



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH KONSTRUKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY ZAVĚŠENÉ NA DRAKU

DESIGN OF AIRBORNE WIND TURBINE

DIPLLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Švehla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. František Švehla**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh konstrukce větrné elektrárny zavěšené na draku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Větrná energetika je globálně jednou ze dvou nejprogresivnějších technologií pro výrobu elektrické energie. Vzhledem k tomu, že pravděpodobnost stabilních energetických zisků větrné energie roste s výškou instalace turbíny, tak se hledají nové možnosti umístění těchto turbín ve výškách bez nutnosti výškových staveb. Jednou z možností je kluzákový systém zavěšení větrné elektrárny.

Cíle diplomové práce:

- (1) Rešerše stavu poznání a realizací kluzákových větrných elektráren.
- (2) Technické a lokální požadavky pro provoz kluzákových elektráren.
- (3) Aerodynamický návrh draku kluzákové elektrárny zvolených parametrů pro zvolenou lokalitu.
- (4) Základní rozměry rotorů kluzákové elektrárny z bodu (3).

Seznam doporučené literatury:

HANSEN, Martin. Aerodynamics of wind turbines, 2008. Second edition. London: Earthscan Ltd., ISBN 978-1-84407-438-9.

HAU, Erich, Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.

ABBOTT, Ira, DOENHOFF, Albert. Theory of wing sections, including a summary of airfoil data, 1959. Druhé upravené vydání. New York: Dover publications, inc., ISBN-10:0-486-60586-8.

Anon. Kitemill gains Norwegian investor, 2023. Dostupné z: <https://renews.biz/86205/>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Větrná energie představuje klíčový pilíř rozvoje obnovitelných zdrojů energie v celosvětovém měřítku. Se zvyšující se poptávkou po udržitelných technologiích se objevují nové přístupy k jejímu využívání – jedním z nich jsou systémy *Airborne Wind Energy* (AWE), tedy létající větrné elektrárny. Tato zařízení se vznášejí ve vysokých výškách do jednoho kilometru a mohou generovat velké množství elektrické energie s minimálními náklady na zařízení oproti konvenčním větrným turbínám. Tato práce si klade za cíl provést rešerši aktuálního stavu ve vývoji AWE systémů a podrobněji prozkoumat jednotlivé typy těchto zařízení jako je *Ground generation* a *Fly generation*. Současné prototypy AWE dosahují výkonů v řádu stovek kilowattů a vyznačují se řadou výhod: nízkými náklady, úsporou materiálu a vysokou mobilitou, díky níž mohou být využity i v odlehlých oblastech jako bezemisní zdroj energie. Předposledním bodem této práce je aerodynamický návrh jednotlivých systémů létajících elektráren včetně výpočtu klíčových parametrů, a základních rozměrů rotorů pro zařízení typu *Fly generation*. Vývoj těchto systémů má potenciál do budoucna stát se předním ukazatelem, kam se bude ubírat větrná energetika a může představovat zásadní význam pro bezemisní výrobu energie.

Klíčová slova

létající větrné elektrárny, draci létající s příčným větrem, čerpací cyklus, generování energie na draku, generace energie na zemi, lano

ABSTRACT

Wind energy is a key pillar of renewable energy development globally. As demand for sustainable technologies increases, new approaches to harnessing it are emerging – one of which is *Airborne Wind Energy* (AWE) systems, i.e. flying wind turbines. These devices can now hover at high altitudes of up to one kilometre, generating large amounts of electricity with minimal equipment costs compared to conventional wind turbines. This thesis aims to investigate the current state of the art in the development of AWE systems and to examine in more detail the different types of these devices such as *Ground generation* and *Fly generation*. The current AWE prototypes reach outputs in the order of hundreds of kilowatts and are characterized by a number of advantages: low cost, material savings and high mobility, which allows them to be deployed even in remote areas as an emission-free energy source. The penultimate point of this work is the aerodynamic design of individual AWE systems, including the calculation of key parameters, and basic rotor dimensions for *Fly generation* systems. The development of these systems has the potential to be a leading indicator of where the wind energy industry will be heading in the future and may represent a major contributor to emission-free power generation.

Key words

airborne wind energy, crosswind kite systems, pumping cycle, fly generation, ground generation, tether

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVEHLA, František. Návrh konstrukce větrné elektrárny zavěšené na draku. Online, diplomová práce. Jiří ŠKORPÍK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165651>. [cit. 2025-05-23].

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „**Návrh konstrukce větrné elektrárny zavěšené na draku**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce a s využitím nástrojů generativní umělé inteligence v souladu s principy akademické integrity.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své závěrečné práce Ing. Jiřímu Škorpíkovi, PhD. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a podporu během celého procesu psaní této diplomové práce. Rád bych také touto cestou poděkoval všem vyučujícím, kteří mě během mého studia na vysoké škole podporovali, vedli a motivovali k dalšímu rozvoji. Velké díky patří zejména pedagogům, jejichž odbornost, ochota sdílet znalosti a trpělivost byly pro mě inspirací. Mé upřímné díky patří samozřejmě také mé rodině a blízkým přátelům za jejich neustálou podporu, povzbuzení a trpělivost, která mi pomohla úspěšně zvládnout studium i práci na tomto projektu a doufám, že mě budou i nadále podporovat v mém dalším směřování po škole.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 Typy létajících větrných elektráren a jejich specifikace	11
1.1 Historický vývoj	11
1.2 Klasifikace AWE systémů.....	13
1.2.1 Ground generation pumping koncept	14
1.2.2 Fly generation koncept	16
1.2.3 Rotary koncept.....	17
1.2.4 Systémy využívající Magnusův efekt.....	18
1.3 Výhody AWE systémů	19
1.3.1 AWE pro ostrovní komunity – výhody a potenciál.....	19
1.4 Offshore AWE systémy	21
1.4.1 Výhody pro offshore aplikace	22
1.5 Typy letu.....	22
1.5.1 Crosswind motion.....	22
1.5.2 Tether-aligned.....	23
1.5.3 Rotational	23
1.6 Funkce a fáze pumping cycle	23
1.6.1 Model letu.....	24
1.6.2 Fáze navíjení lana	26
1.6.3 Přechodová fáze.....	26
1.6.4 Tažná fáze.....	27
1.7 Nereverzibilní pumping cycle.....	28
1.8 Vzlet a přistání.....	29
1.8.1 Přístup pro pevná křídla.....	29
1.8.2 Přístup pro měkká křídla	31
1.8.3 Použití věže pro vzlet	31
1.9 Větrné farmy.....	32
1.10 Porovnání konvenčních větrných elektráren oproti létajícím.....	32
1.10.1 Zadání studie	34
1.10.2 Metodika studie	34
1.10.3 Výsledek studie	36
1.11 Ekonomika.....	36
1.12 Potenciál AWE ve světě	39
2 Lokality vhodné pro umístění větrných draků.....	41
2.1 Výkon větru	41
2.2 Vliv výšky na rychlosti větru.....	41
2.3 Terén.....	41
2.4 Podmínky pro provoz	42
2.4.1 Prostorová omezení větrných farem	42
2.4.2 Turbulence a ovlivnění proudění vzduchu za větrnými farmami.....	44

2.5	Výška letu	45
3	Konstrukce draka	47
3.1	Základní druhy křídel.....	47
3.1.1	Měkká křídla	47
3.1.2	Pevná křídla.....	47
3.1.3	Hybridní křídla.....	48
3.2	Druhy křídel podle typu generování energie.....	49
3.2.1	Groud generation systémy	49
3.2.2	Fly generation systémy	51
3.3	Ground generation s pohyblivou pozemní základnou.....	52
3.3.1	Generátor s vertikální osou rotace	52
3.3.2	Generátory využívající kolejovou dráhu.....	52
3.4	Systém s více draky.....	52
3.5	Vzlet pomocí stožáru	54
3.5.1	Výhody a nevýhody věže.....	56
3.6	Lana a jejich vlastnosti.....	56
3.7	Uchycení lan a řízení draka.....	58
3.8	Měření a regulace napětí v lanu	58
3.8.1	Měřicí obvod	58
3.8.2	Regulační a optimalizační mechanismus	58
3.9	Environmentální dopady	59
3.10	Hmotnost a velikost AWE	60
4	Budoucí a vzniklé realizace AWE	61
4.1	Fly generation	61
4.1.1	Makani	61
4.1.2	Altaeros BAT	62
4.1.3	WindLift.....	64
4.1.4	KiteKraft	64
4.2	Ground generation.....	66
4.2.1	AMPYX power	66
4.2.2	Kitemill	67
4.2.3	EnerKíte	67
4.2.4	Kitepower.....	69
4.2.5	SkySails Power	72
5	Aerodynamický výpočet AWE systémů	74
5.1.1	Aerodynamický výkon.....	74
5.2	Princip výroby energie z příčného větru	74
5.3	Poměr vzlaku k odporu	75
5.4	Základní fyzikální limity technologií využívajících energii výškového větru	75
5.5	Kosinová účinnost.....	76
5.5.1	Kosinové ztráty způsobené gravitací	76
5.5.2	Průměrná kosinová účinnost	77

5.6	Betzův limit	78
5.7	Rovnice výkonu pro Ground-gen AWE	78
5.7.1	Aerodynamické síly	78
5.7.2	Konečná aerodynamika křídla	81
5.7.3	Dodatečný odpor způsobený lanem	81
5.7.4	Úhel elevace a prověšení lana	82
5.7.5	Vliv fáze navíjení lana	83
5.7.6	Další ztráty	85
5.8	Rovnice výkonu pro Fly-gen AWE	85
5.8.1	Odvození	86
5.8.2	Dodatečný odpor kvůli lanu a prohnutí lana	87
5.8.3	Další ztráty	88
5.9	Unifikovaný model AWE	88
5.9.1	Aerodynamické síly	88
5.10	Model vzletu	90
5.11	Vliv hmotnosti draka na výrobu energie	93
5.11.1	Faktor využití výkonu ζ	95
5.12	Výpočet	96
5.12.1	Lokalita	96
5.12.2	Výběr profilu křídla	99
5.12.3	Zadání hodnot	99
5.12.4	Rychlosti větru	101
5.13	Ground-gen AWE	101
5.13.1	Vliv fáze navíjení lana	104
5.14	Fly-gen AWE	107
5.15	Unifikovaný model	110
5.16	Model lineárního vzletu	112
5.17	Vliv hmotnosti draka na výrobu energie	115
5.17.1	GG-AWE	115
5.17.2	FG-AWE	116
5.18	Faktor využití výkonu ζ	117
6	Základní rozměry rotorů létající větrné elektrárny	119
6.1	Výpočet	119
	ZÁVĚR	122
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	124
	SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ	129
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	132
	SEZNAM OBRÁZKŮ	134
	SEZNAM TABULEK	137

ÚVOD

Instalovaný výkon systémů *Airborne Wind Energy* (AWE), tedy létajících větrných elektráren, by se měl v následujícím desetiletí zvýšit až sedmdesátinásobně, jak ilustruje graf na Obr. 0.1. Takovýto dynamický rozvoj indikuje zásadní technologický posun, který může podstatně ovlivnit podobu globální výroby elektrické energie.

Větrná energie obecně nabízí značný potenciál pro pokrytí celosvětových energetických potřeb, zejména díky své téměř univerzální dostupnosti a obnovitelnosti. Nicméně současné technologie konvenčních větrných turbín narážejí na omezení související s infrastrukturní náročností, zejména co se týče výstavby stožárů, základů a přepravy obřích rotorových listů. Z ekonomického hlediska se tak efektivní provoz těchto zařízení omezuje přibližně na 25 % rozlohy pevninské země. AWE a klasické větrné turbíny lze porovnávat z různých hledisek. Ekonomické analýzy ukazují, že AWE mají nižší náklady na dopravu a montáž a potenciálně vyšší kapacitní faktory, což může vést k nižší jednotkové ceně elektřiny (LCOE). Jelikož je však zatím AWE velmi omezeně komerčně dostupná technologie, je obtížné tyto odhady nákladů přesně porovnat. Z technického hlediska mají AWE výhodu v tom, že mohou upravovat výšku svého provozu změnou úhlu elevace a délkou lana, což jim umožňuje dosahovat vyšších rychlostí větru. Navíc se předpokládá, že vítr ve vyšších nadmořských výškách je stabilnější než ve výškách, kde pracují běžné turbíny, což by mohlo vést k menší variabilitě výroby energie v případě AWE. Tyto tři charakteristiky – vyšší dostupnost větru, jeho větší stálost a nižší náklady – by měly přispívat k dobrému ekonomickému potenciálu této technologie.

AWE systémy umožňují efektivní využití větrné energie na více než 80 % povrchu země, čímž výrazně rozšiřují potenciál tohoto zdroje. Jejich princip spočívá v aerodynamickém zachytávání větrné energie pomocí draků uchycených na lanech, jejichž trajektorie je řízena pokročilým autonomním řídicím systémem. Tato zařízení operují ve výškách až 1000 metrů nad zemí, kde se vyskytují silnější a stabilnější větrné proudy než v blízkosti povrchu. Vzhledem k tomu, že výkon větrného systému roste s třetí mocninou rychlosti větru, představuje tento přístup významný potenciál pro navýšení produkce elektrické energie.

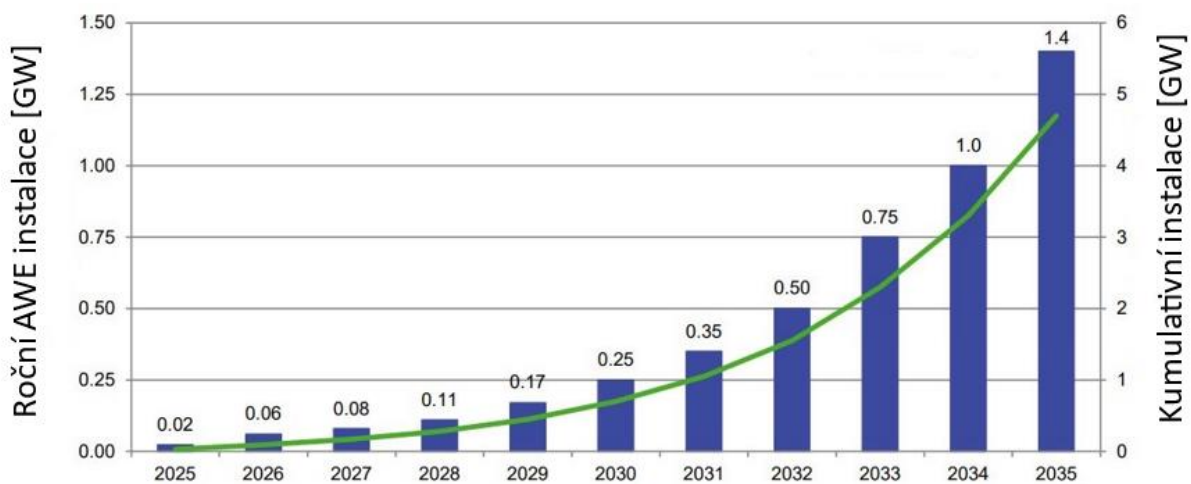
V současnosti se firmy i výzkumníci zaměřují na dvě hlavní technologie AWE: systémy s generací na zemi (Ground generation), kde drak prostřednictvím tahu pohání generátor umístěný na zemi, a systémy s generací ve vzduchu (Fly generation), v nichž jsou generátory integrovány přímo na letounu. Oproti konvenčním turbínám mohou tyto systémy dosáhnout vyšší specifické hustoty výkonu na jednotku plochy, a to při současném snížení materiálových i investičních nákladů.

