace. Druhý příkaz je taktéž velmi důležitý a slouží pro automatické spouštění služby v případě restartu zařízení. Běžící služba poslouchá na **portu 1883**, což je opět výchozí port používaný pro MQTT služby. V případě potřeby je nutné port 1883 otevřít pro anonymní klienty, ale v mém případě jsem nemusel dělat žádné úpravy.

Nyní po použití této konfigurační příručky je zařízení RPi připraveno fungovat jako přístupový bod své vlastní WiFi sítě, ke které se mohou připojovat další zařízení a mohou být v této síti posílány zprávy pomocí MQTT. Později je rozebráno přemostování a propojování dalších takových zařízení dohromady, aby mohly tvořit kompletní monitorovací systém.

5.1.2 Implementace měřících zařízení

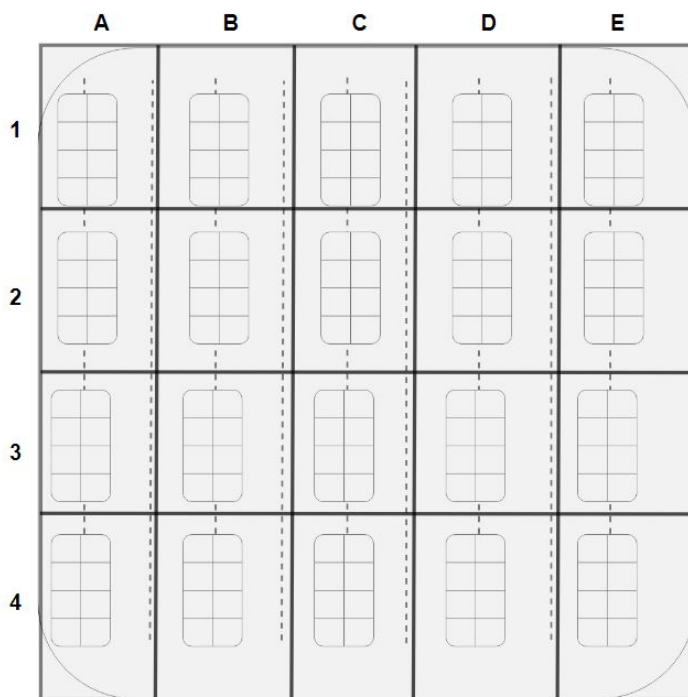
Nyní je zapotřebí do sítě zapojit jednotlivá malá zařízení, která fyzicky sbírají metriky důležité pro agrivoltaický systém. Je zde názorně popsáno jak jsou zařízení zapojena, jak jsou implementována a v jakém formátu budou data posílána pomocí protokolu MQTT.

Formát témat

Protokol MQTT využívá principu, kdy se jednotlivá zařízení mohou přihlásit k odběru libovolné množiny témat a mohou také publikovat zprávy pro libovolné téma. Aby publikovaná informace byla relevantní a použitelná, je důležité si stanovit formát používaných témat.

Nejdůležitější vlastností informace je její lokalizace, tedy v jaké části agrivoltaického systému byla informace získána. Jelikož je agrivoltaický systém pravidelná struktura, lze ji rozdělit po logických celcích, například na jednotlivé panely. Možností, jak rozdělit tuto plochu na jednotlivé části, je neomezeně mnoho a závisí na mnoha faktorech, ale nejdůležitější je rozhodnutí, jaká granularita informací je od systému očekávána.

Vhodným řešením rozdělení agrivoltaického systému je například rozdělení celé plochy do mřížky, stejně jako v podkapitole 3.2.1 Teoretické řešení pokrytí.



■ **Obrázek 5.1** Schéma lokalizace senzoru v agrivoltaickém systému. Je zde využito formátu šachovnice, kde každý sektor je jednoznačně určen kombinací čísla řádku a písmenka sloupce.

Horizontální rozdělení systému tedy lze řešit pomocí unikátního identifikátoru jednotlivých řádků a sloupců mřížky. Následná kombinace těchto hodnot dokáže jednoznačně určit o jakou část se jedná. První úroveň všech používaných témat v monitorovacím systému musí být kombinace těchto hodnot, tedy hodnoty **<1-9><A-Z>**.

Když jsou zařízení lokalizována pomocí první úrovně témat, nyní je zapotřebí určit vertikální polohu publikované informace. Během navrhování v podkapitole 4.2.1 se určily čtyři rozdílná prostředí, ve kterých se sbírají rozdílná data. Jedná se o prostředí půdy, mikroklima těsně nad zemí, v otevřeném prostoru mezi zemí a solárními panely a blízkosti solárních panelů. Tyto hodnoty se mohou jednoduše označit klíčovými slovy, pro univerzálnější pojmenování jsou použity anglické názvy **<soil, ground, mid, top>**.

Nyní je známa jak horizontální, tak i vertikální poloha všech zařízení pomocí prvních dvou úrovní témat. Další úroveň je zapotřebí systému sdělit povahu informace, zda se jedná o naměřená data ze senzorů, informace o provedené akci v systému nebo jakákoliv jiná upozornění. To již stačí na základní rozdělení typů zpráv na **<DATA,INFO,WARN>**.

Poslední úroveň je definování typu senzoru. Na základě návrhu, kdy se vynechá určení lokality (definováno pomocí předchozích úrovní), lze typy čidel definovat na čtyři hlavní možnosti **<temperature, moisture, light, motion>**. Názorná ukázka aplikace všech úrovní při tvorbě formátu témat:

2B/ground/DATA/temperature

Ukázkové téma obsahuje sbíraná data ze senzoru teploty v blízkosti rostlin pro část systému 2B. Všechny úrovně mohou být libovolně expandovány, ale výše popisovaný formát je základní strukturou pro přehlednou práci s publikovanými informacemi.

Zapojení a implementace senzorů

Zde je detailně rozebráno zapojení jednotlivých zařízení, které jsem v rámci ověření konceptu implementoval a realizují základní požadavky monitorovacího systému. Jedná se konkrétně o čtyři typy zařízení:

- Modul v blízkosti rostlin
- Modul v ovzduší a pod solárními panely
- Kamera s Nočním viděním
- Modul detekce pohybu

Zásadním zařízením pro implementaci je modul, který je v blízkosti rostlin. Tento modul pokrývá 2 vertikální sektory z návrhu, jimiž jsou půda a sektor v blízkosti rostlin. Proto musí být k zařízení ESP zapojeny následující senzory:

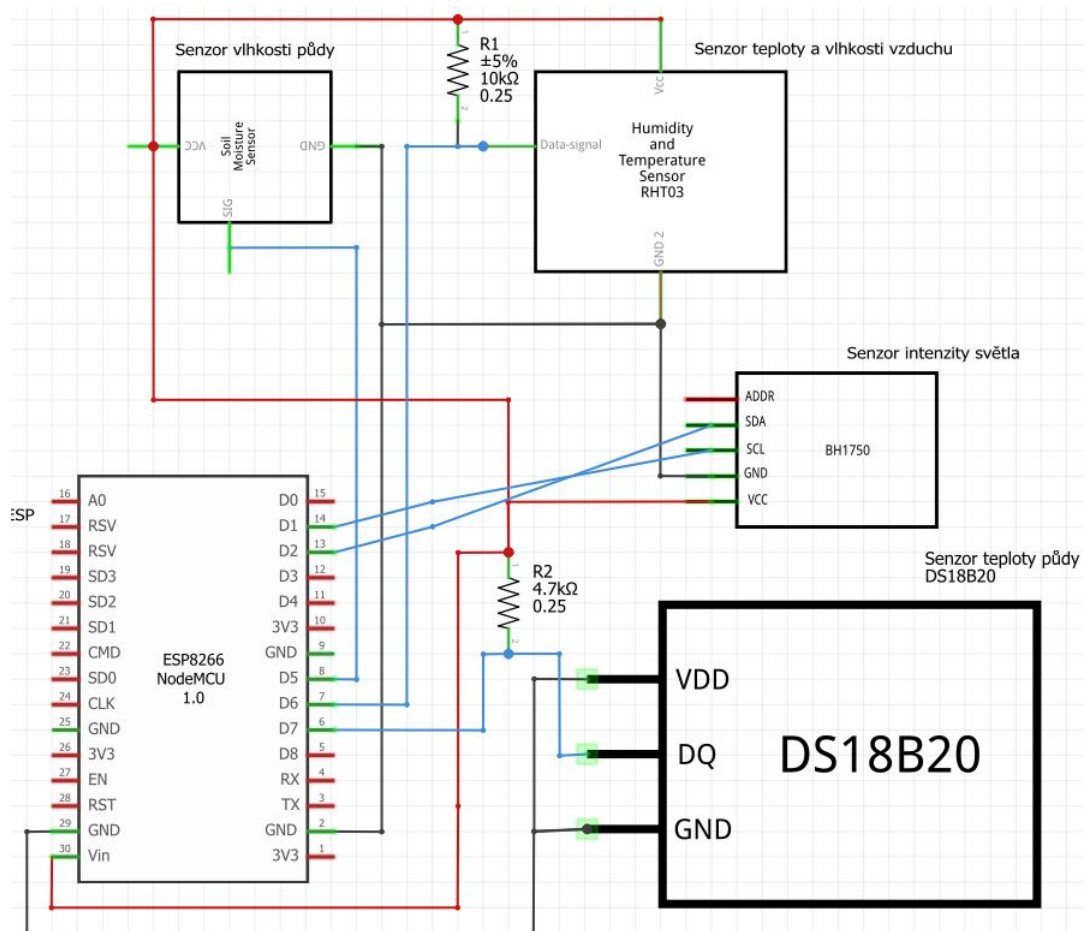
- Senzor vlhkosti půdy
- Senzor teploty půdy DS18B20
- Senzor teploty a vlhkosti ovzduší DHT22
- Senzor intenzity světla DH1750

Nyní budou popsány jednotlivé senzory a jejich propojení s ESP. Při tvorbě schémat zapojení je využito zařízení ESP8266 NodeMCU.

První na seznamu je senzor měřící vlhkost půdy. Zařízení má tři piny: GND, přívod napájení s napětím 5V a analogový datový pin. Je tedy nutné připojit datový pin k analogovému pinu A0 na čipu ESP.

Senzor DS18B20 má opět pouze tři piny: napájení, GND a datový pin. Toto zařízení může být zapojeno dvěma způsoby. Klasickým způsobem, kdy pin pro napájení je propojen s 5V pinem, nebo takzvaným parazitním způsobem. Parazitní přístup získává potřebné napájení přes datový pin, který je připojen k digitálnímu pinu na ESP a oba piny pro napájení i GND jsou propojeny se zemí. Důležitou součástí, kterou je potřeba zmínit, je rezistor R2 s odporem $4,7k\ \Omega$, který je propojený mezi 5V napájením a datovým pinem. Rezistor zajišťuje stabilní napětí ve spojení, když není linka zrovna používána. Kdyby se rezistor neinstaloval, datová linka by byla velmi náchylná na šum a jiná rušení signálu, které mohou vyústit v chyby při komunikaci či změny měřených dat.

Senzor DHT22 je osazen čtyři piny, ale reálně jsou použity pouze tři, napájecí pin, GND a digitální datový pin. Tentokrát zde není žádný alternativní přístup zapojení, takže napájecí pin je propojen s 5V napájením z ESP, země a datový pin s digitálním pinem u ESP. Je zde obdobný problém jako u předchozího senzoru, kde je zapotřebí zapojit rezistor mezi datovou a napájecí linkou. Pro toto zařízení je doporučeno použít $10k\ \Omega$ rezistor a také slouží pro zajištění stabilního napětí datové linky.



Obrázek 5.2 Schéma zapojení modulu v blízkosti rostlin. Hlavními součástkami jsou zařízení ESP a senzory pro měření teploty a vlhkosti ovzduší *DHT22*, teploty půdy *DS18B20*, vlhkosti půdy a intenzity slunečního záření *BH1750*. V zapojení se ještě nachází rezistor R1 o odporu $10k\ \Omega$ propojující datový a napájecí kabel. Poslední součástkou ve schématu je rezistor R2 o odporu $4,7k\ \Omega$ také propojující datový a napájecí kabel u senzoru *DS18B20*. Červeně označené kabely slouží pro napájení, černé pro uzemnění a modré jako datové.

Veškerá implementace modulů s mikrokontroléry ESP byla realizována pomocí platformy PlatformIO. Jedná se o velice podobné programovací prostředí jako ArduinoIDE a využívá i stejné syntaxe, pouze správa knihoven a projektů je realizována jiným způsobem.

Každý modul v síti musí mít implementovány 3 hlavní funkcionality. Musí se připojit do sítě WiFi, aby mohlo zařízení komunikovat. Další funkcionalitou je čtení dat z připojených senzorů a v neposlední řadě je zde funkcionalita odesílání zpráv do sítě pomocí protokolu MQTT.

Připojení se do sítě WiFi je poměrně přímočarou akcí, kde je využito knihovny *WiFi.h*. Pro nastavení hodnot je použito maker pro snadnou editaci.

■ **Výpis kódu 5.13** Procedura inicializace WiFi připojení.

```
void setup_wifi() {

  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(WIFI_SSID);

  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}
```

Zaručení funkcionality čtení senzorů je velice přímočaré a vždy se využívá doporučených knihoven.[77] Naopak mnohem zajímavější je poslední funkcionalita, která je zaměřena na implementaci MQTT. Zde jsou procedury *callback*, pro přijímání zpráv, a *reconnect*, pro navazování spojení s MQTT brokerem.

■ **Výpis kódu 5.14** Procedura callback a reconnect, které slouží pro navázání spojení s MQTT brokerem a přijímání zpráv.

```
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived");
  Serial.print(topic);
  Serial.print(" ");
  for (int i=0;i<length;i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }
  Serial.println();
}

void reconnect() {

  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Attempting MQTT connection...");

    if (client.connect(DEVICE_ID)) {
      Serial.println("connected");
      client.subscribe(TOPICS_TO_SUBSCRIBE);
    }
  }
}
```

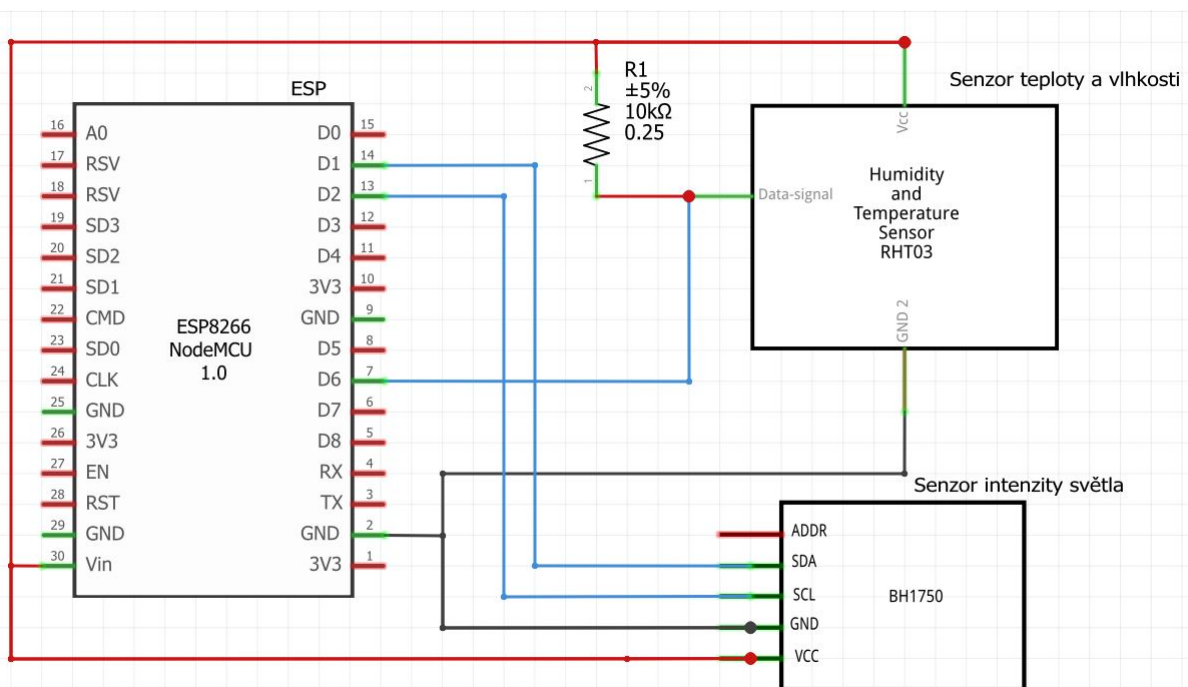
```

else {
  Serial.print("failed,rc=");
  Serial.print(client.state());
  Serial.println("try again in 5 seconds");
  delay(5000);
}
}
}
}

```

První proceduru (*callback*) je nutné implementovat, protože to po nás požaduje samotná knihovna. Formát je již předem specifikován, kde veškerá MQTT komunikace do zařízení přichází ve formátu: téma, obsah, délka. Tato procedura je zde implementována primárně pro ukázkové účely jak později používat zařízení více interaktivněji. Druhá procedura *reconnect* kontroluje stav připojení k MQTT brokerovy a případně se ho snaží znovu navázat. V případě neúspěchu se opětovně snaží připojovat, protože bez brokera zařízení nemůže měřená data ze senzorů nikam posílat.

Druhé zařízení, které jsem implementoval, je velice podobné tomu předchozímu, lišící se pouze v odebraných senzorech pro měření teploty a vlhkosti půdy. Toto zařízení by mělo být schopné pokrýt požadavky na měření ve vertikálních zónách nad rostlinami a pod solárními panely. Hlavním účelem pro tento modul je měření mikroklimatu v rozdílné výšce ve srovnání s modulem v blízkosti země. Také vhodným umístěním senzorů v blízkosti solárního panelu lze stejným postupem měřit teplotu solárních panelů.

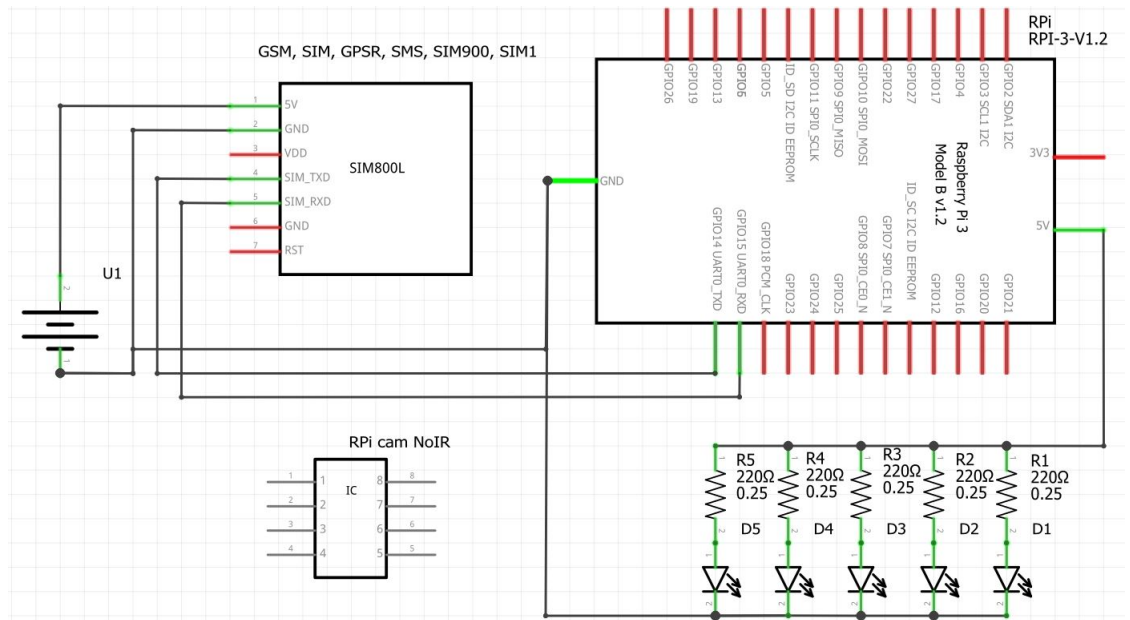


Obrázek 5.3 Schéma zapojení modulu v blízkosti rostlin. Hlavními součástkami jsou zařízení ESP a senzory pro měření teploty a vlhkosti ovzduší *DHT22* a intenzity slunečního záření *DH1750*. V zapojení se ještě nachází rezistor $R1$ o odporu $10k\ \Omega$ propojující datový a napájecí kabel.

Tento modul může využít totožnou implementaci, která byla uvedena u předchozího modulu. Musí být samozřejmě dodržena konzistentnost zapojení datových pinů u obou zapojení, což se ve zobrazovaných schématech liší.

Také zařízení RPi má k sobě připojeno několik modulů, ačkoliv již provozuje jiné kritické funkce monitorovacího systému. Právě toto celé zařízení splňuje požadavek na kamerový systém schopný provozu i v nočních hodinách. Aby však kamera mohla být v provozu za snížených podmínek viditelnosti, je zapotřebí nainstalovat na RPi také řadu infračervených diod. Tyto diody svítí infračerveným světlem, které nevidíme běžným okem, ale právě pro kameru bez infračerveného filtru je ideálním zdrojem nasvícení ve tmě.

Aby byly všechny požadavky na systém kompletní, je nutné dodat systému možnost připojení k internetu. K tomu slouží modul SIM800L, který je také připojen k RPi. Tento modul je obecně velmi nenáročný a teoreticky by jej šlo napájet i přímo z RPi, ale při testování zapojení a přečtení dokumentace jsem zjistil menší problém. Modul sám o sobě má velmi nízkou spotřebu energie za provozu, ale při spuštění modulu se vložená SIM karta registruje do sítě operátora a pro tento krok potřebuje krátkou dávku velkého množství energie. Uváděná hodnota je stanovena na 2A elektrického proudu při 5V elektrického napětí, což nedokáže dodat RPi ze svých pinů. Proto je zapotřebí dodat k modulu také zdroj elektrické energie, který splňuje všechny požadavky.



■ Obrázek 5.4 Schéma zapojení RPi. Zařízení realizuje síť WiFi a provozuje MQTT brokera, takže účelně schéma obsahuje jen nejnútnejší součástky. Další zapojené moduly jsou RPi cam NoIR (není připojena přes GPIO piny, ale přes SCI datový kabel), modul SIM800L EBV pro připojení do GSM sítě, IR LED diody (*D1* až *D5*) a extra zdroj napájení pro modul SIM800L *U1*. Led diody jsou paralelně zapojeny a elektrický proud je upraven rezistory *R1* až *R5*. RPi je propojeno s modulem SIM800L přes TX a RX piny, které jsou určené pro odesílání dat přes sériové rozhraní.

Pořizování fotografií či videa je v systému služba, kterou vykonávají MQTT klienti. Proto v tomto případě RPi je broker, tak i klient, který poslouchá relevantní témata a na základě vstupu pořizuje záběry. Zvolená technologie pro implementaci klienta je Python, obzvláště kvůli jednoduchosti provedené celého kódu.

Možný problém činí posílání a uchování obrázků pomocí protokolu MQTT, který je vytvořený primárně na číselné nebo textové zprávy. Toto však lze vyřešit elegantně pomocí zakódování obrázku do **base64** řetězce. Výsledkem tedy je, že se posílání obrázku převedlo textovou zprávou. Další věcí, kterou implementace musí řešit, je aktivace infračerveného svícení, aby bylo možné pořizovat záběry i v nočních hodinách.