V budoucnu lze očekávat, že AWE a tradiční turbíny budou soutěžit v lokalitách, kde je možné nasazení obou technologií. Aby však dávalo smysl investovat do vývoje AWE jako technologie pro velkoplošnou výrobu elektřiny vedle klasických turbín, je třeba jasně prokázat její potenciální výhody.

Ačkoliv některé prototypy již dosáhly stupně komerční připravenosti, rozsáhlé nasazení AWE technologií naráží dosud na několik výzev. Nejvýznamnější z nich je potřeba dlouhodobě spolehlivého autonomního provozu za různých povětrnostních podmínek, a to s minimálními náklady na údržbu a dohled. Právě dosažení takové úrovně robustnosti a automatizace bude určujícím faktorem pro širší adaptaci těchto systémů v energetickém mixu budoucnosti.

Tato diplomová práce si klade za cíl analyzovat aktuální stav vývoje AWE technologií, klasifikovat jejich hlavní koncepční přístupy, identifikovat jejich klíčové přínosy a limity a provést základní aerodynamické a výkonové výpočty. Dále se práce bude věnovat srovnání AWE systémů s konvenčními větrnými elektrárnami z hlediska provozních charakteristik, technicko-ekonomické efektivity a možností integrace do stávajících energetických

infrastruktur. Výsledky mají přispět k hlubšímu porozumění tomuto rychle se rozvíjejícímu oboru a nastínit perspektivy jeho budoucího vývoje.



Obr. 0.1 Předpokládaný vývoj instalace AWE od roku 2025 do konce roku 2035 ([1], upraveno).

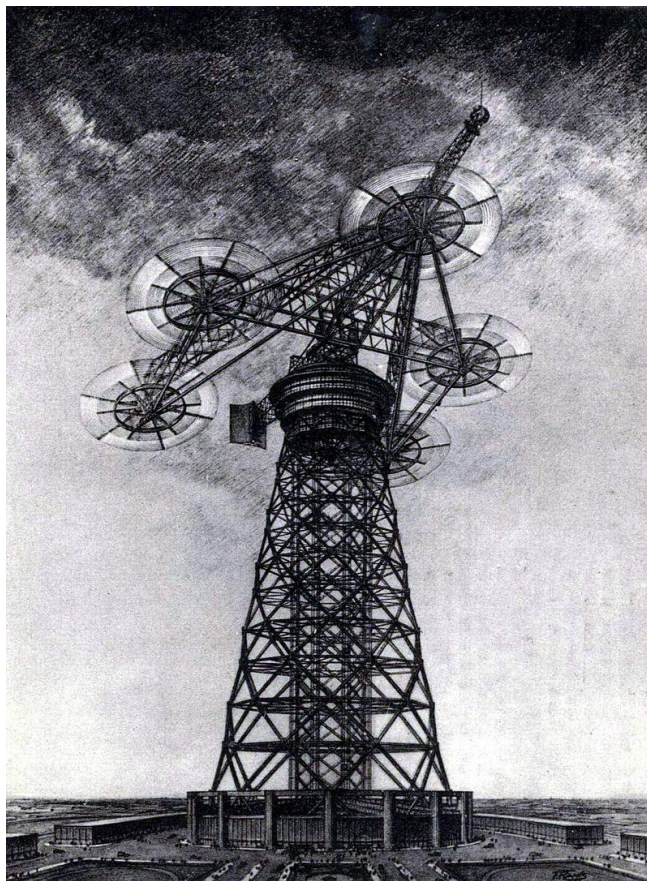
1 Typy létajících větrných elektráren a jejich specifikace

High altitude wind energy systems (systémy větrné energie s vysokou nadmořskou výškou) častěji známé jako *Airborne Wind Energy* (AWE), či AWES (*Airborne Wind Energy Systems*) jsou zařízení pro oblast v nadmořské výšce v rozsahu 200 m–10000 m. Cílem AWE je překonat hlavní omezení konvenčních větrných elektráren, konkrétně: omezenou obtékanou plochu (swept area) a její velikost, nestabilní dostupnost toku větru, omezení počtu potenciálních míst a právní a implementační omezení [2].

1.1 Historický vývoj

Již od starověku bylo pouštění draků oblíbenou činností v různých kulturách, přičemž jejich původ se datuje do Číny kolem 5. století př. n. l. Po mnoho staletí nacházeli draci uplatnění v rozličných oblastech, například při měření vzdáleností, přepravě nákladů či předpovědi počasí. V roce 1752 provedl Benjamin Franklin známý experiment, při němž využil draky k lepšímu pochopení podstaty elektřiny a blesků. Ve druhé polovině 19. století se pozornost postupně přesouvala k vývoji letadel, což vedlo k poklesu zájmu o vzdušné systémy, jako byly draci, vzducholodě či horkovzdušné balóny [2].

Jedním z prvních, kdo se zabýval praktickým využitím draků, byl britský vynálezce George Pocock (1774–1843), který je použil jako tahovou sílu pro svůj inovativní dopravní prostředek *Charvolant*, tedy kočár tažený draky [3]. V třicátých letech 20. století představil německý inženýr Hermann Honnef koncept rozsáhlých větrných elektráren osazených několika rotory, jak je zobrazeno na Obr. 1.1. Dalším



Obr. 1.1 Větrná elektrárna s několika rotory podle německého inženýra Hermanna Honnefa [71].

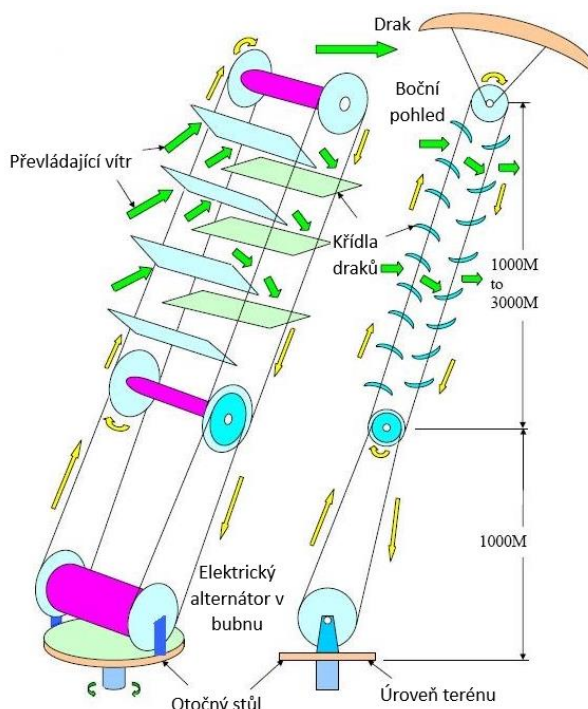
významným představitelem této oblasti byl Aloys van Gries, který v roce 1921 publikoval odbornou učebnici o leteckých konstrukcích a podal patent na využití větrných turbín ve vyšších nadmořských výškách. Van Gries se inspiroval zvedacími draky, které se v té době běžně používaly v meteorologických observatořích po celém světě pro měření ve vysokých nadmořských výškách, a navrhl jejich spojení s tehdy rozvíjející se technologií větrných turbín. Tato myšlenka byla konkretizována až o půl století později, v období energetické krize 70. let, kdy se jejím rozpracováním zabýval průkopník kosmického výzkumu Hermann Oberth [4]. V roce 1976 si Peter Payne a Charles McCutchen nechali patentovat svůj koncept tzv. *self-erecting windmill* [2]. Další pokrok v oblasti větrné energie přinesl v roce 1986 tým Bryana W. Robertse z univerzity v Sydney, jenž vyvinul a otestoval čtyřrotorový letoun (Obr. 1.3). K jednomu z nejvýznamnějších objevů v tomto odvětví došlo v roce 1980, kdy inženýr Miles L. Loyd z Lawrence Livermore National Laboratory publikoval v časopise *Journal of Energy* přelomovou studii nazvanou *Crosswind Kite Power*. V této práci teoreticky dokázal, že draci

létající v příčném větru (crosswind motion) mohou být vysoce efektivním zdrojem energie. Z jeho výpočtů vyplývalo, že takové systémy by mohly generovat více energie než klasické větrné turbíny upevněné na pevné konstrukci stožárů [4]. Tato studie je považována za počátek výzkumu letecké větrné energie. Loyd definoval maximální teoretický výkon, kterého lze dosáhnout při využití trajektorie příčného větru, která se stala klíčovým referenčním bodem pro další vývoj v oblasti AWE.

V následujících dvaceti letech se však výzkum možnosti praktického využití tohoto konceptu vyvíjel jen pomalu. Teprve koncem 90. let 20. století, kdy začaly obnovitelné zdroje energie získávat na popularitě, se tento směr opět dostal do popředí vědeckého zájmu. V roce 1997 přišel holandský profesor Wubbo Ockels s návrhem systému „Laddermill“, který je vyobrazen na Obr. 1.2. Tento koncept spočíval ve využití soustavy draků propojených lanem, které pohání generátor umístěný na zemi. V následujících letech vzniklo v Evropě a USA mnoho start-upů a vědeckých týmů, které se zabývaly komerčním potenciálem této technologie. Například v roce 2001 zahájil německý startup Skysails vývoj větrných draků určených k zajištění levné energie pro nákladní lodě. V roce 2006 se začal formovat startup Makani Power, který se zaměřil na využití bezpilotních letadel jako nosičů větrné energie. S tímto konceptem současně experimentovaly i další společnosti. K významnému milníku došlo v roce 2005, kdy se v Kalifornii uskutečnila první konference zaměřená na leteckou větrnou energii, jejímž cílem bylo sjednotit výzkumné úsilí v této oblasti.

V roce 2009 byla oficiálně založena organizace AWESCO. Její první mezinárodní konference proběhla v roce 2010 na Stanfordské univerzitě v USA. V současnosti existuje řada start-upů, které pracují na funkčních prototypech s výkonem od několika kW až po 600 kW. Technologie AWE vzbudila zájem i u předních energetických společností, jako jsou E.On, Engie či GE. Několik projektů AWE je rovněž součástí evropského programu Horizont 2020, jehož cílem je podpora výzkumu, technologického vývoje a inovací v tomto průmyslovém odvětví [2].

Pojem AWE byl zaveden kolem roku 2010, kdy se na společném názvu shodnuli různí aktéři,



Obr. 1.2 Koncept „Laddermill“ profesora Wubbo Ockelse ([72], upraveno).



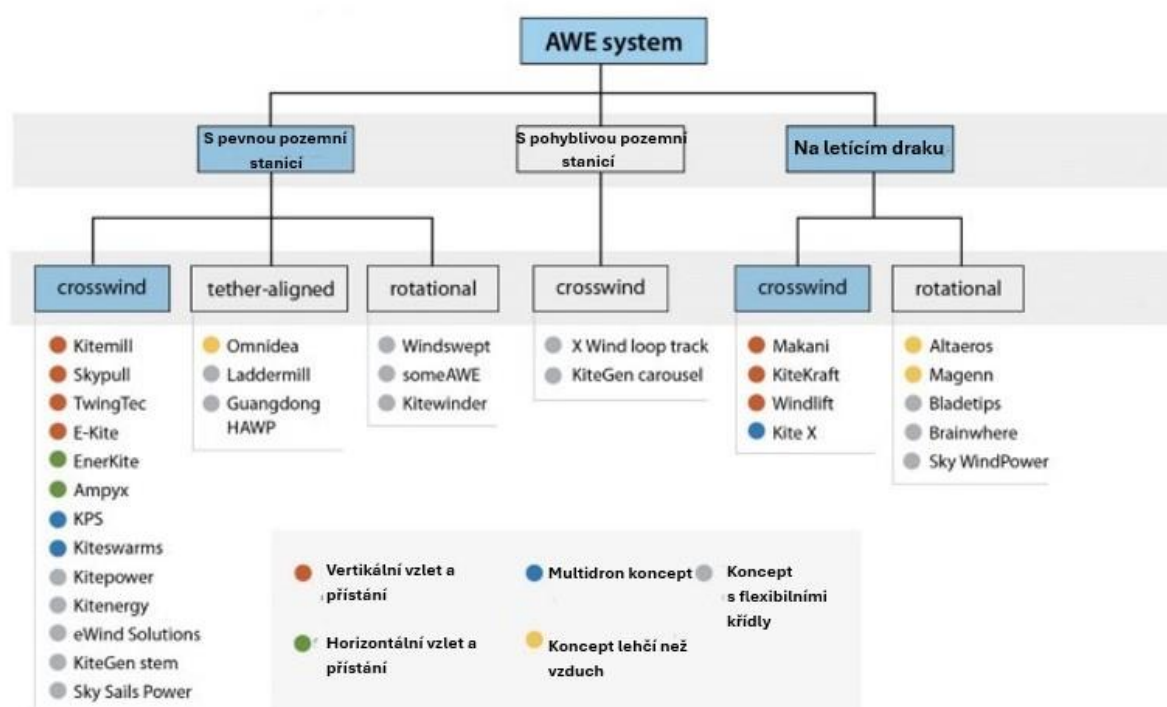
Obr. 1.3 Testování prototypu létajícího draka v Austrálii v květnu 1986 [54].

především firmy, ale i akademické výzkumné skupiny, které zkoumaly různé koncepty sdílející výše popsané charakteristické rysy. Už od teoretických základů publikovaných koncem 70. let bylo od počátku 21. století vyvinuto několik reálných systémů, které nesly názvy jako *kite power* (energie z draků), *energy kites* (energetičtí draci) nebo *high-altitude wind power/energy* (větrná energie z vysokých výšek). Vývoj jednotlivých konceptů se lišil například typem letadla (pružné, polotuhé, tuhé), počtem lan (jedno až tři), typem vztlaku (aerodynamický nebo aerostatický) a umístěním elektrických strojů a měničů (na palubě nebo na zemi) [5].

1.2 Klasifikace AWE systémů

Rozlišujeme výrobu elektřiny s pevnou generátorovou pozemní stanicí (Ground generation pumping concept), s pohyblivou generátorovou pozemní stanicí (with moving GS) a s generátorovou stanicí přímo na draku (On-board generation concept).

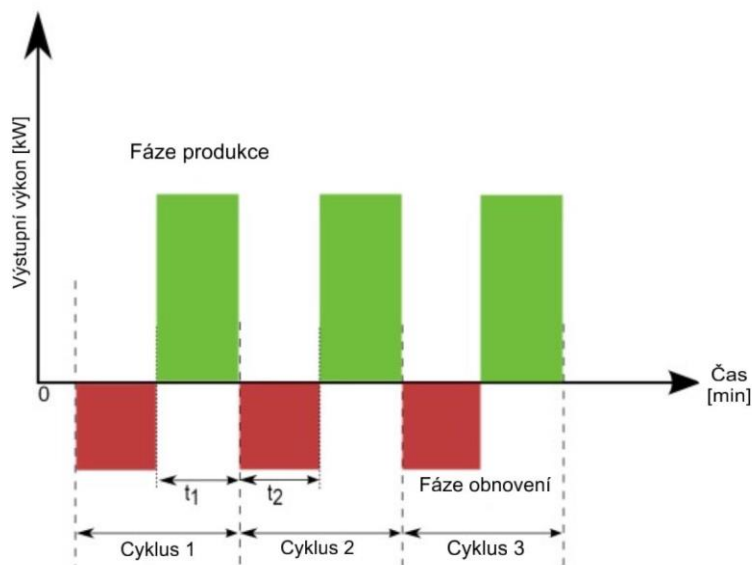
Konstrukce, která využívají pohyblivou pozemní stanici, jsou technicky složité a skutečné realizace jsou prozatím nerealizovatelné. Tyto hlavní sekce dále rozlišujeme jako pro letový provoz jednotlivých upoutaných zařízení s příčným větrem (crosswind), letový provoz v jedné linii s upoutaným zařízením bez výrazné složky příčného větru (tether-aligned) a rotační letový provoz celého zařízení (rotational). Při příčném větru a provozu zarovnaném s lanem se na pozemní generátorovou stanici přenášejí pouze tažné síly letícího zařízení, zatímco při rotačním provozu se přenáší ještě točivý moment. Nejčastějšími řešeními bývá kombinace pevné pozemní generátorové stanice a provozu s příčným větrem. Pro nepřetržitou výrobu elektřiny tyto systémy kombinují fázi odvíjení lana s fází navíjení, která se označuje jako „čerpací cyklus“ (pumping cycle-v práci bude nadále takto označován), kde se energie vyrábí ve fázi odvíjení [6].



Obr. 1.4 Rozdělení technologie AWE podle letových operací draka a typu generování energie s jednotlivými výrobci ([7], upraveno).

1.2.1 Ground generation pumping koncept

Zkráceně označovaný jako *Ground gen* nebo také jako *lift mode* či GG-AWE. Tento typ zařízení patří mezi nejrozšířenější systémy [8]. Využití napětí v lanu k odvíjení lana z bubnu umístěného na zemi umožňuje pohánět elektrický generátor bez nutnosti elektricky vodivého lana [9]. Charakteristickým rysem je přerušované generování energie, známé též jako *pumping cycle* nebo „jo-jo“ efekt. Letecký prvek, tedy větrný drak, je fixně upevněn k zemi a jeho pohyb je omezen lanem. Kinetická energie větru se v tomto systému přeměňuje na tahovou sílu, která vyvíjí snahu odvinout lano z bubnu. Tento mechanismus umožňuje převod tahové síly vzdušného prvku prostřednictvím navijáku a generátoru umístěného na zemi.



Obr. 1.5 Princip pumping cycle
Fáze výroby energie (zeleně) a zpětného navíjení (červeně)
 t [s] čas ([2], upraveno).

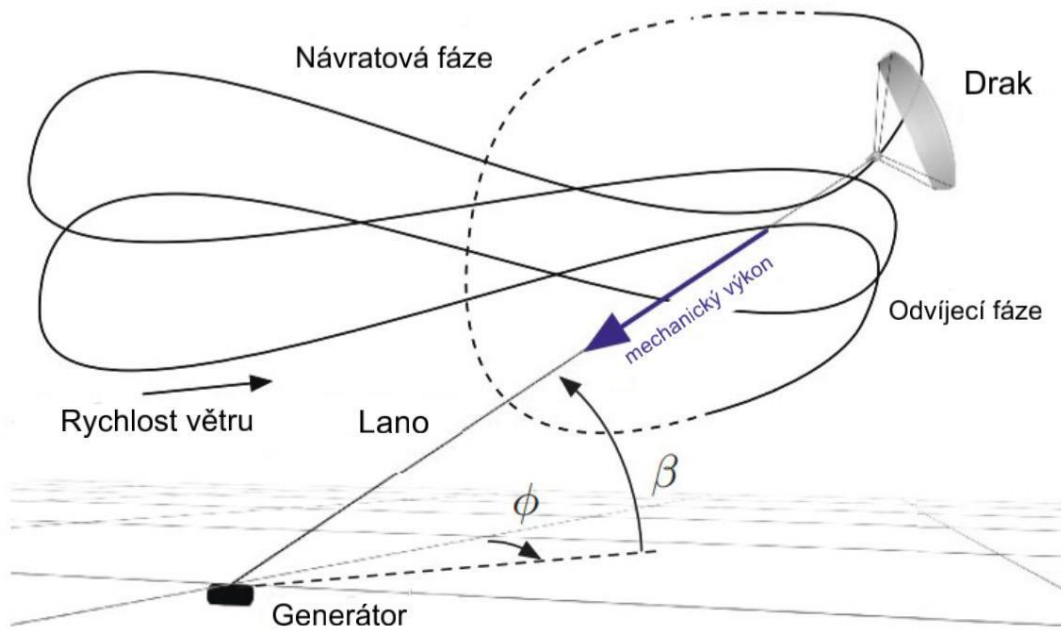
Provoz tohoto zařízení probíhá ve dvou hlavních fázích:

a) Fáze výroby energie (trakční fáze) – během této fáze dochází k odvíjení lana vlivem tahové síly draka, čímž je generována elektrická energie.

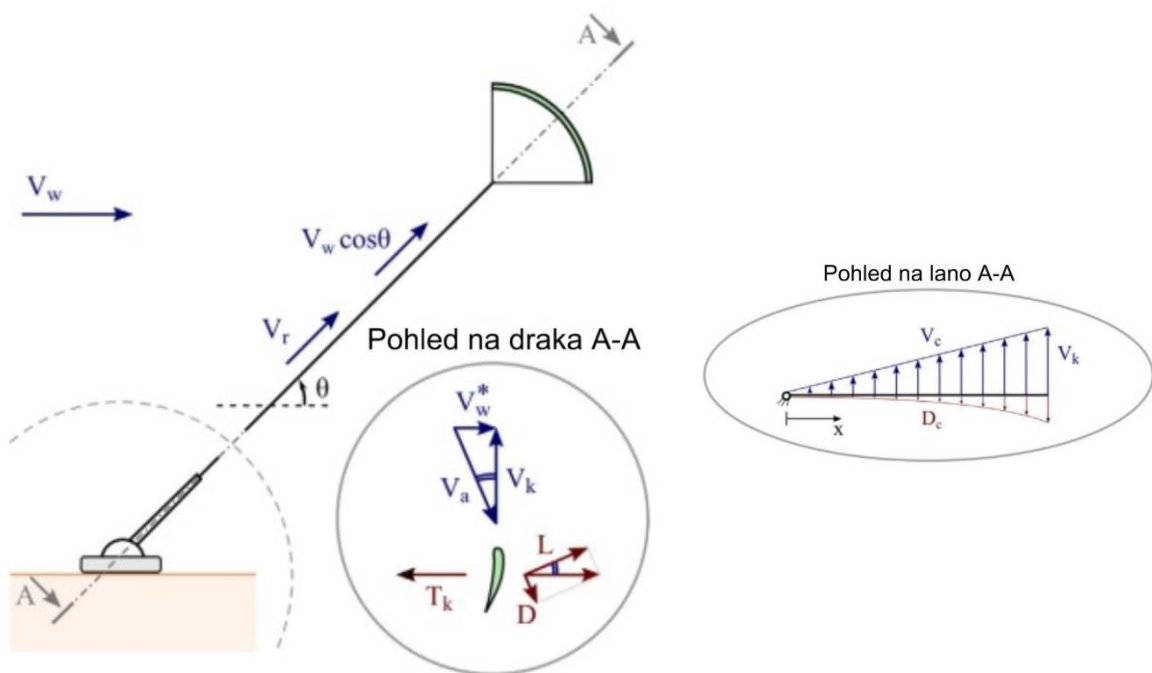
b) Fáze zpětného navíjení – v této fázi se část vyrobené elektrické energie využívá k navracení draka do nižší letové výšky [8]. Během ní je letový režim upraven tak, aby došlo k výraznému snížení vztlaku, čímž je celková bilance energie během celého cyklu pozitivní. Protože se k výrobě energie využívá především vztlková síla křídla při letu napříč větrem [9].

Trajektorie letu vzdušného prvku, a tedy i síla působící na lano, je řízena s využitím příčné složky větru. Cílem této regulace je maximalizace energetického výnosu v trakční fázi a současně minimalizace energetické spotřeby ve fázi zpětného navíjení. Draci mohou létat buď po trajektorii ve tvaru šroubovice, nebo po translační křivce připomínající osmičku (tzv. figure-eight trajectory) [8]. Při pohybu vzdušné platformy po předem definované dráze se setkává se silnými relativními větry, které vytvářejí velký vztlak, jenž následně vytváří velkou tahovou sílu v laně. Proto je volba vzdušné platformy a trajektorie předmětem neustálých inovací [2]. Pro jednu pozemní stanici může být využito více vzdušných prvků, přičemž některé její součásti jsou sdílené, což přispívá k plynulejší produkci energie [8].

V současnosti mnoho AWE systémů využívá *Ground gen* v kombinaci s měkkými draky (soft-wing systems), které pocházejí od výrobců kite-surfových draků a jsou řízeny prostřednictvím délky řídicích lan [9].



Obr. 1.6 Schéma Ground-gen s měkkými křídly systému s translačním pohybem po trajektorii připomínající osmičku a fázi odvíjení a navíjení lana β [°] úhel mezi zemí a lanem, ϕ [°] azimutální úhel ([36], upraveno).



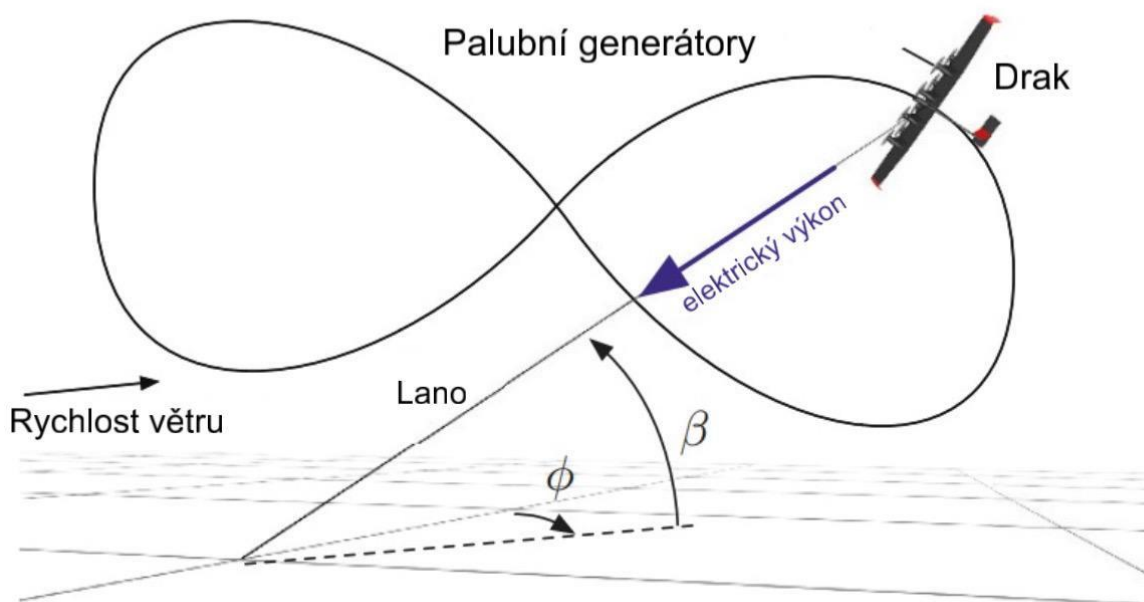
Obr. 1.7 Základní model příčného větru s měkkým drakem Ground-gen AWE V_w [m/s] skutečná rychlost větru, V_a [m/s] relativní rychlost větru na draka, V_k [m/s] rychlost draka, V_r [m/s] rychlost odvíjení lana, θ [rad] úhel mezi lanem a směrem větru, D [N] aerodynamická odporová síla, L [N] aerodynamická vztlačová síla, T_k [N] tah v laně, V_c [m/s] rychlost větru po délce lana, D_c [N] odpor kabelu ([37], upraveno).

1.2.2 Fly generation koncept

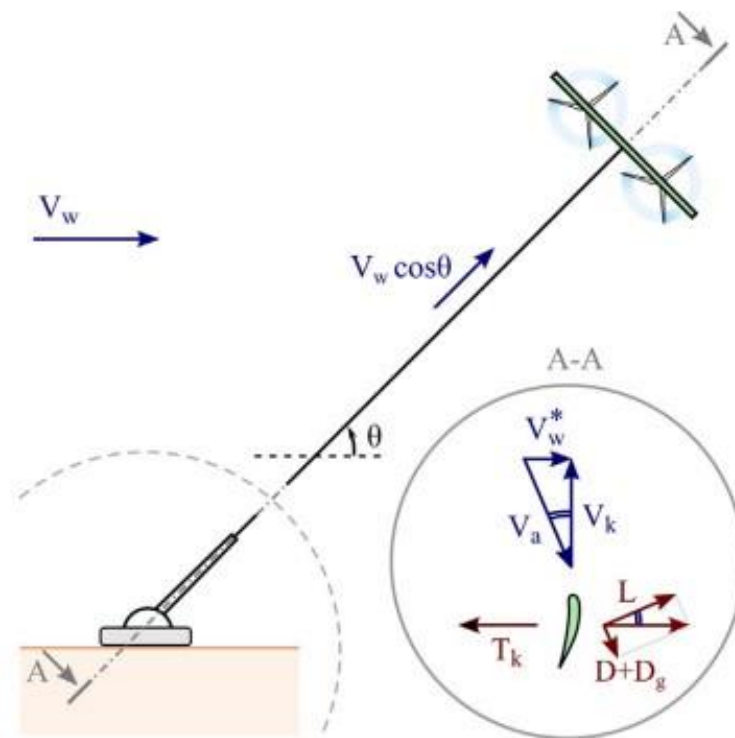
Také zkráceně *On-board*, *Fly-gen* nebo *drag mode* či FG-AWE. *On-board generation* zařízení jsou připevněna k zemi na pevném místě. V běžném provozu má úvaz pevnou délku. Zařízení pro přeměnu energie z mechanické na elektrickou je umístěno na palubě draka, přičemž jeden nebo více rotorů pohání generátory. Energie je pak po laně přenášena zpět dolů do základnové stanice [8]. Při výrobě energie přímo na palubě systému je zapotřebí vodivé lano, které přenáší vyrobenou elektřinu na zem ke spotřebiteli. Toto lano musí být dostatečně pevné, aby odolalo vysokému napětí způsobenému letem napříč větrem. Pro minimalizaci ohmických ztrát a hmotnosti lana je výhodné použití vysokonapěťových kabelů. Nicméně izolace vodičů a přítomnost palubních generátorů zvyšují jak odporové síly, tak hmotnost celého systému [9].