Kdykoliv je detekován pohyb v monitorovacím systému, témata formátu `"/ground/WAR-`

N/motion”, klient bude reagovat na tuto zprávu zapnutím kamery. Jelikož kamera nezabírá celý agrivoltaický systém, tak místo plus na začátku téma mohou být specifikovány konkrétní sektory. Inicializace jednotlivých proměnných ve skriptu je hodně přímočará, takže nejdůležitější a nejzajímavější je metoda `on_message`. Inicializace kamery je prováděna pomocí knihovny *Pi-camera2*. Ještě vhodné za zmínku je zapnutí infračervených LED svítidel, které jsou napojeny na proměnné `led_pin`.

■ **Výpis kódu 5.15** Metoda `on_message`, které slouží pro přijímání zpráv a jejich další zpracovávání.

```
def on_message(client, userdata, message):
    print("Got message from my topic")

    GPIO.output(led_pin, GPIO.HIGH)
    time.sleep(2)

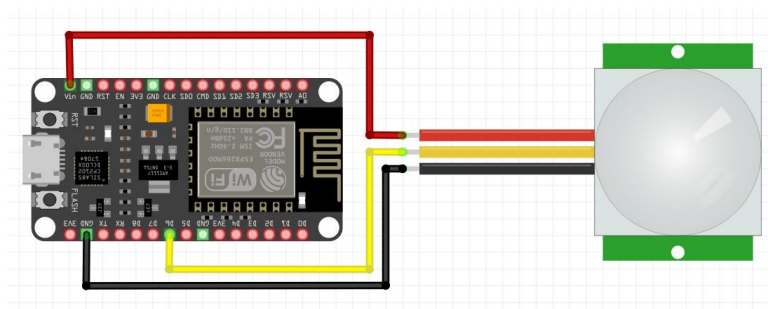
    metadata = picam2.capture_file(image_name)

    # Convert captured image into base64 image
    with open(image_name, "rb") as image:
        encoded_img = base64.b64encode(image.read())
        encoded_string = str(encoded_img, "utf-8")
        # Publish the base64-encoded string over MQTT
        client.publish("1A/top/INFO/picture", "data:image/jpg;base64,"
            + encoded_string)

    # Logging purposes
    client.publish("1A/top/INFO/message",
        "Picture taken in sector 1A")

    GPIO.output(led_pin, GPIO.LOW)
```

Chybějící součástí monitorovacího systému je detekce pohybu, čili potenciálně nechtěného vniknutí do agrivoltaického systému. Jelikož navrhované senzory mají poměrně nízký dosah, řádově nižší jednotky metrů, musí být tedy umístěny blíže ke krajům agrivoltaického systému. Proto tyto senzory nemohou být umístěny přímo u kamery, ale musí být jako samostatný modul.



■ **Obrázek 5.5** Schéma zapojení detektoru pohybu HC-SR501. Toto jednoduché schéma obsahuje pouze 3 dráty, červený pro napájení, černý pro uzemnění a žlutý pro digitální signál.

Zapojením těchto čtyř modulů je možné realizovat síť WiFi s připojením na internet, komunikaci přes protokol MQTT, monitorovat mikroklima agrivoltaického systému v různých vertikálních zónách a detekovat pohyb přicházejících osob.

5.2 Konfigurace cloudových služeb

Sekce popisuje napojení monitorovacího systému ke cloudovým službám, jejich konfiguraci, struktur a použití. Následující části popisují postup jak se RPi připojí k InfluxDB Cloud službě a celkovou strukturu ukládaných dat. Dále je vysvětleno propojení mezi cloudovým úložištěm a službou pro zobrazování metrik Grafana. Důležitou součástí zde je realizace takzvaného "dashboardu" pro zobrazování metrik, aby byli užitečnými pro uživatele tohoto systému.

5.2.1 Napojení na InfluxDB Cloud

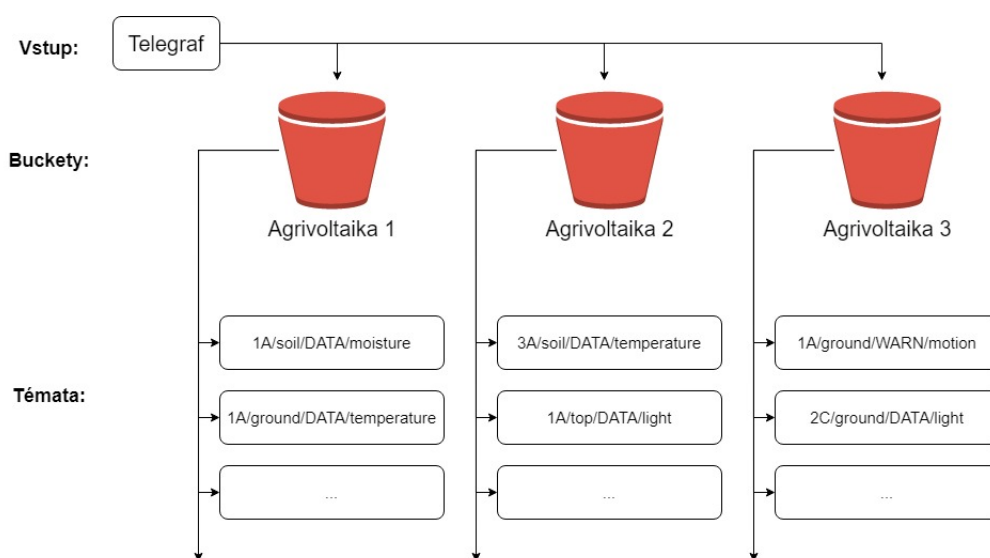
Společnosti InfluxData vyvíjí vlastního agenta **Telegraf** [78] pro napojení na databázi a sběr metrik v síti. Telegraf lze využít pro zpracovávání a přeposílání spousty různých typů dat a je možné k němu připojit pluginy, které umožňují Telegrafu zpracovávat nové typy dat.

Pro účely monitorovacího systému je obzvláště důležitý plugin *MQTT Consumer*, který umožňuje Telegrafu zpracovávat na vstupu témata, která jsou v systému definována.

Nejdříve je ale zapotřebí zprovoznit InfluxDB Cloud službu. To je ovšem velice jednoduché a pro účely ověření konceptu stačí použít bezplatnou verzi cloudové služby. Pro vytvoření instance je nutné se zaregistrovat na webových stránkách InfluxData, konkrétně na <https://cloud2.influxdata.com/signup>. Po úspěšné registraci a přihlášení se uživatel ocitne ve webovém rozhraní cloudové instance InfluxDB.

Struktura ukládaných dat

Hlavní strukturou pro ukládání dat v InfluxDB jsou takzvané *buckety* (kyblíky). Bucket lze následně konfigurovat, kde nejdůležitějšími vlastnostmi je jméno bucketu, doba retence dat a nastavení schématu bucketu. Doba retence dat je v bezplatné verzi omezená pouze na 30 dní, ale lze ji prodloužit při zakoupení placené verze. InfluxDB Cloud služba je použitelná jako kompletní řešení i pro nasazení napříč vícero agrivoltaickými systémy, takže schéma struktury ukládaných dat může vypadat následovně:



■ **Obrázek 5.6** Struktura ukládaných dat v InfluxDB Cloud. Proces začíná u vstupu, Telegraf, který posílá data do předem určeného bucketu. Každý bucket představuje jednotlivou instalaci agrivoltaického systému. Následně se v každém bucketu nachází ukládaná data v podobě témat.

Důležitou volbou při vytváření bucketu je jeho schéma, kde primárně lze vybírat mezi dvěma možnostmi, a to *Implicit* a *Explicit*. V případě monitorovacího systému používající MQTT témata je lepší volbou možnost *Implicit*, která umožňuje ukládání libovolných dat a dodržování nějaké struktury je právě na straně posílaných dat. Možnost *Explicit* přímo uvádí schémata tabulek, které se mohou v bucketu nacházet.

Jakmile je bucket vytvořen, telegraf již může začít ukládat data. Konfigurace je uložena v cloudové službě a skládá se ze tří hlavních částí, které musí konfigurační soubor obsahovat. První částí konfigurace je nastavení agenta, čili základní chování telegrafu v místě, kde je spuštěn. Nejdůležitější je právě řádek `interval` a `metric_batch_size`, díky kterým lze limitovat intervaly posílání zpráv do databáze a také jejich množství, protože telegraf se snaží zprávy shromáždit do dávek (batches), aby minimalizoval využití komunikačního kanálu k databázi.

■ **Výpis kódu 5.16** Nastavení agenta v konfiguračním souboru telegrafu.

```
[agent]
  ## Default data collection interval for all inputs.
  interval = "15m"
  round_interval = true

  ## Telegraf will send metrics to outputs in batches of at most
  ## metric_batch_size metrics.
  ## This controls the size of writes that
  ## Telegraf sends to output plugins.
  metric_batch_size = 1000
  metric_buffer_limit = 10000

  collection_jitter = "0s"
  flush_interval = "20s"
  flush_jitter = "0s"
  precision = ""
  hostname = ""
  omit_hostname = false
```

Další dvě části konfigurace jsou konfigurace vstupů a výstupů pro telegraf. Výstupem telegrafu je v mém případě databáze InfluxDB, realizovaná jako cloudová služba. Tudíž je zapotřebí říct telegrafu, kde se databáze nachází (urls), jaký má použít token pro autentizaci (token) a cílové jméno bucketu, ve kterém budou data uložena.

■ **Výpis kódu 5.17** Definice výstupu pro telegraf. Napojení na konkrétní bucket, do kterého má zapisovat.

```
[[outputs.influxdb_v2]]
  ## The URLs of the InfluxDB cluster nodes.
  urls = ["https://eu-central-1-1.aws.cloud2.influxdata.com"]

  ## Token for authentication.
  token = "$INFLUX_TOKEN"

  ## Organization is the name of the organization you wish to write to
  organization = "$EMAIL_ADDRESS"

  ## Destination bucket to write into.
  bucket = "$BUCKET_NAME"
```

V případě implementovaného monitorovacího systému je MQTT broker vstupem pro Telegraf. Takže za využití pluginu `mqtt_consumer` mohou nadefinovat adresu brokera (`servers`), jaké témata bude poslouchat (`topics`) a jaký je formát dat v těchto tématech (`data_format/type`). V ukázce je možné sledovat konfiguraci pro přízemní modul určený pro sběr dat. Veškerá data jsou číselného charakteru, takže typ dat je zde nastaven na `float`.

■ **Výpis kódu 5.18** Definice vstupů pro telegraf.

```
[[inputs.mqtt_consumer]]
  ## Broker URLs for the MQTT server or cluster.
  servers = ["tcp://127.0.0.1:1883"]

  ## Topics that will be subscribed to.
  topics = [
    "+/ground/DATA/temperature",
    "+/ground/DATA/humidity",
    "+/soil/DATA/temperature",
    "+/soil/DATA/humidity",
    "+/ground/DATA/light",
  ]

  ## Data format to consume.
  data_format = "value"
  data_type = "float"
```

Nyní je telegraf kompletně nakonfigurován a je zapotřebí jej spustit na RPi. Přímou konfiguraci telegrafu je také návod pro navázání spojení a ten se skládá ze tří kroků. Prvním krokem je instalace samotného Telegrafu z balíčků, které jsou veřejně dostupné.[79] Po stažení a instalaci se další krok provádí na straně databáze a tím je vygenerování tokenu pro připojení. InfluxDB nabízí příkazy pro linux jak token aplikovat a následně jak telegraf spustit tak, aby se připojil k databázi a získal konfigurační soubor.

■ **Výpis kódu 5.19** Spuštění telegrafu na RPi.

```
$ export INFLUX_TOKEN=<INFLUX_TOKEN>
$ telegraf --config https://eu-central-1-1.aws.cloud2.influxdata.com/api/v2/telegrafs/CONFIG_ID
```

Alternativní možností je vytvoření vlastního InfluxDB klienta, který bude zapisovat do databáze data z MQTT. To dává monitorovacímu systému větší kontrolu nad tím, jak jsou data zpracovávány, ale Telegraf s pluginem pro zpracovávání MQTT je také dostačujícím řešením.