Vzdušný prvek létá proti větru. Pohyb může být kruhový nebo osmičkový. Tyto systémy obvykle využívají aerodynamicky nadnášené draky a v porovnání s pozemními výrobními systémy mívají složitější konstrukci a jsou těžší. Kromě toho čelí větším odporovým silám. Přesto jedna z hlavních výhod palubních výrobních systémů ve srovnání s těmi pozemními spočívá v jejich schopnosti vzlétat a přistávat za použití konvenčních metod, jako jsou vertikální vzlet a přistání (VTOL), rovinný vertikální vzlet a přistání (PVTOL) a další podobné techniky.

Díky tomu, že jsou turbíny přímo namontovány na kluzáku, mohou palubní systémy efektivněji využívat sílu relativních větrů ve srovnání s GG-AWE. Nevýhodou těchto systémů je však potřeba vodivého lana, které musí být schopné přenášet vysoké proudy a napětí do pozemní stanice, což vyžaduje lano většího průměru. Tato vlastnost následně vede k vyšším odporovým silám působícím na lano [2].



Obr. 1.8 Schéma *On-board generation* systému s osmičkovým letem
 β [°] úhel mezi vektorem rychlosti větru a směrem přenosu trakční energie, ϕ [°] azimutální úhel ([36], upraveno).

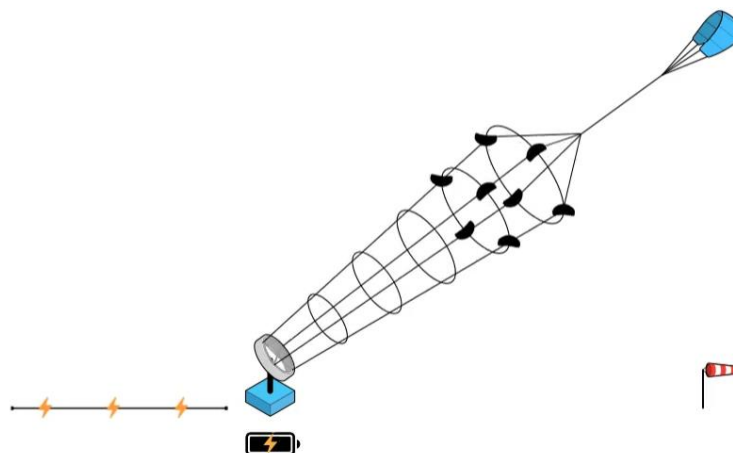


Obr. 1.9 Základní model příčného větru Fly-gen AWE

V_w [m/s] skutečná rychlost větru, V_a [m/s] relativní rychlost větru na draka, V_k [m/s] rychlost draka, θ [rad] úhel mezi lanem a směrem větru, D [N] aerodynamická odporová síla, D_g [N] aerodynamická odporová síla turbíny, L [N] aerodynamická vztlačková síla, T_k [N] tah v laně [37].

1.2.3 Rotary koncept

Toto zařízení je připevněno k zemi a koncepce využívá několik aerodynamických křídel (aerofoils), které jsou (obvykle) udržovány ve větru pomocí hlavního zvedacího draka. Rotory se spojují pomocí lanek, aby se konstrukce otáčela. Udržováním lan v tahu se rotace přenáší na generátor pozemní stanice prostřednictvím rotující základny [8]. Tento systém není rozšířen a na jeho vývoji se nepracuje.



Obr. 1.10 Schéma Rotary concept [8].

1.2.4 Systémy využívající Magnusův efekt

Konstrukce draka založeného na Magnusově efektu umožňuje, aby letící část systému zůstala lehká, a zároveň eliminuje potřebu použití vodivých kabelů.

Systém využívající Magnusův efekt zkoumala společnost Omnidea Lda., která využívá vzdušnou platformu lehčí než vzduch. Princip jeho fungování spočívá v tažné síle generované rotujícím válcovým balónem, který kombinuje aerostatický a aerodynamický vztlak.

Magnusův efekt, na němž je založen princip fungování této platformy, představuje fyzikální jev, který nastává u rotujících těles s kruhovým průřezem, jako jsou válce či koule, pohybujících se v tekutině. V důsledku rotace dochází ve spodní části tělesa k tomu, že tekutina je tlačena proti přitékajícímu proudu, zatímco v horní části je naopak odváděna. Tento mechanismus vede ke vzniku oblasti s vyšším tlakem ve spodní části a oblasti s nižším tlakem v horní části, čímž se vytváří aerodynamická vztlaková síla. Velikost této síly je určena rychlostí proudění tekutiny kolem platformy a rychlostí její rotace. Oba tyto parametry – rychlost volného proudu u i úhlová rychlost rotace ω – ovlivňují intenzitu Magnusova efektu, přičemž s jejich rostoucí hodnotou dochází ke zvýšení generované vztlakové síly.



Obr. 1.11 Prototyp draka založeného na Magnusově efektu od firmy Omnidea Lda. [14].

Vzdušný modul (ABM) tvoří ukotvený balón naplněný heliem, jehož obal má válcový tvar a skládá se ze tří vrstev. Vnitřní vrstva má nízkou propustnost pro helium, střední vrstva zajišťuje odolnost proti oděru a vnější vrstva poskytuje strukturální pevnost obalu. Na obou stranách balónu jsou připevněny popruhy, elektrický motor, převodový systém a mechanické rameno. Modul lana obsahuje soustavu kotevních lan, která spojují balón s navijákem. Hlavní lano propojuje centrální naviják s kotevním bodem, kde se rozděluje na dvě lana připojená k mechanickým ramenům každého ABM. V blízkosti kotevního bodu je umístěna elektronická a komunikační jednotka, která umožňuje řízení systému a příjem telemetrických dat. Pro vzlet a přistání se používá sada pomocných navijáků. Během letu je helium doplňováno pomocí pomocného systému, který kompenzuje drobné úniky do atmosféry. Pro přepravu užitečného zatížení je v blízkosti kotevního bodu zavěšen lehký hliníkový rám na laně [14].

1.3 Výhody AWE systémů

AWE potřebují volné plochy s poloměrem 400–850 m kolem pozemní stanice pro efektivní provoz a dosahují optimálního výkonu při rychlostech větru 4–5 m/s nebo vyšších.

- + Přímé připojení k síti – stabilní dodávky elektřiny do místních rozvodných sítí.
- + Off-grid řešení – napájení odlehlých komunit ve spojení se solárními panely a dalšími obnovitelnými zdroji.
- + Energetická soběstačnost – napájení průmyslových podniků a komunit, snížení závislosti na dovozu paliv.
- + Nouzové nasazení – rychlé obnovení dodávek energie po katastrofách.

AWE systémy představují budoucnost větrné energetiky, zejména pro ostrovní a odlehlé oblasti, kde nabízejí udržitelnou, flexibilní a cenově dostupnou alternativu k tradičním zdrojům energie [1].

1.3.1 AWE pro ostrovní komunity – výhody a potenciál

- + Snadná instalace

AWE systémy jsou kompaktní, lehké a snadno přepravitelné, což z nich činí ideální řešení pro ostrovy s omezenou infrastrukturou. Díky rychlé instalaci a škálovatelnosti se mohou přizpůsobit různým energetickým potřebám.

- + Nízký dopad na životní prostředí

AWE systémy mají minimální vizuální a ekologickou stopu, což umožňuje jejich nasazení i v citlivých oblastech. Jejich provoz má nízký dopad na ptactvo díky výšce letu a specifickému pohybovému vzoru draků.

- + Efektivnější využití místního větrného potenciálu

AWE systémy umožňují přístup k vysokohorským větrům až do výšky 800 m, které běžné větrné turbíny nevyužívají. Tato schopnost doplňuje další obnovitelné zdroje a usnadňuje integraci energie v hybridních systémech kombinujících solární panely, baterie nebo bionaftu.

- + Nouzové nasazení při katastrofách

Díky snadné přepravitelnosti a rychlé instalaci jsou AWE systémy ideální pro poskytování energie při krizových situacích, například po přírodních katastrofách. Jejich flexibilita umožňuje rychlou obnovu dodávek energie v postižených oblastech [15].

- + Otevření nových oblastí pro větrnou energii

Evropa má v současnosti 207 GW onshore větrné kapacity, přičemž Evropská komise plánuje zvýšit tuto kapacitu na 1 000 GW do roku 2050 v rámci své vize pro dosažení nulových emisí. To znamená, že je potřeba rozvinout mnohem více větrných lokalit.

- + Nižší logistické nároky

AWE má mnohem nižší logistické nároky než tradiční větrné technologie, což umožňuje instalaci na místech, kde nelze využít tradiční větrné elektrárny. Mnohé z těchto lokalit se nacházejí v oblastech s vysokými větrnými podmínkami, což znamená nižší LCOE.

+ Vyšší využití prostoru pro výrobu energie

AWE může využít prostor až třikrát efektivněji než tradiční technologie. To znamená, že AWE může na dané lokalitě vyprodukovat více energie. I když přesné zlepšení bude potvrzeno praktickými zkušenostmi z více AWE projektů, očekává se, že tento faktor bude významný. Oblasti s nižšími větrnými podmínkami mívají vyšší LCOE, protože při stejných investičních nákladech poskytují nižší výnos energie, zatímco AWE technologie umožňuje efektivněji využít kvalitní lokality, a tím tuto potřebu snižuje. Pokud by Evropa využívala polovinu AWE a polovinu tradiční větrné technologie, mohla by dosáhnout až dvojnásobného množství vyrobené energie.

+ Vyšší kapacitní faktor než tradiční větrné technologie

AWE vykazuje vyšší kapacitní faktor (měřítko toho, jak efektivně daná elektrárna využívá svůj instalovaný (nominální) výkon v čase) než tradiční větrné technologie na stejné lokalitě s obdobnou nominální kapacitou. Očekává se, že na lokalitách s dobrými větrnými podmínkami dosáhne AWE hodnoty přes 60 % (Onshore větrná turbína typicky 20–40 %). To znamená, že AWE se ve svém potenciálu blíží spíše základním zdrojům (JE 80–95 %, UH 60–80 %) než tradiční onshore větrné technologie nebo v solární energetice.

+ Nižší náklady v čase

AWE může v budoucnu poskytovat energii za nižší náklady než tradiční větrné technologie. Ačkoli jsou v současnosti náklady vyšší, s investicemi do vývoje technologie bude AWE schopné konkurovat s průměrnými cenami nižšími než u tradiční větrné technologie v polovině 30. let 21. století.

+ Ochrana proti nárůstu cen komodit a nákladů na financování

AWE může sloužit jako ochrana (hedge) proti nepříznivým makroekonomickým vlivům, jako je růst cen komodit (např. oceli, betonu) a zvýšení nákladů na financování (např. úrokových sazeb). Tyto faktory negativně ovlivňují kapitálově náročné projekty, mezi které patří i konvenční větrné elektrárny, zejména offshore technologie.

AWE systémy vyžadují podstatně méně materiálu, protože eliminují nutnost stavby vysokých věží a velkých základových konstrukcí. Tím dochází k snížení kapitálových výdajů (CAPEX) i provozních nákladů (OPEX). Díky tomu si AWE zachovává vyšší konkurenceschopnost i v době materiálových a finančních krizí a zůstává atraktivní alternativou pro investory a developery obnovitelných zdrojů.

+ Nižší environmentální dopad

AWE zanechává o 40 % nižší uhlíkovou stopu než tradiční větrné technologie, protože využívá mnohem méně materiálu. Některé koncepty mohou dosáhnout snížení až o 90 % díky drastickému snížení materiálových nároků. Tradiční větrné technologie (přibližně 10 kg/MWh) zanechávají mnohem nižší uhlíkovou stopu než fosilní paliva (přibližně 500 kg/MWh), ale vzhledem k cíli nulových emisí bude i tato intenzita výzvou k vyvážení. Snadná instalace AWE jak na pevninské, tak i na mořské ploše znamená, že její dekomise má menší lokální environmentální dopad než tradiční větrné elektrárny. AWE může také sloužit jako platná alternativa pro opětovné využití offshore infrastruktury místo jejího dekomisování [1].

1.4 Offshore AWE systémy

Bezpečnostní požadavky na AWE mohou být přísnější, protože riziko selhání zařízení ve vzduchu může ovlivnit větší oblast mořského dna. Pokud zmírnění tohoto rizika vyžaduje, aby do oblasti větrného pole vjížděla pouze autorizovaná plavidla, mohlo by to omezit možné oblasti pro provozování.

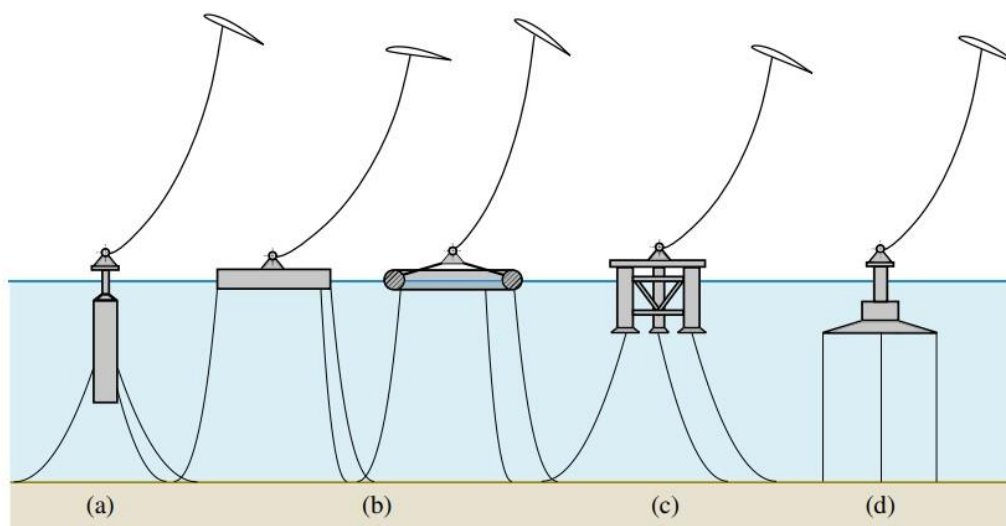
AWE systémy potřebují větší volný prostor pro vzlet a přistání draka než klasické turbíny pro svou rotaci. Tento prostor není potřeba trvale, ale je nezbytný v určitých fázích provozu (start, přistání, servis). Tyto oblasti musí být umístěny výše než u plovoucího zařízení konvenční větrné farmy, aby se zabránilo lámání vln (což znamená, že bude potřeba relativně krátká věž a platforma) [1].

Instalace AWE budou čelit problémům s dostupností vhodných lokalit. Současné technologie AWE vyžadují velké vzdušné prostory, mohou představovat bezpečnostní rizika a čelit fenoménu NIMBY, což může silně omezit počet vhodných vnitrozemských lokalit. Jednou z možností, jak tyto problémy obejít, je instalace AWE v mořských lokalitách – cesta, kterou se v současnosti intenzivně ubírá také tradiční průmysl větrné energie. Offshore oblasti jsou hojně dostupné a podléhají méně přísným regulačním omezením než vnitrozemské lokality. Navíc by offshore AWE mohly těžit ze stejných výhod jako tradiční offshore větrné elektrárny, například: vyšší rychlosti větru, které obecně rostou se vzdáleností od pobřeží; vyšší kvalita větru s nižší turbulencí; tenčí mezní vrstva, což umožňuje vysokou hustotu výkonu v relativně malé výšce; dostupnost rozsáhlých souvislých oblastí vhodných pro velké projekty.

Na druhé straně offshore AWE budou čelit i stejným problémům jako konvenční offshore větrné elektrárny, např.: nákladné mořské základy; nákladné napojení do elektrické sítě a v některých případech nutnost posílení slabých pobřežních sítí; nákladné instalační postupy a omezený přístup během stavby kvůli počasí; omezený přístup pro provoz a údržbu, což snižuje dostupnost systému, a tím i produkci energie.

Nicméně relativně malá velikost a hmotnost základů AWE a příznivý režim zatížení (především tahem) by mohly být klíčovými faktory umožňujícími vývoj levných a štíhlých offshore platform [16].

Na Obr. 1.12 jsou představeny základní typy plovoucích plošin pro AWE systémy.



Obr. 1.12 Schematický nákres čtyř hlavních typů plovoucích plošin pro větrné elektrárny na moři
a–bójka, b–člunová plošina, c–částečně ponorné, d–základy s napjatými lany [16].

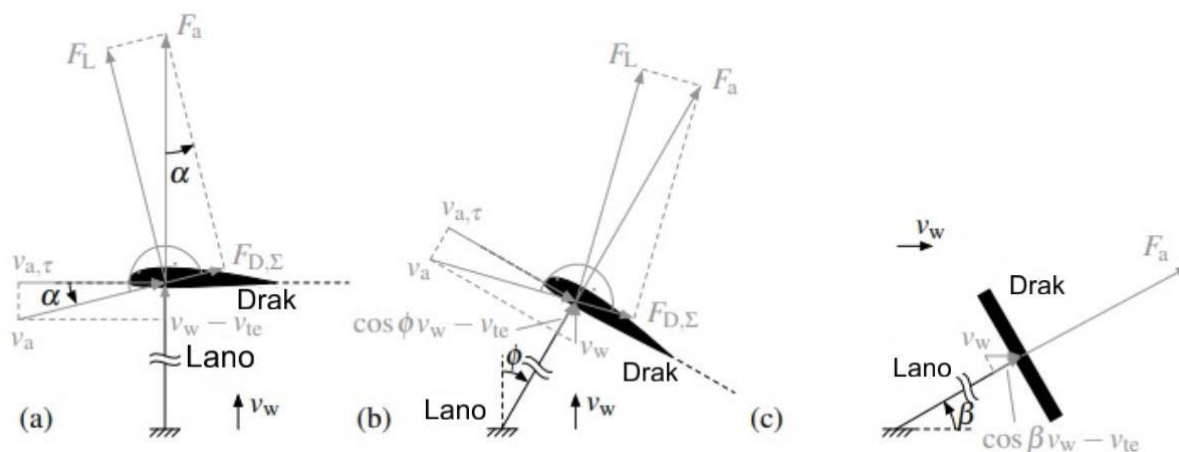
1.4.1 Výhody pro offshore aplikace

- + Zařízení AWE mohou fungovat v oblastech s nižšími větrnými rychlostmi u hladiny moře, což znamená, že potenciální oblast pro rozvoj je širší než pro konvenční větrné technologie.
- + Požadavky na přístavy a plavidla jsou u AWE méně složitá, protože základna samotná je menší a není potřeba manipulovat s věží, což znamená, že není nutné pracovat s vybavením na výškách stejně jako u větrných turbín založených na věžích. To znamená, že na rozdíl od konvenčních turbín nejsou potřebné specializované přístavní infrastruktury a plavidla pro instalaci.
- + Snížené příčné zatížení ve srovnání s běžnými větrnými technologiemi znamená, že AWE zařízení vytvářejí mnohem nižší kroticí momenty na základních strukturách. To umožňuje levnější výstavbu, použití na palubách plavidel nebo využití stávajících struktur pro prodlouženou životnost, která přesahuje jejich stanovenou dobu trvání pro běžné větrné technologie.
- + Větší výkonová hustota větrných farem s AWE zařízeními očekává, že umožní větší výrobu energie na dané ploše mořského dna.
- + Když existující offshore větrné farmy dosáhnou konce své životnosti pro použití s konvenčními větrnými turbínami, může instalace AWE zařízení být nákladově efektivní možností pro opětovné použití základů a přenosové infrastruktury [1].

1.5 Typy letu

1.5.1 Crosswind motion

Také jako pohyb s příčným (bočním) větrem. Jedním ze způsobů, jak maximalizovat výkon, je maximalizovat rychlost větru, která působí na vzdušnou platformu. Zdvojnásobení průměrné rychlosti větru vede k osmkrát vyššímu výstupu energie systému AWE a ztrojnásobení rychlosti větru vede k 27násobnému zvýšení výkonu. Pohyb napříč větrem maximalizuje průměrnou působící rychlost větru, což vede k vyšší výrobě energie.



Obr. 1.13 Náčrt příčného letu draka při pohledu shora (a), s azimutálním úhlem $\varphi = 0$ (b), a při pohledu z boku s elevačním úhlem $\beta \neq 0$, zatímco $\varphi = 0$ (c)

V_w [m/s] skutečná rychlost větru, V_a [m/s] relativní rychlost větru na draka, $V_{a,\tau}$ [m/s] tangenciální rychlost, θ [rad] úhel mezi lanem a směrem větru, F_D [N] aerodynamická odporová síla, D_g [N] aerodynamická odporová síla turbíny, F_L [N] aerodynamická vztlačková síla, F_a [N] aerodynamická výslednice, α [°] úhel mezi $V_{a,\tau}$ a V_a , φ [°] azimutální úhel ([36], upraveno).

V zásadě při pohybu napříč větrem letí vzdušná platforma příčně ke směru zdánlivého větru, tedy s komponentou větru kolmo na směr pohybu. Protože vztlačková síla je funkcí druhé

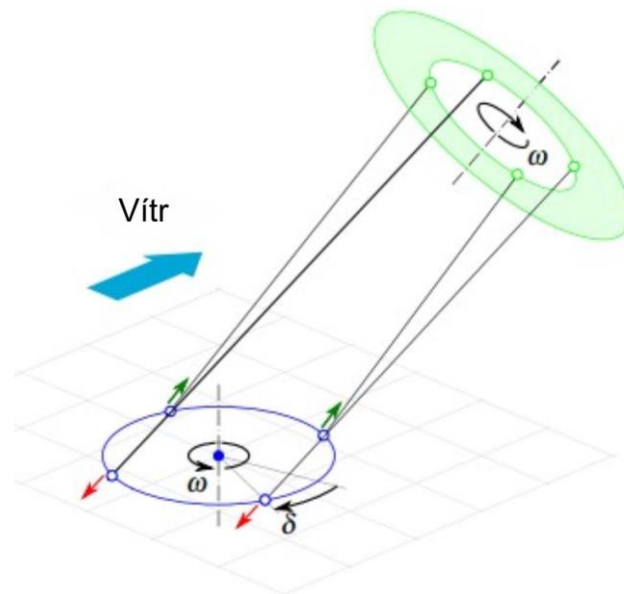
mocniny zdánlivé rychlosti větru, výsledkem je vyšší vztlak, což vede k vyšší výrobě energie. To je způsobeno hlavně tím, že při letu napříč větrem vzdušná platforma pokrývá větší objem větrného pole, tzv. obtékanou plochu nebo také *swept area*. Jinými slovy, získává energii z oblasti větší, než je její vlastní velikost. Tato schopnost systémů AWE jim dává výhodu oproti konvenčním větrným turbínám, kde je zabíraná plocha omezena pevnou velikostí lopatek [2].

1.5.2 Tether-aligned

Let draka ve směru lana. V tomto režimu se drak pohybuje přímo od nebo k zemi podél směru lana, lano zůstává napnuté a nemění směr, aerodynamické síly (vztlak a odpor) směřují podél osy lana. Tento režim je typický např. pro: odvíjecí fázi, navíjecí fázi, nebo pro vzlet a přistání. [18].

1.5.3 Rotational

Pozemní prstenec se otáčí s úhlovou rychlostí ω . Pozemní rotor zaostává za létajícím rotorem o fázový úhel δ (v příkladu $\delta = 35^\circ$). Navijáky jsou namontované na prstenci a otáčejí se s ním po kruhové dráze kolem středu. Každý naviják: buď odvíjí lano (zelená šipka) \rightarrow vyrábí energii, nebo navíjí lano (červená šipka) \rightarrow spotřebovává energii. Když mluvíme o navíjení/odvíjení, myslíme tím pohyb lana vůči pohybujícímu se navijáku, ne vůči zemi [19].



Obr. 1.14 Létající rotor nazývaný RRP
 δ [°] fázový úhel, ω úhlová rychlost [rad/s] ([19], upraveno).

1.6 Funkce a fáze pumping cycle

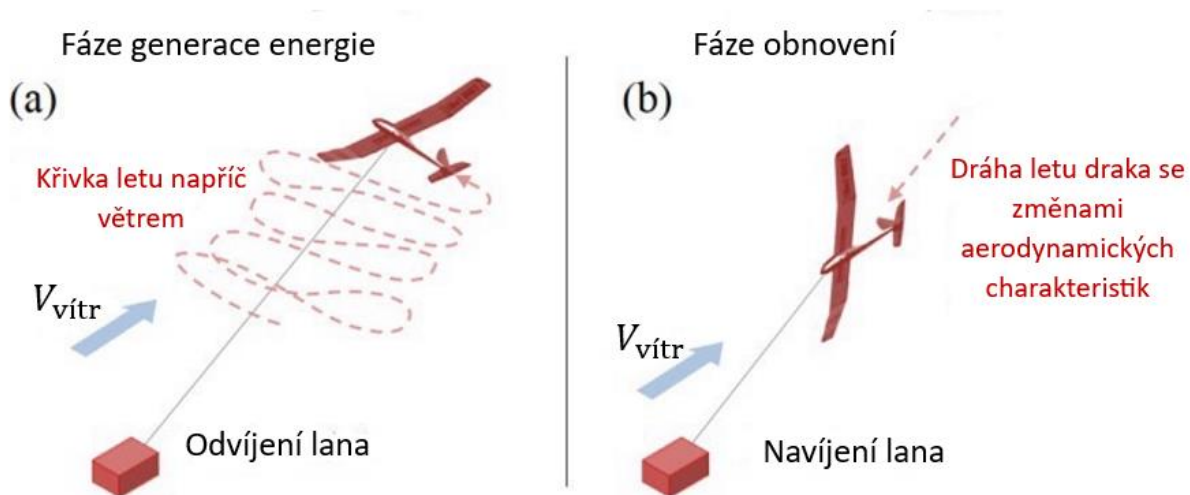
Hlavní provozní fáze systému

1. Vzlet (Take-off)
2. Přejít do fáze výroby energie
3. *Pumping operation* – obsahuje 4 podfáze:
 - Odvíjení (Traction, reel-out)
 - Přejít do retrakce
 - Navíjení (Retraction, reel-in)
 - Přejít do tahu
4. Přejít k přistání (Transition to landing)
5. Přistání (*Landing*) [5]

Systém *pumping cycle* draka je nejintenzivněji zkoumaným systémem AWE na světě [20].

Tahové síly působící na lana jsou přenášeny na navijáky, které jsou napojeny na hřídele motor-generátorů. V průběhu výrobní fáze je letoun řízen tak, aby vytvářel vztlak, čímž dochází k nárůstu tahové síly v lanech a následně k pohonu elektrických generátorů. Pro tuto fázi je nejčastěji využíván let napříč větrem (Obr. 1.15a), který probíhá po kruhových nebo osmičkových drahách. Tento letový režim zvyšuje relativní rychlost větru působícího na letoun, což vede k větší tahové síle v lanech, zatímco při letu bez pohybu napříč větrem zůstává letoun v určité úhlové poloze na obloze a generovaná síla je nižší.

Ve fázi návratu (Obr. 1.15b) se lana pomocí motorů navíjejí zpět na navijáky, čímž je letoun uveden do své výchozí polohy. Kladná energetická bilance je zajištěna tím, že množství energie vyrobené během výrobní fáze převyšuje spotřebu energie ve fázi návratu. Tohoto cíle je dosaženo prostřednictvím řídicího systému KSU, který optimalizuje letovou dráhu a/nebo upravuje aerodynamické vlastnosti letounu s cílem maximalizovat produkci energie a zároveň minimalizovat její spotřebu při navíjení lana [37].



Obr. 1.15 Schéma dvoufázové nespojitě výroby energie pro GG-AWE. (a) Fáze výroby energie probíhá během odvíjení lan, když letadlo provádí let s příčným větrem. (b) Fáze obnovy probíhá tak, aby se minimalizovala energie spotřebovaná na obnovu V_{wind} [m/s] skutečná rychlost větru ([37], upraveno).