5.2.2 Předávání dat do služby Grafana

Nejdůležitější funkcionalitou celého monitorovacího systému je vizualizace sbíraných dat. Pro zobrazení dat je využito druhé cloudové služby, Grafana Cloud. Stejně jako v případě úložiště pro vytvoření instance služby je nutné se zaregistrovat na <https://grafana.com/auth/signup/create-user>. Následně po přihlášení je k dispozici webová rozhraní služby, kde lze provádět veškerá konfigurační nastavení.

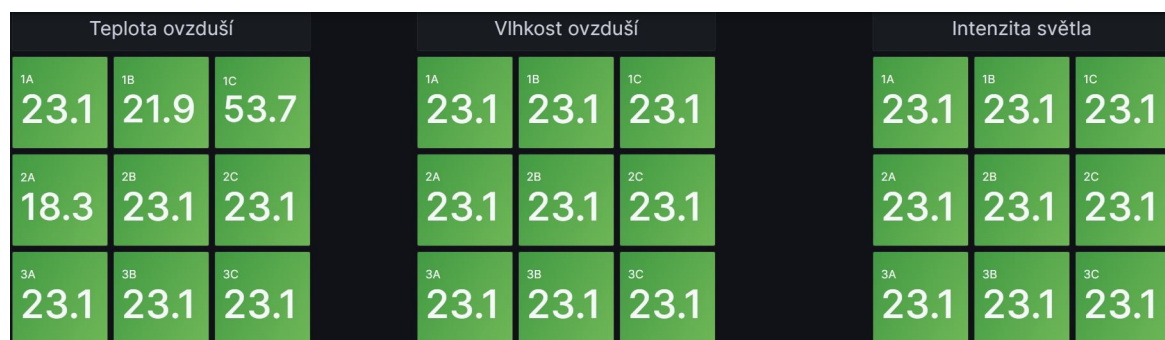
Aby bylo vůbec možné data začít zobrazovat, je zapotřebí vytvoření spojení s InfluxDB Cloud. Grafana se v tomto případě připojuje k databázi a používá uložená data k vizualizaci, aby se grafana mohla připojit, musí se na straně InfluxDB vytvořit **API token**. Nyní je zapotřebí jít do nastavení Grafany *Home* → *Connections* → *Connect data* a následovně najít v *Data Sources* položku InfluxDB. Při vytváření propojení je potřeba přepnout na jazyk *Flux*, vyplnit URL, kde se nachází databáze, vypnout autentizaci, zadat jméno organizace a token, který byl vytvořen na straně InfluxDB. Autentizace a další bezpečnostní prvky je možné aktivovat, ale tento návod pokrývá nejjednodušší formu propojení těchto dvou cloudových služeb.

Zobrazení dat

Veškerá data, která se v monitorovacím systému vyskytují, se dělí do tří kategorií DATA, WARN a INFO. Níže budou popsány jednotlivé kategorie a jakým způsobem jsou zobrazovány.

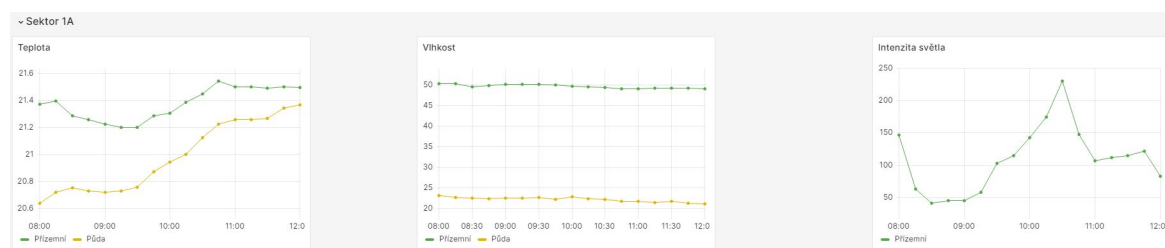
Kategorie DATA slouží pro shromažďování metrik napříč celým agrivoltaickým systémem. Zároveň tato kategorie je největší v porovnání s ostatními kategoriemi, takže je jí věnováno více prostoru na dashboardu pro vizualizaci všech dat. Hlavními metrikami v této kategorii jsou enviromentální metriky, a to teplota a vlhkost ovzduší či půdy a intenzita světla, která dopadá na rostliny.

Hlavním požadavkem bylo přehledné zobrazení aktuálních hodnot důležitých metrik napříč celým agrivoltaickým systémem. Jelikož je systém rozdělen na sektory, nabízí se řešení vizualizace systému pomocí 2D matice aktuální hodnot pro každou zmiňovanou metriku.



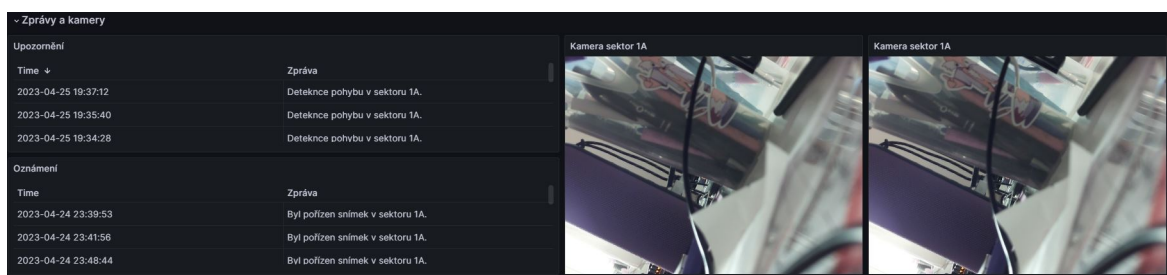
Obrázek 5.7 Ukázka části dashboardu zobrazující přehled dat napříč celým agrivoltaickým systémem v aplikaci Grafana. Hlavní částí jsou 2D matice, zobrazující aktuální metriky v každém sektoru.

Sledovat aktuální hodnoty napříč celým systémem je tedy splněno a druhým požadavkem je poskytnout detailnější pohled na jednotlivé sektory, kde jsou metriky vyobrazeny v časových řadách. Detailní metriky jsou odděleny v samostatném řádku a lze je skrýt, aby dashboard zůstal stále přehledný.



Obrázek 5.8 Ukázka části dashboardu zobrazující detailnější časové řady pro jeden sektor agrivoltaického systému. Každá metrika, jako například vlhkost, má vlastní graf, který zobrazuje vybranou metriku v různých místech daného sektoru.

Dalšími kategoriemi jsou WARN a INFO. Účelem těchto kategorií je poskytování detailnějších informací uživatelům dashboardu a hlavní rozdíl mezi kategoriemi je závažnost informace. Kategorie WARN obsahuje zprávy o detekci pohybu v okolí agrivoltaického systému, výpadcích zařízení a jiné. Kategorie INFO slouží primárně pro oznamování rutinních aktivit systému, což může být sběr dat či jiné aktivity, které mohou být implementovány v budoucnu jako například automatizované lokální zavlažování. Obě kategorie jsou v textovém formátu, tudíž se značně liší od kategorie DATA a pro vizualizaci slouží jednoduché tabulky, které zobrazují aktuální zprávy v systému.



■ **Obrázek 5.9** Ukázka části dashboardu zobrazující textová upozornění a oznámení. V levé části se nachází tabulky zmíněných textových zpráv a v pravé části se zase nachází aktuálně nejnovější pořízený snímek kamerami v monitorovacím systému.

5.3 Vylepšení systému

Výše zmíněná implementace ověřuje navrhovaný monitorovací systém a splňuje všechny základní požadavky. Nicméně, jedná se spíše o koncept, který má řadu možných vylepšení. Optimalizace některých částí systému mohou být velmi zajímavá témata pro detailnější výzkum, ale nejsou předmětem této diplomové práce. Níže je uvedeno pár možných vylepšení systému, které nebyly dokončeny v rámci této práce:

■ Optimalizace spotřeby energie

V návrhu se píše o spotřebě energie jako o podstatné metrice, kterou je potřeba brát v potaz, a to obzvláště kvůli provozu v nočních hodinách. Implementace takového systému je poměrně hlubokým tématem, obzvláště v kombinaci se službami jako MQTT a jiné. Nicméně při realizaci tohoto konceptu a po prezentování projektované ceny jsme s firmou Zenergo a. s. došli k závěru, že spotřeba energie je pro agrivoltaický systém kompletně zanedbatelná.

■ Nasazení průmyslových čidel

Jednoznačně vhodnější a nutné pro komerční nasazení je větší investice do průmyslových čidel, které jsou mnohem robustnější a spolehlivější. Momentálně implementovaný koncept i v návrhu pracuje s levnými čidly, které jsou často pouze kopíí reálného čidla, tedy mnohdy nekvalitní a poruchové.

■ Tvorba rozhraní pro spojení s chytrým zemědělstvím

Hlavním cílem tohoto řešení je poskytnout novou úroveň infrastruktury do kompletně nového prostředí agrivoltaického systému. Existuje však již mnoho jiných řešení pro chytré zemědělství. Velmi zajímavým rozšířením systému by bylo vytvoření jednotného rozhraní pro komunikaci s jinými systémy.

■ Sběr dešťové vody a její automatické redistribuování

Nové funkcionality, které by bylo možné integrovat přímo do současného monitorovacího systému, jsou sběr dešťové vody a automatizované zavlažování. Jedná se o užší možnost použití agrivoltaického systému, protože ne všechny takové systémy budou mít solární panely osazeny okapy pro sběr dešťové vody. Nicméně jedná se, na základě studie, o velice zajímavou funkcionality, kterou by mohl monitorovací systém využívat.

Následné ovládání zavlažovacího systému je také velmi širokým tématem, které proniká do oboru strojního inženýrství. Taková funkcionality je sama o sobě velmi komplexním tématem, které by si zasloužilo vlastní práci.

- **Porovnání komunikačních protokolů Zigbee a BLE**

Z teoretického hlediska by bylo zajímavé zkusit realizovat a porovnat jednotlivé komunikační protokoly Zigbee a BLE (Bluetooth low energy). Tato práce nahlíží na toto téma velmi povrchově a snaží se navrhnout vhodné technologie pro realizaci, ale právě to by bylo velmi pozoruhodným tématem pro hlubší zkoumání a detailní porovnání jednotlivých technologií.

- **Vzdálená konfigurace a správa**

Dalším vylepšením systému, které by řešení posunulo úplně na novou úroveň, by byla vzdálená správa a konfigurace OTA (Over The Air). Tato práce tuto funkcionalitu vůbec neuvažuje a navrhuje řešení na míru agrivoltaickému systému pro vinohrady. To dělá implementaci OTA o to komplikovanější a vyžadovalo by to realizaci vnitřní logiky systému jak propagovat nové konfigurace a správu k malým zařízením, které nemají sama o sobě přístup k internetu.

Testování vlastností monitorovacího systému

Kapitola popisuje proces testování vlastností jednotlivých částí monitorovacího systému. Jsou prozkoumány limity sítě systému z pohledu dosahu a kapacity. Testování je doplněno popis fyzických vlastností systému a jsou konstatována doporučení, aby nedocházelo k přetížení sítě. Jedna z klíčových vlastností monitorovacího systému je odolnost proti výpadku. Jelikož systém pracuje v nepřetržitém provozu, je nutné prozkoumat jaké scénáře mohou nastat a otestovat je. Důležitá vlastnost monitorovacího systému je také pozorovatelnost změn prostředí v reálném čase přes webové rozhraní. Tyto změny v měřených metrikách budou otestovány, zda jsou informace včas a správně propagovány. Součástí funkcionalit monitorovacího systému také zahrnuje kamerový systém, který je také podroben detailnějšímu pohledu na kvalitu, zda dostatečně splňuje požadavky.

6.1 Dosah sítě

Tato část se zaměřuje na testování dosahu bezdrátové sítě, která je generovaná zařízením RPi. V návrhu se předpokládá dosah v okruhu 30 metrů od zařízení. Cílem je tedy tento předpoklad ověřit a detailněji prozkoumat, zda je tato funkcionalita opravdu dodržena. Níže jsou uvedeny podmínky, postupy a nástroje využití při testování dosahu bezdrátové sítě.

Testovací prostředí, které dokáže simulovat agrivoltaický systém, musí splňovat několik podmínek, aby mohlo být provedeno relevantní testování. Prvním požadavkem na prostředí je plocha, která by v ideálním případě měla mít čtvercový půdorys o rozloze jednoho hektaru. Druhým požadavkem pro testovací prostředí je i množství překážek, které se v agrivoltaickém systému vyskytují. V případě vinohradu jsou to vysazené rostliny vinné révy a konstrukce solárních panelů.

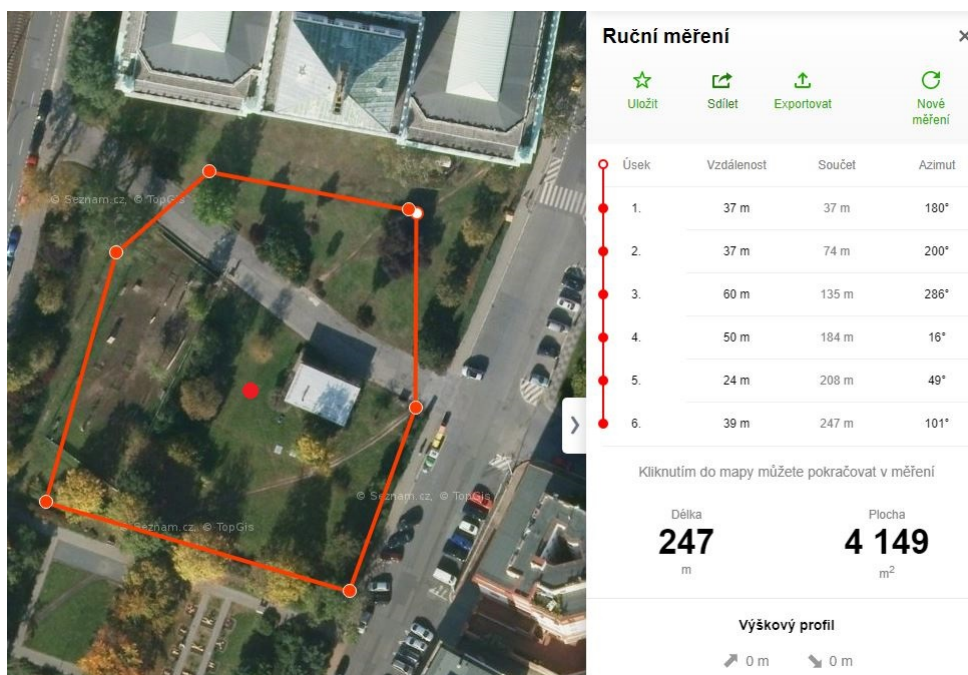
Jako vhodné prostředí jsem zvolil park vedle Podolské vodárny viz obrázek 6.1, nedaleko mého bydliště. Tento park splňuje první podmínku pro testovací prostředí, kde rozloha je mnohem větší než jeden hektar. Prostředí parku jsem si vybral pro testování právě i kvůli splnění druhé podmínky, jelikož v parku se nachází různá množství vegetace a nejrůznější překážek jako kovové konstrukce či menší budova.

Hlavními sledovanými metrikami jsou síla signálu uváděná v jednotkách dBm a přenosová rychlost uváděná v Mbit/s. Pro testování dosahu sítě jsem využil nástroje na svém mobilním telefonu, WiFi Heatmap.[80]



Obrázek 6.1 Vizualizace testovacího prostředí parku u Podolské vodárny na Mapy.cz. Je možné vidět členitost prostředí tvořící vhodné překážky, které simulují prostředí agrivoltaického systému.

Testování bylo uskutečněno pouze na části zmiňovaného parku. Vytýčil jsem si oblast, která přibližně odpovídá obsahu kruhu o rádiu 30 metrů (přibližně 2900 m^2). Oblast je však větší, abych zjistil maximální dosah sítě. Důvodem výběru této oblasti je větší koncentrace stromů a jiné vegetace v levé spodní části (viz obrázek níže). Také velmi zajímavým objektem malá budova napravo od zařízení, která zcela jistě bude blokovat signál sítě.



Obrázek 6.2 Oblast měření dosahu sítě. Ohraničení je provedeno červenou čarou, jednotlivé úseky a celková plocha jsou zaznamenány v pravé části obrázku. Uprostřed oblasti je červená tečka znázorňující pozici zařízení RPi.

Testování probíhalo ve dvou částech. První částí je umístění zařízení RPi na stanovené místo. Druhá část spočívá ve sběru dat v různých vzdálenostech od zařízení. Intenzita měření byla stanovena tak, že jsem prováděl měření každých 10 kroků ve vyznačené oblasti. Výsledná data je ještě nutné vizualizovat a pro tento úkol jsem použil webovou aplikaci Heatmapper, jednoduchý online nástroj, který umožňuje z dodaných dat vytvořit heatmapu.[81]



■ **Obrázek 6.3** Vizualizace síly signálu sítě pomocí aplikace Heatmapper. Barevnost heatmapy odpovídá síle signálu, kde žlutá a zelená barva značí výsledky pod 70 dBm a modrá barva zobrazuje výsledky, které jsou vyšší než 70 dBm.

Zařízení RPi dokáže vyznačenou oblast pokrýt sítí, ale je možné sledovat, jak je dosah sítě ovlivněn překážkami. Největší překážkou v oblasti je malá budova napravo od zařízení RPi a lze pozorovat, že síť je sice dostupná v blízkém okolí budovy, ale je natolik rušivým elementem, že o pár metrů za budovou již signál končí. Dalším pozorováním je na levé straně od zařízení RPi, kde se nachází stromořadí a oplocené hřiště. Zde lze pozorovat značně lepší propustnost terénem, takže signál WiFi dosáhne na mnohem větší vzdálenost než na straně druhé. Výsledkem měření je jasný důkaz, že zařízení RPi má uspokojivé vlastnosti v oblasti dosahu bezdrátové sítě. Dosažená pokrytá plocha je mnohem větší než požadovaný radius 30 metrů a agrivoltaický systém vinohradu neobsahuje nepropustné překážky jako v testovací oblasti.

6.2 Kapacita síť

Hlavní protokolem pro komunikaci v síti je MQTT. Proto je důležité síť a konkrétně MQTT brokera podrobit testování a zjištění limitů. Cílem testování je zjistit, zda je síť monitorovacího systému schopna vydržet větší zátěž a zda dokážou být zpracovány všechny MQTT zprávy. Monitorovací systém využívá Mosquitto MQTT brokera, který je schopen zpracovávat přes 30 000 zpráv za jedinou sekundu [82] ve vhodném testovacím prostředí.

Monitorovací systém v realizované velikosti je navržen podstatně úsporněji a zařízení posílají zprávy ve velkých intervalech, ale může nastat situace, kdy mohou být poslány desítky zpráv v jeden moment a je nutné ověřit spolehlivost celého systému. Dalším omezujícím faktorem je výpočetní síla zařízení v síti, která může výrazně ovlivnit výsledky testování. Pro testování jsem využil open-source aplikaci zvanou *MQTT-stresser* [83], která napojuje větší množství MQTT klientů a zahlcuje síť velkým počtem zpráv. Tato aplikace je spouštěna z mého počítače a MQTT broker běží na RPi. Parametry RPi byly uvedeny v sekci ??, zde jsou uvedeny parametry testovacího počítače, který spouští aplikaci MQTT-stresser:

- Procesor: AMD Ryzen 5 3600X
- Operační paměť: 16G B RAM DDR4 3200 MHz
- Síťová karta: GIGABYTE GC-WB1733D-I (podpora 802.11ac)

Aplikace MQTT-stresser je hodně jednoduchý nástroj, pomocí kterého lze otestovat schopnosti MQTT sítě. Nástroj paralelně spouští volitelné množství klientů, kteří se připojí k brokerovi, a nastavuje počet zpráv, které každý klient pošle. Ještě zde lze nastavit postupné vytváření klientů, takže všichni klienti se nepřipojí najednou. Toto je zapotřebí použít obzvláště při vyšším množství klientů, aby nezpůsobili pád brokera. Při testování velkých hodnot se může stát, že brokera reálně přetížíme, takže je potřeba nastavit parametry pro časové limity. Všechny tyto možnosti se mohou nastavit přímo v příkazové řádce při spouštění nástroje a takto může vypadat spuštění jednoho testování:

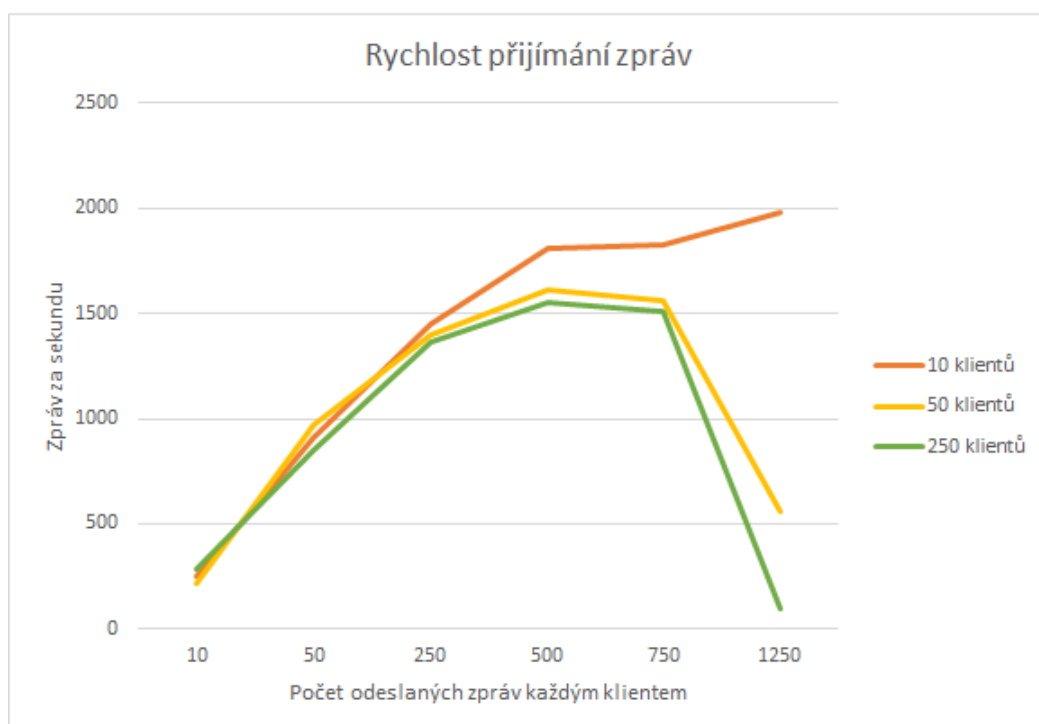
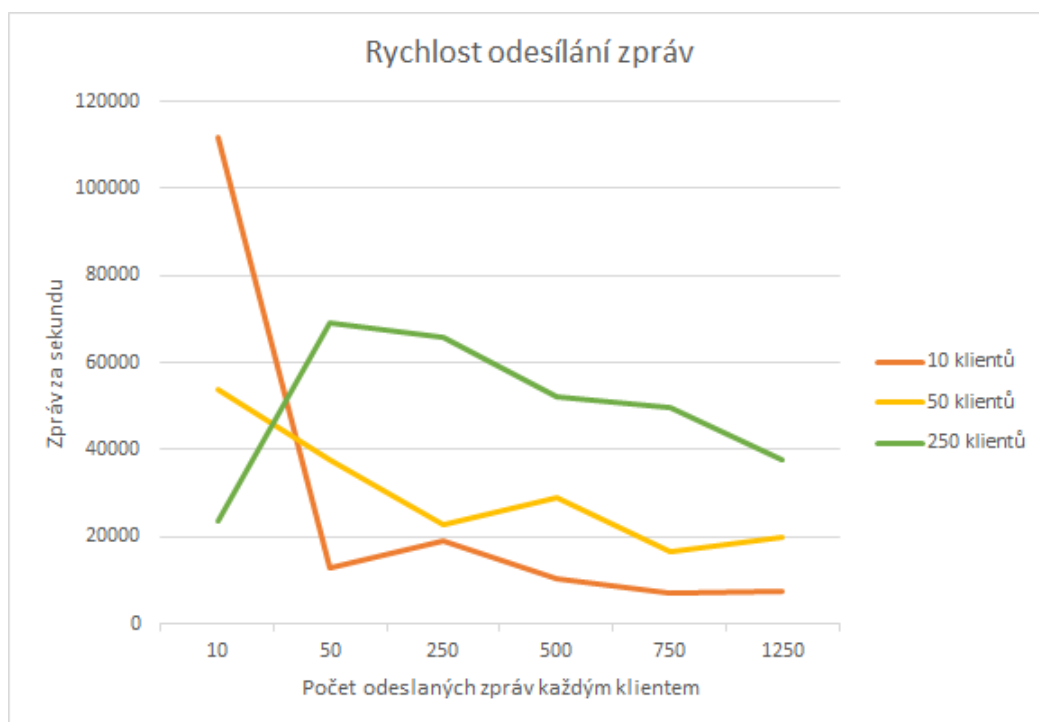
■ **Výpis kódu 6.1** Ukázka použití nástroje mqtt-stresser.

```
$ mqtt-stresser -broker tcp://raspberrypi:1883 -num-clients 10
-num-messages 150 -rampup-delay 1s -rampup-size 10
-global-timeout 180s -timeout 20s
```