V jednotce KSU jsou umístěny elektrické pohony, bubny a hardware řídicího systému. Proces přeměny energie v KSU probíhá ve třech krocích: 1) pohyb draka vytváří tažné síly na lanech, které se přenášejí na bubny a zachycují kinetickou energii větru; 2) tyto síly způsobují otáčení bubnů navijáků, které přeměňují kinetickou energii na mechanickou energii; a 3) otáčení generátorů, které jsou připojeny k bubnům, přeměňuje mechanickou energii na elektrickou [20].

1.6.1 Model letu

Jako výchozí souřadný systém je použit kartézský souřadný systém větru x_w, y_w, z_w , jehož počátek je umístěn v bodě O, kde je lano ukotveno k zemi. Osa x_w směřuje ve směru vektoru rychlosti větru V_w a celý systém je považován za inerciální. Poloha draka K je reprezentována sférickými souřadnicemi (r, θ, φ) , jak ilustruje Obr. 1.16.

Za předpokladu napnutého lana lze pohyb draka rozdělit na dvě složky: radiální složku rychlosti $V_{k,r}$, která je řízena pozemní stanicí, a tečnou složku rychlosti $V_{k,\tau}$. Směr tečné složky $V_{k,\tau}$ je popsán úhlem χ , který je vztažen k lokálnímu jednotkovému vektoru e_θ a je řízen systémem ovládání draka. Nicméně velikost $V_{k,\tau}$ není nezávislým kinematickým parametrem,

ale závislou proměnnou modelu. Bezrozměrné složky rychlosti jsou definovány jako navíjecí faktor f a tangenciální rychlostní faktor λ , přičemž platí vztahy:

$$f = \frac{V_{k,r}}{V_w} \quad [1] \quad (1.1) \quad \lambda = \frac{V_{k,\tau}}{V_w} \quad [1] \quad (1.2)$$

V tomto modelu jsou hmotnost draka, jeho řídicí jednotky a části lana reprezentovány jako ekvivalentní soustředěná hmota umístěná v bodě K . Stejným způsobem je do tohoto bodu zahrnuta také výsledná aerodynamická síla generovaná drakem společně s částí aerodynamického odporu lana. Kvazistabilní chování letu je určováno rovnováhou mezi aerodynamickou silou, gravitační silou a silou přenášenou lanem.

Pumping cycle je rozdělen do tří hlavních fází: fáze tažení, fáze navíjení lana a přechodové fáze. Pro každou z těchto fází se předpokládá konstantní aerodynamické chování draka. Pro zohlednění proměnlivé kinematiky a sil se dráha letu r_k posouvá v diskretních časových krocích Δt podle schématu konečných diferencí.

$$r_k(t + \Delta t) = r_k(t) + V_k(t)\Delta t \quad (1.3)$$

Kontrolní strategie pro tento model je založena na předem stanovených hodnotách síly lana F_t , kterých je dosaženo úpravou navíjecího faktoru podle následujícího vztahu:

$$f = \sin \theta \cos \phi - \sqrt{\frac{sF_t}{qAC_R(1 + \kappa^2)}} \quad [1] \quad (1.4)$$

Kde q označuje dynamický větrný tlak:

$$q = \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad [Pa] \quad (1.5)$$

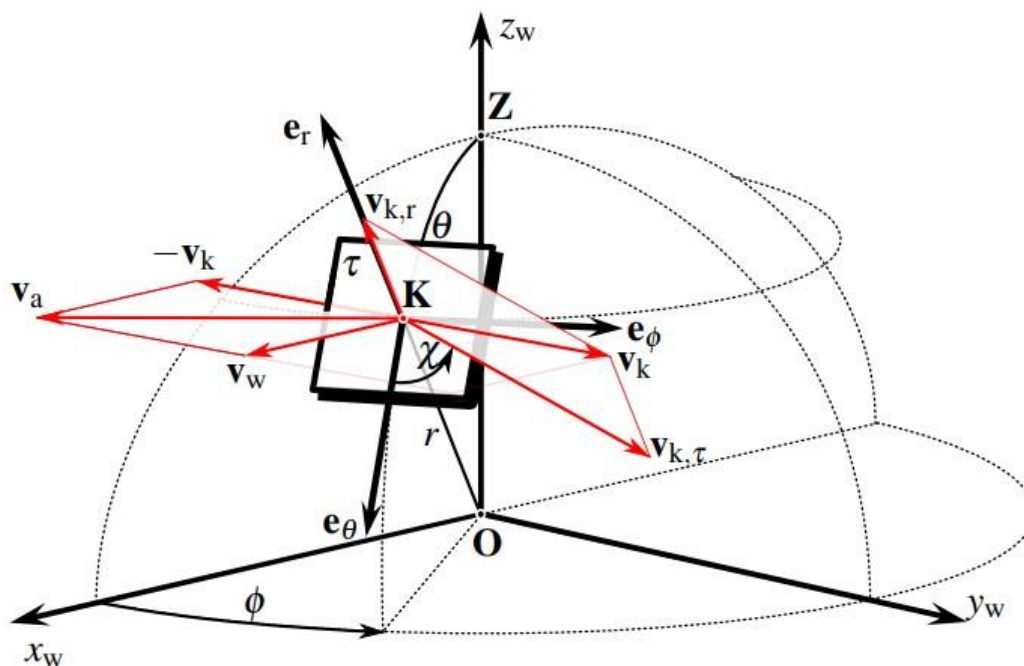
Výsledný aerodynamický koeficient je hodnocen jako:

$$C_R = \sqrt{C_L^2 + C_D^2} \quad [1] \quad (1.6)$$

Kinematický poměr je dán vztahem:

$$\kappa = \frac{V_{a,\tau}}{V_{a,r}} \quad [1] \quad (1.7)$$

A S_k označuje projekční plochu draka. Pro zanedbatelnou hmotnost vzdušných komponent je κ identické s poměrem vztahu a odporu C_L/C_D . Pro reálné systémy však toto zjednodušení již neplatí a rovnice musí být řešena iterativně [23].



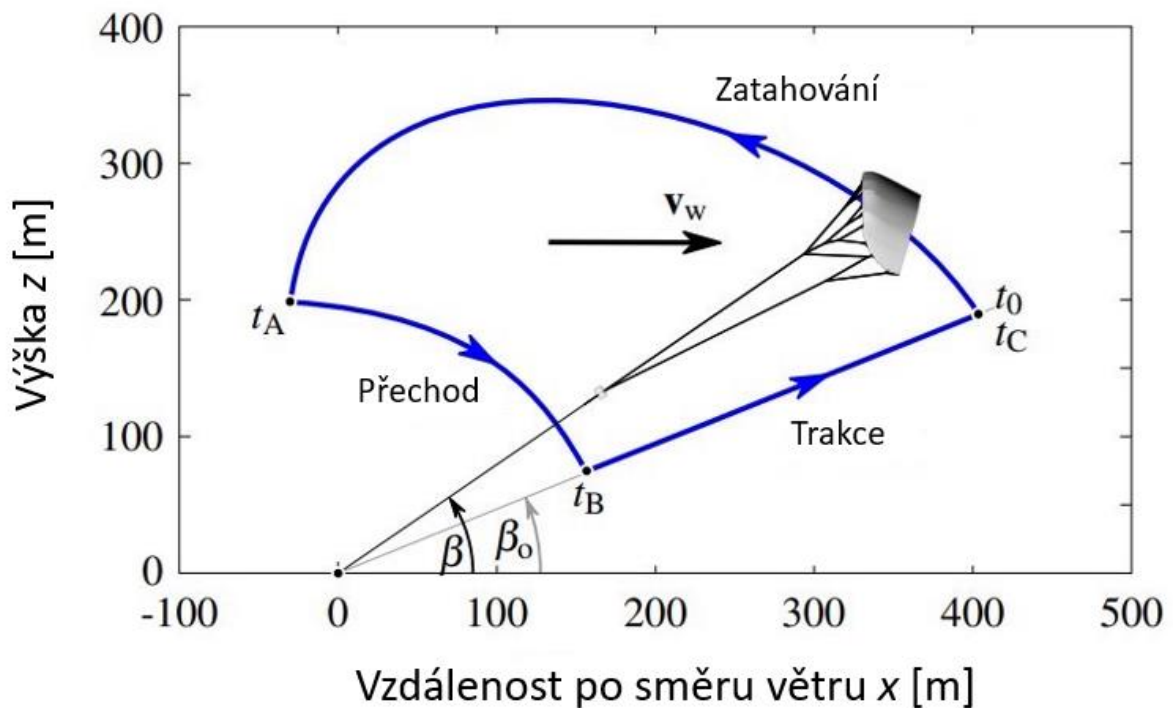
Obr. 1.16 Souřadnice draka v prostoru. Definice relativní rychlosti větru: $V_a = V_w - V_k$. Rychlost draka V_k je rozložena na radiální a tečné složky, označené jako $V_{k,r}$ a $V_{k,t}$. Úhel kurzu χ je měřen v tečné rovině τ , zatímco sférické souřadnice (r, θ, ϕ) jsou definovány vzhledem k souřadnému systému větru x_w, y_w, z_w . Úhel elevace lana je definován jako $\beta = 90^\circ - \theta$ [23].

1.6.2 Fáze navíjení lana

Simulace *pumping cycle* začíná navíjecí fází lana, protože pouze na jejím začátku je pozice draka plně definována podle nastavení modelu. Drak je zcela zbaven síly a dosahuje svého minimálního poměru vzlaku a odporu C_L/C_D , aby spotřeboval co nejméně energie pro manévr navíjení lana. Drak letí proti větru při nastaveném úhlu kurzu $\chi = 180^\circ$ a azimutovém úhlu $\phi = 0^\circ$, přičemž úhel elevace lana β se postupně zvyšuje. Délka lana je na začátku fáze maximální a při jejím ukončení dosahuje minimální hodnoty. Při nižší rychlosti navíjení lana $v_{k,r}$ může drak dosáhnout stabilního letového stavu na radiální trajektorii směřující k základně na zemi. Pokud je však rychlost navíjení vyšší, jak je běžně v praxi, dosahuje tento stabilní letový stav s $\lambda = 0$ a konstantní hodnotou β_{max} pouze asymptoticky, přičemž přechod do přechodové fáze nastává dříve, než k dosažení tohoto stavu dojde. Tento jev je dobře patrný na Obr. 1.17, který znázorňuje reprezentativní vypočítanou trajektorii. V případě vysoké rychlosti navíjení drak přeletí základnu směrem proti větru, což vede k pozicím $x < 0$ [23].

1.6.3 Přechodová fáze

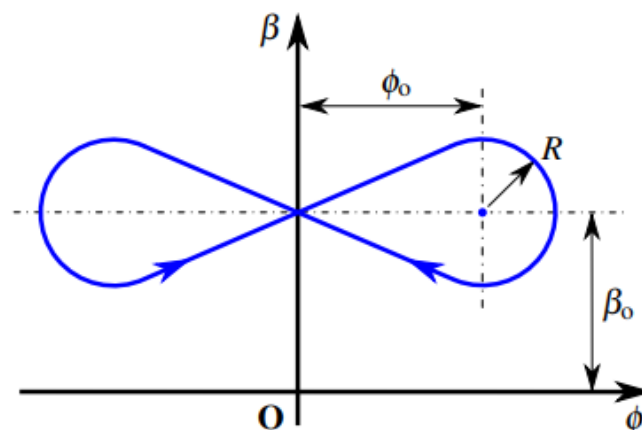
Na konci fáze navíjení lana dosahuje úhel elevace hodnoty, která je výrazně vyšší než návrhová hodnota požadovaná pro tažnou fázi. Přechodová fáze slouží k provedení letového manévru, jehož cílem je upravit polohu draka tak, aby odpovídala úhlu elevace určujícímu tažnou fázi. V průběhu tohoto manévru je drak opět plně aktivován, čímž získává aerodynamické vlastnosti potřebné pro fázi tažení. Drak letí ve směru po větru s kurzem $\chi = 0^\circ$, dokud nedosáhne požadovaného úhlu elevace odpovídajícího tažné fázi. Řízení v této fázi není založeno na napětí lana, ale na řízení rychlosti jeho navíjení. Hlavním cílem je udržet konstantní délku lana během celého manévru. Pro zajištění provozní stability však každý systém AWE musí udržovat minimální hodnotu napětí v lanu. Například tehdy, pokud napětí klesne pod stanovený limit, je lano navíjeno zpět tak, aby se napětí opět zvýšilo [23].



Obr. 1.17 Princip pumping cycle. Dvourozměrná trajektorie letu je vypočtena pomocí kvazistacionárního modelu. Radiální úsečka, kde β_0 zůstává konstantní, představuje fázi tahu, ale explicitně nezachycuje manévry při letu s příčným větrem. Místo toho je odvozen na základě zprůměrovaného stavu letu. Časová integrace začíná v t_0 , následuje přechodová fáze v t_A , trakční fáze v t_B a končí v t_c , což znamená konec cyklu ([23], upraveno).

1.6.4 Tažná fáze

V tažné fázi je drak řízen v křížovém letu s cílem maximalizovat relativní rychlost větru na křídle, což odpovídá i maximální síle tažení. Protože kruhové manévry mohou vést k torzi lana a zamotání systému vodicích linek, běžně se používají manévry, které sledují horizontální osmičku. Aby byla maximalizována tažná energie, jsou tyto manévry obvykle soustředěny kolem úhlu $\varphi = 0^\circ$, jak je znázorněno na Obr. 1.18.



Obr. 1.18 Reprezentativní manévr letu ve tvaru osmičky v rovině φ - β [23].

Současný přístup používá konstantní průměrný letový stav pro výpočet generované tažné síly. V souladu s tím je proměnlivý tangenciální pohyb v rovině φ - β reprezentován konstantní průměrnou úhlovou pozicí (φ_0, β_0) a letovou rychlostí (λ_0, χ_0) .