Detailní popis parametrů nástroje:

- broker: Adresa MQTT brokera v síti
- num-clients: Počet spuštěných klientů
- num-messages: Počet zpráv poslaných každým klientem
- rampup-delay: Prodleva mezi startováním klientů
- rampup-size: Počet startovaných klientů v každém intervalu
- global-timeout: Časový limit pro celé testování
- timeout: Časový limit pro každého klienta

Předpokládaný počet zařízení v monitorovacím systému jsou spíše nižší desítky, tedy 10 a 50 klientů, ale pro ověření kapacit MQTT brokera je testování prováděno i pro 250 klientů. Počet zpráv, které každý klient odešle, jsou také stěžejní metrikou. Proto je zapotřebí sledovat tuto metriku, kde jsou zajímavějšími hodnotami řádově stovky zpráv. Veškerá testování probíhala s postupným startováním klientů po 10 v intervalu 0,5 sekundy.



■ **Obrázek 6.4** Grafy znázorňující střední hodnotu rychlosti zpráv do MQTT sítě. Vrchní graf znázorňuje kolik zpráv za sekundu dokáže broker zpracovat při operaci odesílání. Spodní graf znázorňuje totožnou věc, pouze pro operaci přijímání. Každá řada znázorňuje různé množství klientů (10, 50, 250) v závislosti na množství zpráv, které každý klient odesílá/přijímá.

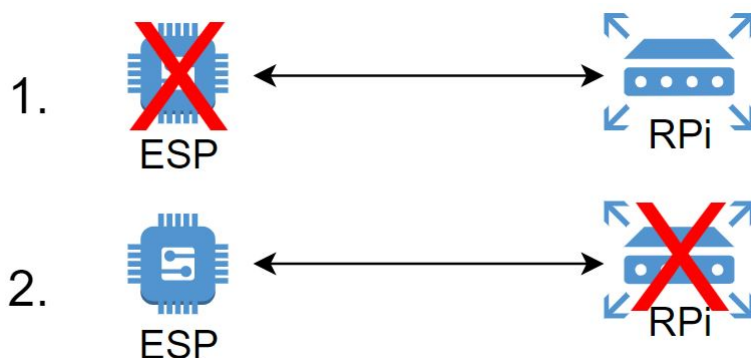
U velmi nízkého počtu odesílaných zpráv je patrná značná anomálie, kdy jsou hodnoty invertované v porovnání se zbytkem grafu. To je způsobeno tím, že měřený počet zpráv je tak malý, že hodnoty nejsou moc relevantními. Ostatní hodnoty jsou více podle očekávání, kdy s rostoucím počtem zpráv klesá reálná rychlost odesílání zpráv pro všechny tři funkce.

Graf přijímaných zpráv v síti jasně ukazuje kapacity a omezení brokera. V tomto případě lze pozorovat lineární rostoucí trend při počtu zpráv 10, 50 a 250. Nicméně, při vyšším počtu zpráv trend začíná zpomalovat, kde broker dosahuje maximální rychlosti při 500 zprávách. V extrémním případě pro 1250 zpráv pro každého klienta lze pozorovat už degradaci výkonu MQTT brokera, který nestíhá přeposílat zprávy příjemcům dostatečně rychle. Toto pozorování však není diskvalifikující pro brokera, jelikož předpokládané množství zpráv v monitorovacím systému se pohybuje spíše v řádu vyšších desítek či nižších stovek.

Výsledky ukazují na více než uspokojivou vlastnost bezdrátové sítě a MQTT brokera, které dokážou zpracovávat každou sekundu tisíce zpráv bez jakéhokoliv problému.

6.3 Odolnost proti výpadku

Cílem toho testování je vyzkoušet odolnost systému z pohledu výpadku, zda se systém dokáže obnovit do funkčního stavu, když nějaká z jeho částí přestane fungovat. V tomto testování jsou pozorovány dva možné scénáře, které mohou nastat. Prvním scénářem je výpadek zařízení RPi, generující celou síť. Druhý scénář popisuje výpadek zařízení ESP, který slouží jako měřící zařízení v monitorovacím systému.



■ **Obrázek 6.5** Názorná ukázka dvou testovaných scénářů. Scénář č.1 popisuje výpadek zařízení ESP. Scénář č.2 popisuje výpadek zařízení RPi.

Hlavní hodnotící kritéria pro jednotlivé scénáře jsou rozdílná, takže je zapotřebí ustanovit podmínky pro oba scénáře.

První scénář, výpadek ESP, má mnohem menší dopad na celý monitorovací systém, tudíž zde jsou podmínky mnohem mírnější. Zde je důležité, zda se po výpadku zařízení dokáže připojit zpátky do bezdrátové sítě a dokáže znovu posílat data stejně jako před výpadkem.

Druhý scénář je značně nebezpečnější a může způsobit spoustu problémů pro monitorovací systém. Je nutné ověřit, zda se po restartu zařízení znovu spustí následující funkcionality monitorovacího systému. Zásadní je bezdrátová síť WiFi, bez které ostatní zařízení nemohou komunikovat. Stejně důležitou částí je MQTT broker. Ovládání kamery pomocí MQTT klienta je také významnou složkou zabezpečení monitorovacího systému. Poslední funkcionalitou, kterou RPi vykonává, je připojení k internetu přes SIM modul a aplikace Telegram. Kdyby jakákoliv ze zmiňovaných funkcionalit nebyla schopna opětovného spuštění, monitorovací systém by nemohl správně pracovat.

Veškerá měření probíhala v laboratorních podmínkách, nikoliv ve venkovním prostředí. Simulace výpadku zařízení je provedena odpojením napájení zařízení a jeho opětovným připojením po uplynutí času jedné minuty.

Výpadek zařízení ESP

Scénář výpadku zařízení ESP způsobí ztrátu zařízení poskytující sběr dat. Struktura monitorovacího systému není nijak narušena. Zařízení ESP mají ve své paměti nahraný program, který se opakuje dokola, tudíž odpadá problém se znovu spuštěním celého programu. Dvě stěžejní funkce, které musí být obnoveny, jsou znovupřipojení do sítě WiFi a správné napojení na MQTT broker.

Program nahraný v zařízení ESP má dvě hlavní části:

- Setup
Jedná se o část kódu, která se spustí pouze jednou při startu zařízení. Obvykle jsou zde prováděny inicializace a navázání spojení.
- Loop Smyčka, která běží neustále dokola poté, co se provede Setup. Využívá se právě spíše pro pracovní část kódu, jako je sběr dat.

Při opětovném připojení napájení se program znovu spustí, tedy také část kódu Setup. Zde je vždy provedena konfigurace a připojení k WiFi síti, která je generována RPi. Připojení k MQTT brokerovi je prováděno v části kódu Setup, kde se nasměruje na bránu sítě WiFi, protože broker je také realizován na RPi.

Výstup zařízení v tomto scénáři vypadá následovně:

- **Výpis kódu 6.2** Výstup zařízení ESP na sériové lince po znovu připojení napájení.

```
Connecting to NETWORK
...
WiFi connected
IP address:
192.168.4.12
Attempting MQTT connection... [192.168.4.1:1883]
connected
```

Lze jednoznačně pozorovat, že monitorovací systém je vůči tomuto scénáři naprosto odolný a opětovné připojení zařízení ESP nedělá systému žádný problém.

Výpadek zařízení RPi

Mnohem komplikovanější pro monitorovací systém je výpadek zařízení RPi. Toto zařízení realizuje nemálo funkcí, které musí být při obnově napájení obnoveny. Důležité funkce RPi jsou:

- Síť WiFi
- MQTT broker
- Připojení k internetu
- MQTT klient pro kamerový systém
- Telegraf

První dva body, WiFi a broker, jsou prokazatelně odolnými proti výpadku zařízení. Tyto funkce běží na RPi jako systémové služby, které lze nastavit tak, aby se spustily při startu zařízení. Takového efektu je docíleno pomocí příkazu `systemctl enable <jméno služby>`. Jako důsledek výpadku RPi je ztráta připojení k MQTT brokerovi. Ověřování konektivity je prováděno v sekci kódu Loop, tudíž když je znovu aktivováno zařízení RPi, připojení je obnoveno.

■ **Výpis kódu 6.3** Výstup zařízení ESP při výpadku napájení RPi

```
Attempting MQTT connection... [0.0.0.0:1883]
[1235013] [E] [WiFiClient.cpp:242] connect(): connect on fd 48,
errno: 118, "Host is unreachable"
failed, rc=-2 try again in 5 seconds

#after RPi started
Attempting MQTT connection... [192.168.4.1:1883]
connected
```

Znovu spuštění služeb lze pokládat za ověřené, když se zařízení ESP samo znovu připojí do sítě a brokerovi a je schopné posílat po síti zprávy. Navíc lze pozorovat stav služeb přímo v RPi pomocí příkazu `systemctl is-active <služba>`.

■ **Výpis kódu 6.4** Výstup zařízení RPi při ověření stavu služeb `hostapd`, `dnsmasq` a `mosquitto`.

```
$ systemctl is-active hostapd.service dnsmasq.service mosquitto.service
active
active
active
```

Zbylé funkce RPi, připojení k internetu, MQTT klient pro ovládání kamery a spuštění Telegrafu, jsou ručně prováděné konfigurace bez systémové služby a nebo script napsaný v jazyce Python.

Zařízení RPi provozuje ještě další funkcionality, kterými jsou MQTT klient pro ovládání kamery, připojení k internetu pomocí modulu SIM a příkazy pro spuštění Telegrafu. Existuje spousta způsobů, jak zaručit znovu spuštění těchto funkcí, ale nejjednodušším přístupem je editace souboru `/etc/rc.local`. Jedná se totiž o soubor, který je spouštěn operačním systémem po bootu právě kvůli nastartování skriptů či jiných služeb. Do zmiňovaného souboru stačí přidat pouze výše zmiňované řádky pro spuštění z kapitoly o implementaci. Tento přístup je však zastaralý a existuje spíše z důvodu kompatibility. Alternativním způsobem by bylo napsat si vlastní *unit file* pro každou funkcionalitu, který poté lze spravovat stejně jako systémové služby pomocí příkazu `systemctl`.

Výsledek tohoto testování ukazuje, že monitorovací systém je odolný v případě výpadku energie a dokáže se celý znovu spustit a navázat spojení.

6.4 Kamerový systém

Důležitým prvkem monitorovacího systému jsou kamery střežící objekt v nepřetržitém provozu. Cílem tohoto testování je ověřit funkčnost a kvalitu pořizovaných snímků monitorovacího systému. Důležitým hodnotícím kritériem je, zda jsou snímky relevantní a lze z nich pozorovat identitu přicházejících osob či jiných objektů. Dodatečným kritériem je ověření funkčnosti pořizování nočních snímků. Měření jsou prováděna v laboratorních podmínkách, aby se ověřila funkčnost této části systému. Vzdálenost a prostředí je hodně závislé na instalaci a intenzitě infra červeného svícení, které není pevně stanoveno.



■ **Obrázek 6.6** Dva velmi podobné záběry pořízené kamerou pro noční vidění. Záběr pořízený za světla je vlevo, záběr pořízený ve tmě je vpravo.

Je patrné, že viditelnost ve tmě je značně snížena a je možné vidět pouze oblast, která je osvětlena infračervenými led diodami. Pro dosažení lepších výsledků by bylo zapotřebí většího světelného výkonu. Množství infračerveného záření je v současné chvíli nedostačující, protože v reálném případě kamera potřebuje vidět na větší vzdálenost a hlavně jasněji. Toto testování využívá pouze infračervených led diod, které poskytují podstatně slabší úroveň záření, ale jsou dostatečně silné na to, aby mohl být koncept ověřen a označen jako funkční.

Výsledek tohoto testování ukazuje funkčnost kamerového systému, který pořizuje záběry při detekci pohybu z nainstalovaných kamer ve dne i v noci. Pro úsporu množství posílaných dat spíše slouží jako fotopast, kdy při detekci pohybu je pořízeno menší množství snímků.

Závěr

Celá tato práce by nevznikla bez prvotního nápadu, který jsme dostali společně s mým kamarádem Janem Vavřinou. Nově vznikající odvětví v zemědělství zvané Agrivoltaika bylo perfektní příležitostí pro prozkoumání tohoto prostředí a navrhnutí IoT systému pro agrivoltaické systémy. Během psaní diplomové práce jsem se nejdříve detailně seznámil s pojmem agrivoltaiky. Žádné takové řešení zatím v České republice neexistuje, musel jsem hledat v zahraničních studiích z Německa, Francie, USA nebo i Číny.

Podstatná část této práce je věnována seznámení čtenářů s pojmem agrivoltaiky. Mnoho těchto úvodních částí bylo inspirováno dialogy s firmou Zenergo a.s. a Ing. Jiřím Bímem, kteří byli přínosným zdrojem informací pro toto téma. Jednotlivé etapy mého výzkumu jsem firmě Zenergo prezentoval a získával tak přínosnou zpětnou vazbu. Firma Zenergo přispěla při definování požadavků na monitorovací systém a dokázali mi poskytnout reálné parametry agrivoltaického systému. Konzultace s Ing. Jiřím Bímem byly prospěšné pro objasnění téma agrivoltaiky z technického pohledu, kde mi byly vysvětleny vlastnosti a klíčové benefity. Po úvodních odstavcích následuje detailnější popis jaký má agrivoltaika vliv na prostředí, obzvláště celou řadu benefitů. Velmi přínosným zdrojem informací byla také univerzita Mendelova v Brně, kde jsem komunikoval s výzkumným týmem, který mi poskytl detailnější náhled na prostředí agrivoltaického systému a pomohl mi při určování důležitých metrik pro monitorování.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout IoT řešení pro agrivoltaický systém. Tento úkol se dělí do kroků analýzy dostupných technologií, návrh a realizace řešení a sledování dat přes webové rozhraní.

Během zkoumání jednotlivých technologií jsem cílil primárně na ty, které jsou v současné době nejpoužívanějšími a vhodnými pro prostředí agrivoltaického systému. Při výběru technologií jsem zohlednil parametry prostředí a určil vhodné kandidáty, ke kterým jsem poskytl detailní popis. Z množiny kandidátů jsem poté vybral kombinaci technologií, kterou následně používám v implementaci monitorovacího systému.

Navrhování monitorovacího systému bylo značně obtížné. Prvotní myšlenka totiž byla realizovat monitorovací systém pomocí co nejmenších zařízení. Zvolené platformy Raspberry Pi a ESP se ukázaly jako dobrá volba, ale následná volba modelů byla obtížnějším úkolem. Při zkoumání platformy ESP, jsem vyzkoušel mnoho modelů, u kterých jsem narazil na nedostatky z pohledu ovladatelnosti nebo nedostatečné možnosti napájení u menších modelů. Hledání vhodných modelů ESP zabralo nemalou část mé práce. Tyto potíže také vyústily v odložení odevzdání této diplomové práce o jeden semestr. Po vyhodnocení zařízení jsem sepsal detailní teoretický návrh sítě po konceptuální stránce řešení monitorovacího systému pro agrivoltaiku. Větší pozornost jsem věnoval problému jak efektivně docílit co největšího pokrytí sítě pro monitorovací systém, kde jsem popisoval jednotlivé vlastnosti každé topologie.

Součástí návrhu je také projektovaná cena monitorovacího systému. Po kalkulaci ceny jsem zjistil, že nedisponuji finančními prostředky ani časem provést realizaci v plném rozsahu. Výsledkem

bylo rozhodnutí realizovat monitorovací systém spíše jako ověření konceptu, kde využívám stejných technologií, ale pouze v menším měřítku. Výsledný návrh monitorovacího systému je tak průřezem nejdůležitějšími tématy pro realizaci, kde je ukázáno, jak má reálné řešení fungovat.

Během implementace a testování jsem vysvětlil mechanismy celého monitorovacího systému. Vymodeloval jsem schémata zapojení jednotlivých fyzických zařízení a popsal jsem jejich hlavní funkcionality, které každé zařízení vykonává. Podrobně jsem popsal mé postupy konfigurace propojení fyzické části monitorovacího systému s cloudovými službami. Ukázal jsem zobrazovaná data ve webovém rozhraní, které obsahuje přehled aktuálních dat napříč celým agrivoltaickým systémem, detailnější náhled na izolovanou část, výstup z kamer a oznámení monitorovacího systému. Obzvláště zajímavá byla práce s cloudovými službami, které jsou v dnešní době čím dál více využívanými a jsou stavebním kamenem pro komplexní aplikace nejen v IoT.

Implementovaný monitorovací systém splňuje požadavky, které jsou stanoveny v předchozích kapitolách, a ty jsou podrobeny detailnějšímu testování. Nasazený monitorovací systém vytváří novou úroveň infrastruktury agrivoltaického systému, na kterém je možné budovat v budoucnu nové funkcionality. Možnými vylepšeními jsem se zabýval a sepsal jsem ty z mého pohledu nejdůležitější.

Naše planeta se v posledních letech potýká s mnoha globálními problémy a témata, jako je agrivoltaika, jsou směrem, který může pomoci v řešení těchto problémů. Hlavním problémem, který se snaží agrivoltaika vyřešit, je získávání obnovitelných zdrojů energie. Ovšem toto všechno je za cenu nižší úrody. Nedostatek potravin je taktéž globálním problémem, protože roste populace naší planety. Má diplomová práce využívá IoT technologií a vytváří novou úroveň infrastruktury pro monitorování obou částí agrivoltaického systému. Současný realizovaný systém slouží jako monitorovací nástroj pro sběr dat. Nicméně, dlouhodobou vizí projektu je, že tato data dokážou být využita pro další účely, jako je například automatizace zemědělství.

Bibliografie

1. TKNAUSS@SYRACUSE.COM, Tim Knauss —. *Huge Solar Farm plans in Syracuse area show the future's bright. so what's the holdup?* 2021. Dostupné také z: <https://www.syracuse.com/news/2021/06/huge-solar-farm-plans-in-syracuse-area-show-the-futures-bright-so-whats-the-holdup.html>.
2. KLUBUS, Martin. *Vinohrad*. Martin Klubus, 2016. Dostupné také z: <http://www.vinoklubus.cz/galerie/vinohrad/>.
3. VOŘÍŠEK, Lukáš. *Co Je to agrovoltaika: Pole pod Solárními panely mají řadu výhod*. Lukáš Voříšek, 2021. Dostupné také z: <https://insmart.cz/agrovoltaika-studie/>.
4. GOETZBERGER, A.; ZASTROW, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*. 1982, roč. 1, č. 1, s. 55–69. Dostupné z DOI: 10.1080/01425918208909875.
5. EDERA.DIGITAL. *Rem Tec - La Soluzione per il Fotovoltaico legata all'Agricoltura*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://remtec.energy/en/agrovoltaico>.
6. MARROU, H.; GUILIONI, L.; DUFOUR, L.; DUPRAZ, C.; WERY, J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013, roč. 177, s. 117–132. ISSN 0168-1923. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.
7. *Fotosyntéza*. Wikimedia Foundation, 2022. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotosynt%C3%A9za>.
8. BENEDETTI, Manuel; VECCHI, Valeria; BARERA, Simone; DALL'OSTO, Luca. Biomass from microalgae: The potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories*. 2018, roč. 17, č. 1. Dostupné z DOI: 10.1186/s12934-018-1019-3.
9. SAGADMIN. *What is agrivoltaics? how can solar energy and agriculture work together?* 2021. Dostupné také z: <https://metsolar.eu/blog/what-is-agrivoltaics-how-can-solar-energy-and-agriculture-work-together/>.
10. TROMMSDORFF, Max; GRUBER, Simon; KEINATH, Tobias. *AGRIVOLTAICS: OPPORTUNITIES FOR AGRICULTURE AND THE ENERGY TRANSITION*. Fraunhofer ISE, 2020. Dostupné také z: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf>.
11. *Population*. United Nations, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.un.org/en/global-issues/population>.
12. HASSANPOUR ADEH, Elnaz; SELKER, John S.; HIGGINS, Chad W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*. 2018, roč. 13, č. 11. Dostupné z DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.