Hodnoty φ_0 , β_0 a χ_0 jsou určeny jako časové průměry skutečného letového stavu během křížového manévru. Jelikož tažná síla závisí na součiniteli $\cos\varphi \cos\beta$, definujeme průměrné pozice jako: $\cos\varphi_0 = \cos\varphi$ a $\cos\beta_0 = \cos\beta$ [°]

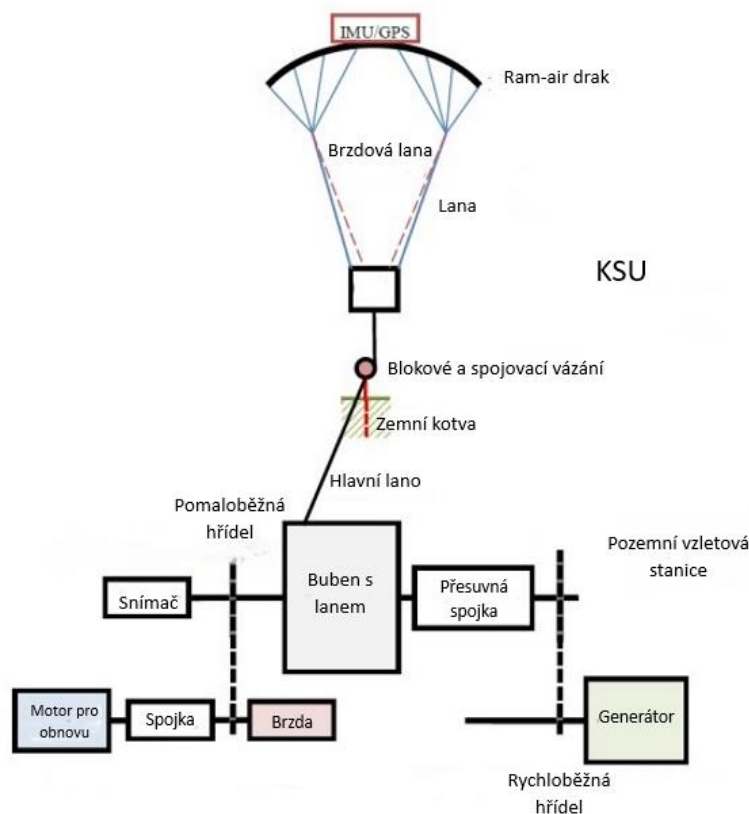
Tyto definice vedou k průměrné úhlové pozici (φ_0, β_0) , která se shoduje se středem laloku osmičkového manévru, jak je znázorněno na Obr. 1.18. Vzhledem ke gravitační síle letí drak pomaleji při vzestupu než při sestupu, takže průměrný úhel kurzu χ_0 je větší než 90° – což je hodnota charakterizující horizontální let. Tažná fáze končí, když lano dosáhne své maximální délky v čase t_C . Poloha draka v tomto čase se shoduje s jeho počáteční polohou v čase t_0 [23].

1.7 Nereverzční pumping cycle

Reverzace generátoru v *pumping cycle* představuje problém pro propojení s rozvodnou sítí ve velkém měřítku, a to kvůli neefektivitě zastavování velkého generátoru a jeho následnému otočení do režimu motoru. Proces reverzace vyžaduje pokročilé výkonové elektronické měniče, které umožňují čtyřkvadrantový provoz pro brzdění, zastavení a otočení směru v každém provozním cyklu. To zvyšuje náklady i složitost systému. Navíc tento proces zavádí plnohodnotné výkonové měniče do každé jednotky, což jsou prvky s vysokou mírou poruchovosti.

Nereverzční *pumping cycle* AWE systémů byl původně vyvinut na Univerzitě Limerick v Irsku. V tomto typu AWE systému je mechanická energie dodávána do systému odběru energie prostřednictvím přesuvné spojky. Tato spojka je umístěna na straně generátoru bubnu s lanem a během fáze navíjení tak obchází generátor. To umožňuje reverzaci bubnu pomocí samostatného malého elektrického motoru bez nutnosti reverzace generátoru. Schéma nereverzčního *pumping* režimu systému využívajícího větrnou energii ve vzduchu je znázorněno na Obr. 1.19.

Akademičtí pracovníci na TU Delft také zvažovali variantu konceptu využívajícího oddělený motor a generátor pro fázi navíjení a generování energie [44].



Obr. 1.19 Systém větrné energie bez reverzního pumping režimu ([44], upraveno).

1.8 Vzlet a přistání

Pozemní stanice poskytuje podpůrnou strukturu a v případě potřeby i energii pro provádění manévřů. Použité přístupy závisí na typu křídla, protože pevná a měkká křídla se výrazně liší hmotností a letovým chováním, a proto vyžadují odlišné postupy [38].

1.8.1 Přístup pro pevná křídla

Přístupy ke vzletu pevného křídla lze rozdělit na lineární a rotační pohyb. V rámci lineárního vzletu může být pohyb buď vertikální, nebo horizontální.

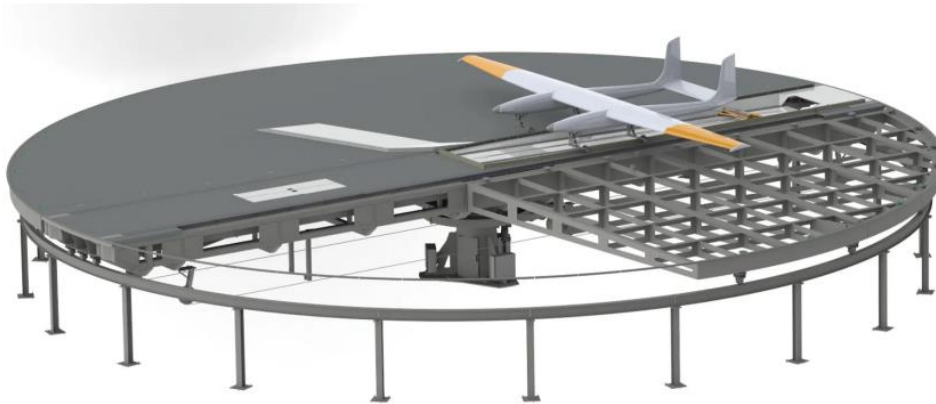
- Lineární horizontální vzlet a přistání

Myšlenkou tohoto přístupu je napodobit vzlet a přistání běžného letadla pomocí ranveje (se speciálními kolejnicemi). Aby se zmenšily rozměry platformy, používá se externí zdroj energie k rychlému urychlení létající jednotky.

První možnost pomocí katapultovací technologie se používá tehdy, pokud během stoupání není k dispozici žádný další zdroj energie. Všechnu potřebnou energii pro dosažení operační výšky tak musí letadlo mít ve formě kinetické energie už při startu. Vysokého zrychlení se dosahuje pomocí lineárního indukčního motoru.

Druhá, běžnější možnost využívá jednoho nebo dvou palubních vrtulí, které po počátečním zrychlení udržují rychlost během stoupání do pracovní výšky. Během fáze na zemi lano prochází sérií kladek, z nichž poslední je připevněna na saních pohybujících se po lineárních kolejnicích. Tyto saně jsou poháněny motorem, který poskytuje potřebnou akceleraci. Jednou ze společností využívajících tuto metodu je Ampyx Power – viz Obr. 1.20,

kde je vidět velmi kompaktní řešení. Platforma je navíc otočná (omnidirekcionální), aby se mohla zarovnat podle směru větru.



Obr. 1.20 Přistávací plošina s rotačním systémem firmy Ampyx Power [38].

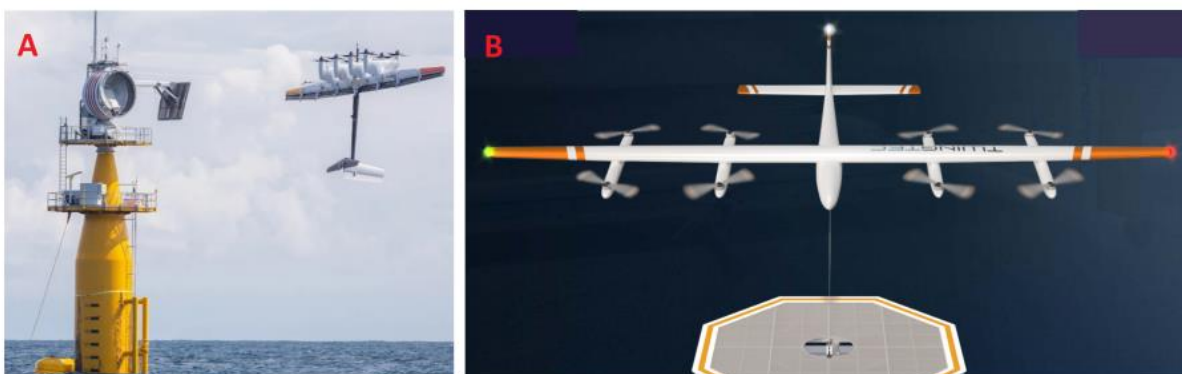
Pro přistání, v obou případech, je lano kontrolováno tak, aby pomáhalo letadlu zarovnat se s kolejnicemi. Rychlost přistání by měla být malá, ale mohou být potřeba brzdicí mechanismy [38].

- Lineární vertikální vzlet a přistání

U tohoto přístupu je letadlo vybaveno vrtulemi, které poskytují dostatečný tah k překonání jeho hmotnosti a umožňují mu vzlet vertikálně. Potřebná platforma zabírá jen tolik místa, kolik je velikost samotného letadla, podobně jako heliport. Vyžaduje tedy malou plochu pro umístění na zemi.

Vrtule mohou být uspořádány podobně jako u kvadrokoptéry, jak to dělají společnosti TwingTec a Kitemill (viz Obr. 1.21 vpravo), nebo podobně jako u klasického letadla, jak to dělají Makani Power a KiteKraft (viz Obr. 1.21 vlevo).

V druhém případě je třeba naklonit letadlo do svislé polohy, aby vrtule mohly pracovat; když je dosaženo operační výšky, začne fáze přechodu zpět do normální horizontální orientace. Tento přístup je využíván hlavně kvůli palubní výrobě energie, ale vyžaduje velmi spolehlivé řízení letu k zajištění stabilního vzletu. Ukázalo se, že tato varianta není příliš odolná vůči vysokým rychlostem větru. Navíc, pokud letadlo používá ocasní plochy, je potřeba pozemní stanici trochu vyvýšit.



Obr. 1.21 Vertikální vzlet draka společnosti Makani (vlevo) a TwingTec (vpravo) ([38], upraveno).

Pokud jsou vrtule uspořádány jako u kvadrokoptéry, pak v případě provozu v režimu *Fly-gen* musí být schopné náklonu, aby se obnovila orientace rovnoběžná s letadlem. Pokud jde o režim *Ground-gen*, vrtule se po vzletu vypínají a listy vrtulí se sklápějí, aby snižovaly aerodynamický odpor.

- Rotační vzlet a přistání

V tomto přístupu je trup letadla na začátku připevněn ke špičce otáčejícího se ramene. Úhel náklonu letadla v tomto bodě závisí na sklonu platformy. Rotace generuje aerodynamické síly a zároveň i odstředivou sílu, která odvíjí lano a uvádí letadlo do spirálové letové dráhy. Jakmile je dosaženo provozní výšky, rotace se postupně zastavuje. Pro usnadnění vzletu lze také použít naklápěcí platformu.

Při přistání se operace provádí opačně: lano se pomalu navíjí, dokud se letadlo nepřipojí zpět k rotujícímu ramenu. V současnosti tuto alternativu pro pevná křídla využívá pouze společnost EnerKite, zejména proto, že používají obtékané pevné křídlo, které je jednodušší uchytnit k rameni. Navíc, aby se během rotace zvýšil proud vzduchu kolem křídla a dosáhlo se vyšší startovní výšky, používají teleskopické rameno [38]. Tento projekt je dále rozveden v kapitole 4.2.3.

1.8.2 Přístup pro měkká křídla

U měkkých křídel lze strategie vzletu rozdělit na pasivní a aktivní přístupy.

Pasivní přístupy spoléhají pouze na rychlost větru na startovní platformě, která by měla generovat dostatečnou vztlakovou sílu pro start draků. Kvůli větrnému stříhu (wind shear) bývá ale rychlost větru u země obvykle nízká, a proto se využívají ramena nebo stožáry (někdy i rotující či teleskopické), které zvednou draky do vyšších hladin, kde je vítr dostatečný pro vzlet. Tuto strategii v současnosti využívají společnosti SkySails Power a KiteGen – viz kapitola 4.2.5. KiteGen, protože využívá LEI draky startující vzhůru nohama, může použít ventilátory na zemi, aby vytvořily proudění vzduchu potřebné k jejich zvednutí. Přistání se v tomto případě provádí jednoduchým navíjením lana s minimální spotřebou energie.

Aktivní přístupy byly navrženy, ale dosud nebyly realizovány, hlavně proto, že přinášejí další hmotnost na palubě, vyšší spotřebu energie nebo zvýšené náklady, což se zatím nejeví jako výhodné. Jednou z navržených možností je použití vrtulí na řídicí jednotce, které by generovaly dostatečný tah na dopravení draků do výšky s dostatečnou rychlostí větru. Nevýhodou této metody (kromě zmíněné vyšší hmotnosti a spotřeby) je, že proud vzduchu z vrtule (downwash) vyvolává na drak opačnou vztlakovou sílu, kterou by bylo potřeba překonat.

Další navrhovanou možností je použití aerostatu (balónu plněného plynem lehčím než vzduch), který by pomocí vztlaku vynesl draka do operační výšky [38].

1.8.3 Použití věže pro vzlet

Použití věže v AWE je věnována kapitola 3.5. Zde jsou rozebrány pouze metody vypouštění draků ze stožárů.

Lineární horizontální vzlet: Umožnil by nakloněnou vzletovou dráhu, což by vedlo k výrazně vzesupnému vzletu. Při přistání by odpadla potřeba brzdících systémů, protože by bylo možné přeměnit kinetickou energii na potenciální energii překonáním sklonu (přistávání ve spodní části).

Lineární vertikální vzlet: V případě, jako je Makani, by bylo možné snadněji používat delší ocasní plochy a eliminovat potřebu naklápěcích vrtulí; pro systémy jako TwingTec by bylo možné na vrcholu věže umístit heliport.

Rotační vzlet: Věž by umožnila snadnější uchycení letadla, protože by byly možné rolovací úhly až 90°.

Vzlet měkkých křídel: Pasivní vzlety by byly ještě výhodnější možností, protože vyvýšené místo by draky vystavilo silnějším větrům [38].

1.9 Větrné farmy

Seskupování jednotek do velkých větrných farem, podobně jako u konvenčních větrných turbín, je předmětem zájmu.

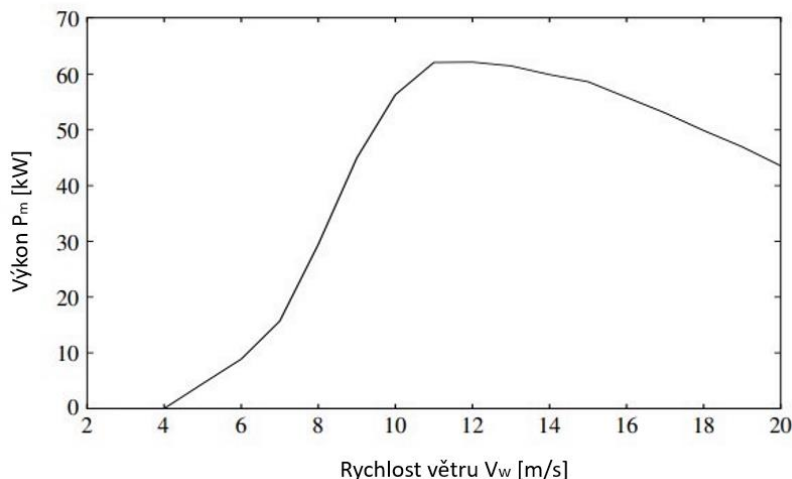
Ačkoliv obtékaná plocha je větší než u klasických turbín, vliv vírů (wake effect) jednotlivých jednotek je zanedbatelný – díky tomu je možné výrazně zmenšit rozestupy mezi jednotkami, což zvyšuje výkon na plochu.