13. APV-Maga – *Agrivoltaics for Mali and Gambia: Sustainable electricity production by Integrated Food, Energy and water systems - Fraunhofer Ise*. “CLIENT II – Internationale Partnerschaften für nachhaltige Innovationen”; im Rahmenprogramm “Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA3)” Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), 2022. Dostupné také z: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-maga.html>.
14. SAEUGLING, Aaron. *Late season hail damage to crops*. 2020. Dostupné také z: <https://crops.extension.iastate.edu/blog/aaron-saeugling/late-season-hail-damage-crops>.
15. MARSH, Jacob. *How hot do solar panels get? PV temperature explained: Energysage*. EnergySage, 2022. Dostupné také z: <https://news.energysage.com/solar-panel-temperature-overheating/>.
16. *Sun'Agri: pioneer of dynamic agrivoltaics*. 2018. Dostupné také z: <https://youtu.be/BwskJF5IjBM>.
17. NEUPANE BHANDARI, Srijana; SCHLÜTER, Sabine; KUCKSHINRICHS, Wilhelm; SCHLÖR, Holger; ADAMOU, Rabani; BHANDARI, Ramchandra. Economic Feasibility of Agrivoltaic Systems in Food-Energy Nexus Context: Modelling and a Case Study in Niger. *Agronomy*. 2021, roč. 11, č. 10. ISSN 2073-4395. Dostupné z DOI: 10.3390/agronomy11101906.
18. ŠEBESTA, Jan. *Stanovisko K Novele Zákona o ochraně Zemědělského půdního fondu (2022)*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.spcr.cz/aktivity/stanoviska/15433-stanovisko-k-novele-zakona-o-ochrane-zemedelskeho-pudniho-fondu-2022>.
19. *Vinice, Chmelnice a Sady Bude Možné Osázet Fotovoltaickými panely, Shodla Se Ministerstva*. Solární Asociace, 2022. Dostupné také z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/aktualne/28265-vinice--chmelnice-a-sady-bude-mozne-osazet-fotovoltaickymi-panely--shodla-se-ministerstva>.
20. *Příklady agrivoltaických řešení*. ZENERGO Energy s.r.o., [b.r.]. Dostupné také z: <https://energy.zenergo.cz/agrivoltaika>.
21. KOUNDOURAS, Stefanos; TSIALTAS, Ioannis; ZIOZIOU, Eleni; NIKOLAOU, Nikolaos. Effect of temperature and humidity on grapevine growth, development and grape quality: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2015, roč. 21, č. 3, s. 341–356. Dostupné z DOI: 10.1111/ajgw.12206.
22. KELLER, Markus; KOTÍK, Petr; KAVAN, Petr. Effect of Soil and Air Temperature on Grapevine Phenology and Fruit Development. *Acta Horticulturae*. 2010, roč. 889, č. 889, s. 45–50.
23. MORROW, Adam; KELLER, Markus. Grapevine heat stress and sunburn management. *Progressive Crop Management*. 2019, roč. 25, č. 1, s. 15–19.
24. DUCHENE, Eric; SCHNEIDER, Christophe; TIXIER, Philippe; VAN LEEUWEN, Cornelis. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*. 2018, roč. 52, č. 3, s. 223–235.
25. AGRI, Dora. *Best Soil Condition Requirements For Grape Planting*. Dora Agri, 2021. Dostupné také z: <https://doraagri.com/grape-planting/>.
26. UNIVERSITY OF MARYLAND EXTENSION. *Grape Diseases* [<https://extension.umd.edu/resource/grape-diseases>]. accessed 2023.
27. PARKER, Alice; BARBEAU, Gérard. Grape and wine quality in relation to climate and solar radiation: an overview. *OENO One*. 2019, roč. 53, č. 1, s. 145–156.

28. LI, Chunxia; CHANG, S.-X; REHMAN, Muhammad; XU, Z.-G; TAO, J.-M. Effect of irradiating the leaf abaxial surface with supplemental light-emitting diode lights on grape photosynthesis: Supplemental light and grape photosynthesis. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2017, roč. 23. Dostupné z DOI: 10.1111/ajgw.12267.
29. GLADSTONES, J. The role of water in grapevine growth and development. In: *Proceedings of the International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology*. 2000, s. 28–36.
30. DAVIES, Chris; ROBINSON, Simon P. Acidity and composition of the grape berry. In: *Fruit ripening: physiology, signalling and genomics*. CABI, 1996, s. 187–208.
31. BELL, Scott. Managing Grapevine Nutrition to Improve Fruit Quality and Minimize Environmental Impact. *Acta Horticulturae*. 2017, č. 1188, s. 19–26.
32. OHM, G. S. *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. J. A. Barth, 1857.
33. JAIN, Shubham; KAPOOR, Avinash. Measurement and analysis of parameters affecting solar photovoltaic panel efficiency. *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*. 2013, roč. 2, č. 10, s. 2239–2243.
34. WENHAM, Stuart R; GREEN, Martin A; WATT, Mark E; CORKISH, Richard. *Applied Photovoltaics*. Washington, DC: Earthscan Publications, 1994.
35. *ISO/OSI*. Wikimedia Foundation, 2018. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Referen%C4%8Dn%C3%AD_model_ISO/OSI.
36. LAVECCHIA, Vito. *Main differences between the ISO/OSI model and TCP/IP*. 2019. Dostupné také z: <https://vitolavecchia.altervista.org/main-differences-between-the-iso-osi-model-and-tcp-ip/>.
37. *IEEE 802.11tm wireless local area networks*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.ieee802.org/11/>.
38. *What is wi-fi? - definition and types*. Cisco, 2021. Dostupné také z: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-wifi.html>.
39. *History*. WiFi Alliance, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.wi-fi.org/who-we-are/history>.
40. *Why does the OSI Reference Model Matter?* [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.cwnp.com/cwnp-wifi-blog/whytheosimodelmatters/>.
41. ROSENCRANCE, Linda. *What is zigbee?: Definition from TechTarget*. 2017. Dostupné také z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/ZigBee>.
42. *Mesh topology*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.sunbirdcim.com/glossary/mesh-topology>.
43. *What's new in zigbee 3.0*. 2019. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/an/swra615a/swra615a.pdf>.
44. RUSH, Chris. *What is Lora and Lorawan Technology?* 2021. Dostupné také z: <https://knowhow.distrelec.com/telecommunications/what-is-lora-lorawan-technology/>.
45. MEANEY, David. *Lora and Lorawan timing*. 2022. Dostupné také z: <https://ecsxtal.com/lora-lorawan-timing/>.
46. MARYLAND LAST MODIFIED DATE: JANUARY 13, Harris. *What is a GPRS connection?* 2023. Dostupné také z: <https://www.easytechjunkie.com/what-is-a-gprs-connection.htm>.
47. *Klient-server*. Wikimedia Foundation, 2022. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Klient%E2%80%93server>.
48. *Peer-to-peer*. Wikimedia Foundation, 2022. Dostupné také z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer>.

49. *The standard for IOT messaging*. 2022. Dostupné také z: <https://mqtt.org/>.
50. BERNSTEIN, Corinne; BRUSH, Kate; GILLIS, Alexander S. *What is MQTT and how does it work?* TechTarget, 2021. Dostupné také z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/MQTT-MQ-Telemetry-Transport>.
51. *MQTT protocol: Message Queuing Telemetry Transport protocol - javatpoint*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.javatpoint.com/mqtt-protocol>.
52. Espressif Systems, 2016. Dostupné také z: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/resources>.
53. *What is lorawan® specification*. 2022. Dostupné také z: <https://lorawan-alliance.org/about-lorawan/>.
54. LINAK. *Ingress protection: An introduction to IP-ratings*. 2021. Dostupné také z: <https://www.linak.com/segments/techline/tech-trends/ingress-protection/>. Accessed: 6-April-2023.
55. ALGORITHMY.NET. *Nezávislé množiny → Vrcholové pokrytí*. 2014. Dostupné také z: <https://www.algorithmy.net/article/7303/Nezavisle-mnoziny-%E2%86%92-Vrcholove-pokryti>.
56. AVAST. *WEP vs WPA or WPA2: Which Is Safer for Wi-Fi?* [<https://www.avast.com/c-wep-vs-wpa-or-wpa2>]. Accessed 6 April 2023.
57. IBM. *IBM MQ: How TLS provides identification, authentication, confidentiality, and integrity* [<https://www.ibm.com/docs/en/ibm-mq/9.1?topic=tls-how-provides-identification-authentication-confidentiality-integrity>]. 2022. Accessed: April 6, 2023.
58. CEDALO. *MQTT TLS Configuration Guide* [<https://cedalo.com/blog/mqtt-tls-configuration-guide/>]. 2022. Accessed: April 6, 2023.
59. THALES GROUP. *SIM (Subscriber Identity Module)* [<https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/technology/sim>]. Accessed 2023.
60. *Esp32 vs Arduino: The main differences*. 2023. Dostupné také z: <https://all13dp.com/2/esp32-vs-arduino-differences/>.
61. *Modules — espressif systems*. Espressif, [b.r.]. Dostupné také z: <https://www.espressif.com/en/products/modules>.
62. *Datasheet esp32 wroom32e*. Espressif, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
63. *Datasheet ESP8266-WROOM-02D/02U*. Espressif, [b.r.]. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp-wroom-02u_esp-wroom-02d_datasheet_en.pdf.
64. SYSTEMS, Espressif. ESP8266 Power Consumption. *Espressif Systems*. 2019. Dostupné také z: https://docs.espressif.com/projects/esp8266-rtos-sdk/en/latest/api-reference/system/sleep_modes.html?highlight=sleep%20modes.
65. SYSTEMS, Espressif. ESP32 Power Modes. *Espressif Systems*. 2019. Dostupné také z: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/sleep_modes.html?highlight=sleep.
66. FOUNDATION, Raspberry Pi. *Products - Raspberry Pi*. 2023. Dostupné také z: <https://www.raspberrypi.org/products/>.
67. FOUNDATION, Raspberry Pi. *Power consumption* [<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>]. 2021.

68. SERVICES, Amazon Web. *What is AWS?* [<https://aws.amazon.com/what-is-aws/>]. Accessed: 2023, April 5.
69. CLOUD, Google. *Why Google Cloud?* [<https://cloud.google.com/why-google-cloud>]. Accessed: 2023, April 5.
70. INFLUXDATA. *About — InfluxData* [online]. 2023. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.influxdata.com/about/>.
71. *Cenová nabídka AWS Timestream* [<https://aws.amazon.com/timestream/pricing/>]. [B.r.]. Accessed: 2023-04-06.
72. *Cenová nabídka Google Cloud Bigtable* [<https://cloud.google.com/bigtable/pricing>]. [B.r.]. Accessed: 2023-04-06.
73. *Cenová nabídka InfluxDB Cloud* [<https://www.influxdata.com/influxdb-pricing/>]. [B.r.]. Accessed: 2023-04-06.
74. *Grafana Pricing* [<https://grafana.com/pricing/>]. [B.r.]. Accessed: 2023-04-07.
75. FOUNDATION, Raspberry Pi. *Setting up a Raspberry Pi as a Wireless Access Point* [<https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/wireless/access-point-routed.md>]. 2021.
76. LTD., Micro Electronics Trade; SIMCOM. *Featured modules*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://simcom.ee/?featured>.
77. SANTOS, Rui; SANTOS, Sara. *Random Nerd Tutorials*. 2013. Dostupné také z: <https://randomnerdtutorials.com/>.
78. *Telegraf Open Source Server Agent: Influxdb*. InfluxData, 2023. Dostupné také z: <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>.
79. INFLUXDATA. *Downloads* [<https://portal.influxdata.com/downloads/>]. accessed 2023-04-23.
80. SOLUTIONS, Wi-Fi. *WIFI Heatmap - apps on Google Play*. Google, [b.r.]. Dostupné také z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=ua.com.wifisolutions.wifiheatmap&hl=en>.
81. SASHA BABICKI David Arndt, Ana Marcu a další. [B.r.]. Dostupné také z: <http://heatmapper.ca/>.
82. MISHRA, Biswajeeban; MISHRA, Biswaranjan; KERTESZ, Attila. Stress-Testing MQTT Brokers: A Comparative Analysis of Performance Measurements. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 18. ISSN 1996-1073. Dostupné z DOI: 10.3390/en14185817.
83. *Inovex/MQTT-Stresser: Load testing tool to stress MQTT message broker*. Inovex GmbH, [b.r.]. Dostupné také z: <https://github.com/inovex/mqtt-stresser>.

Obsah přiloženého média

datasheety	
└─ BH1750.pdf	senzor intenzity světla
└─ DHT22.pdf	čidlo teploty a vlhkosti ovzduší
└─ DS18B20.pdf	teplotní čidlo
└─ ESP32.pdf	mikročip ESP32
└─ ESP8266.pdf	mikročip ESP8266
└─ HC-SR501.pdf	detektor pohybu
└─ RPi-3Bplus.pdf	Raspberry Pi model 3B
└─ SIM800L.pdf	modul pro připojení do sítě mobilního operátora
mereni	
└─ heatmap-data.txt	zaznamenaná data při měření dosahu sítě
└─ mqtt-stresser-data.xlsx	sešit s daty při měření kapacity sítě
text	
└─ thesis.pdf	text práce ve formátu PDF
zdrojove-kody	
└─ esp32-pir.zip	archiv s implementací modulu pro detekci pohybu
└─ esp32-mqttclient.zip	archiv s implementací modulu pro sběr dat
└─ rpi-mqttclient.py	skript použitý pro ovládání kamerového systému