Díky koordinované kolektivní operaci (včetně řízení vyhýbání se kolizím a propojení mezi jednotkami) se dosáhne kontinuální výroby elektřiny a snížených nákladů na vyrobenou jednotku energie. Integrace AWE jednotek do stávajících větrných parků může být také ekonomicky výhodná. Jedním z kritérií pro návrh optimální farmy AWE může být maximalizace vyrobené energie. Jak se však farma zvětšuje, výkon může vykazovat větší fluktuace, protože jednotlivé jednotky budou vystaveny různým podmínkám, a tedy generovat různé množství energie. Tyto fluktuace jsou překážkou masového zapojení AWE do rozvodné sítě. Lze je zmírnit průměrováním výkonu celé farmy, což ale vede k malým ztrátám výkonu, zejména u systémů s *pumping cycle*.

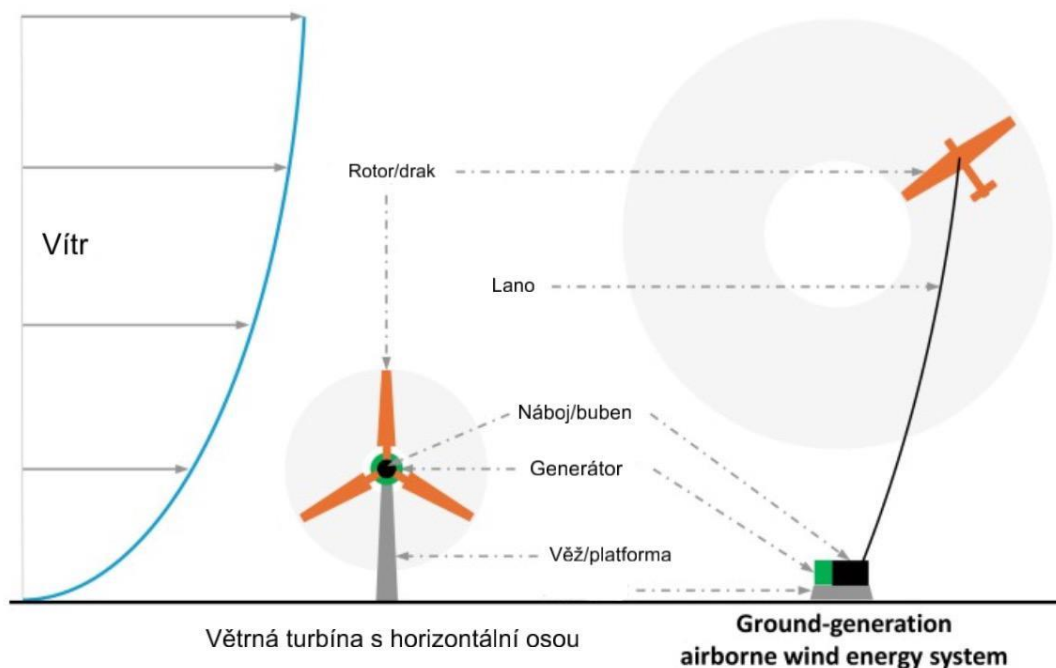
Uvažuje se i o škálování jednoho systému – to je výhodné pouze tehdy, pokud se hmotnost na plochu udržuje konstantní. Jinak je výhodnější postavit více menších jednotek. Farma složená z velkého počtu malých jednotek je odolnější vůči poruchám (ztráta jedné jednotky znamená jen malé snížení výkonu) a také vůči nepředvídatelným vlivům prostředí. Nevýhodou je ovšem zvýšená náročnost instalace [38].

1.10 Porovnání konvenčních větrných elektráren oproti létajícím

Když vítr zesiluje, systém AWE zpočátku vyrábí stále více energie, ale jen do určitého bodu. Poté výkon začne klesat, což je jiné než u běžných větrných turbín, které zpravidla pokračují ve zvyšování výkonu až do svého maxima. Tento pokles u AWE systémů nastává proto, že s rostoucí rychlostí větru je potřeba více energie na navíjení lana zpět – tah je větší, a tedy i spotřeba energie roste. Zároveň už není možné dál zvyšovat množství energie vyrobené během odvíjecí fáze, protože systém naráží na fyzická omezení, například maximální sílu, kterou lano snese. Výsledkem je, že celkový čistý výkon začne při vyšších rychlostech větru klesat. [23].

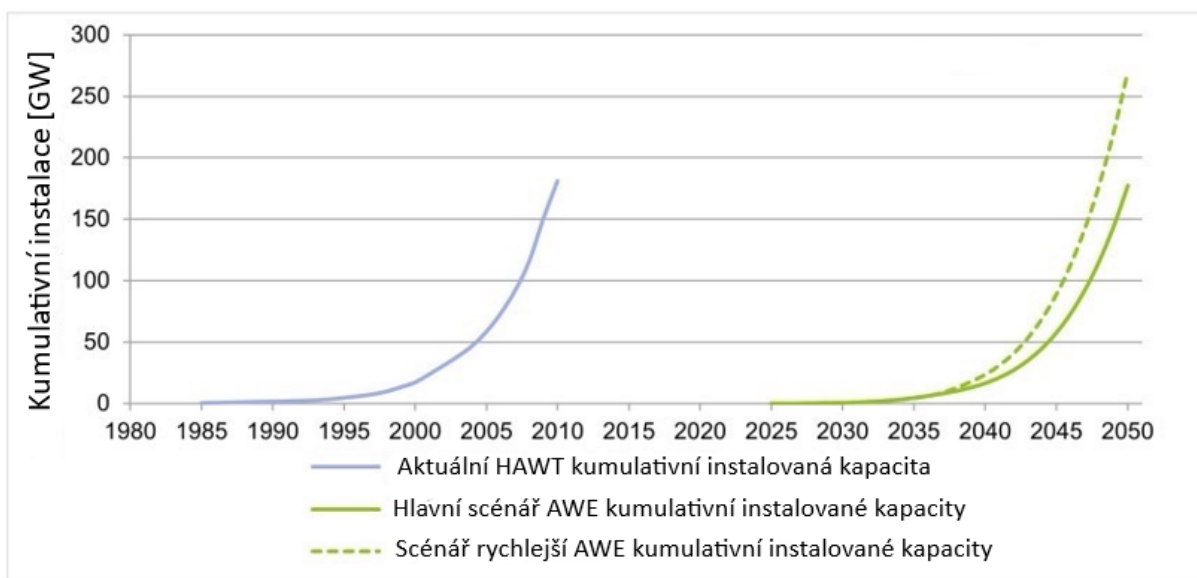


Obr. 1.22 Výkonová křivka systému draka na rychlosti větru ([23], upraveno).



Obr. 1.23 Analogie mezi součástmi větrné turbíny s horizontální osou a AWE ([18], upraveno).

Porovnání konvenční větrné turbíny s AWE systémem ukazuje Obr. 1.23, že je vidět analogie mezi oběma systémy s tím, že AWE létá v mnohem větší nadmořské výšce, a využívá tak vyšší rychlosti větru.



Obr. 1.24 Scénář kumulativní globální instalované kapacity AWE sleduje vývoj trhu se zavedenými větrnými turbínami, podobně jako tomu bylo u konvenčních větrných turbín (HAWT) v letech 1985 až 2010 ([34], upraveno).

U grafu na Obr. 1.24 je názorně ukázáno, jak systémy AWE budou v budoucnu kopírovat křivku nárůstu konvenčních větrných turbín. Graf představuje dva scénáře, jeden hlavní, pomalejší a druhý rychlejší, který téměř kopíruje křivku HAWT.

1.10.1 Zadání studie

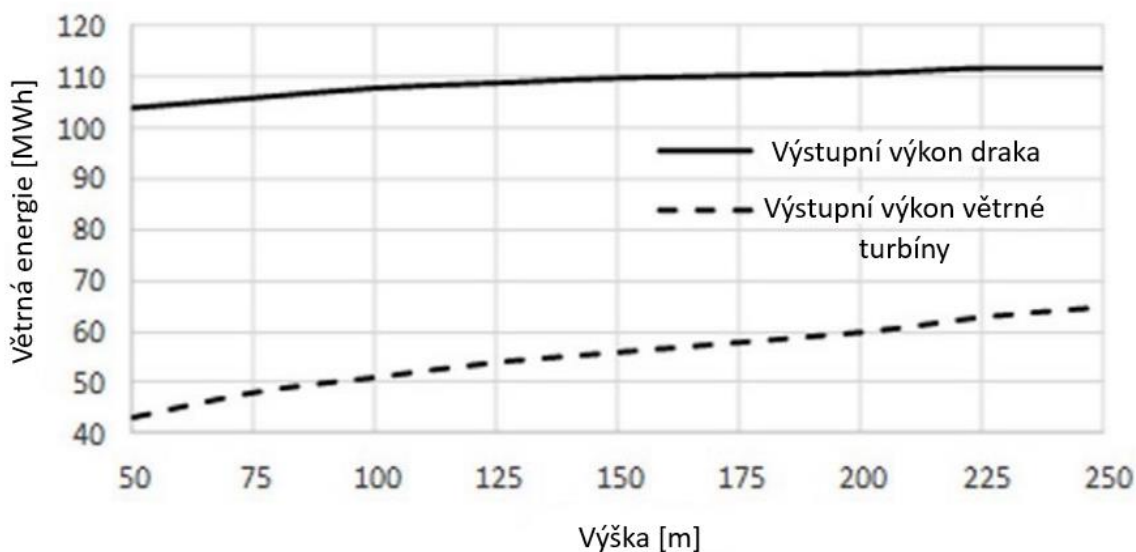
Toto srovnání vychází ze studie [20] realizované ve Skotsku, která se zaměřuje na analýzu výkonu větrných energetických systémů. Metodický přístup výzkumu je zaměřen na odhad roční produkce elektrické energie generované drakem a tradiční větrnou turbínou, přičemž klíčovou otázkou je vliv nadmořské výšky na výkon těchto systémů.

Za účelem dosažení tohoto cíle byl zvolen realistický přístup zahrnující výpočet ročního hodinového profilu větru pro konkrétní lokalitu. Tento profil byl následně využit jako vstupní parametr pro modely jako *Ground-gen*, tak *On-board* systému. Výsledky získané z větrného modelu sloužily k výpočtu výkonu generátorů. Dále bylo zajištěno, že oba analyzované systémy operují s obdobnou využitelnou plochou větru. Jmenovité výkony generátorů i provozní výšky obou systémů byly stanoveny tak, aby si byly co nejvíce podobné [20].

1.10.2 Metodika studie

Použitím analytického modelu se provedla studie o roční produkci energie systému draka na pěti různých místech ve Skotsku s využitím údajů o průměrné rychlosti větru od CIBSE. K přesnému odhadu roční výroby energie jak pro systém s drakem, tak pro tradiční větrnou turbínu byly využity meteorologické údaje ze softwaru Energy Plus Simulation Software. Tento software poskytl hodinové hodnoty rychlosti a směru větru pro oblast Aberdeenu za období 1982–1994.

Simulační modely umožnily predikovat hodinovou kumulativní frekvenci jednotlivých rychlostí větru a analyzovat změny profilu rychlosti větru v závislosti na nadmořské výšce, orientaci a charakteru terénu Obr. 1.25.



Obr. 1.25 Porovnání výkonů větrného draku a konvenční větrné elektrárny v různých nadmořských výškách ([20], upraveno).

Při vývoji větrného modelu byla primárně zkoumána výška rotoru větrné turbíny či letová výška draka, které ovlivňují jak rychlost, tak směr větru. Klíčovým faktorem v tomto procesu je také koeficient tření, jenž se mění v závislosti na typu terénu, a proto jej bylo nutné zohlednit při analýze.

Pro efektivní stanovení výkonu generátoru u drakového systému i větrné turbíny byla využita databáze Wind Power Program, obsahující širokou škálu výkonových křivek větrných elektráren. S cílem zajistit objektivní porovnání roční produkce energie v různých větrných

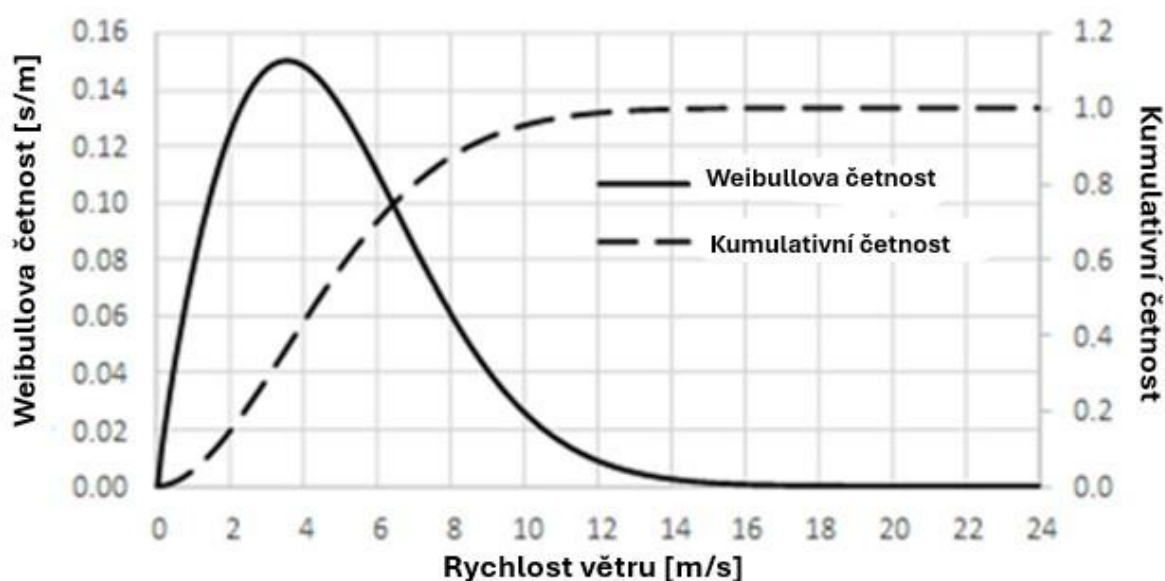
podmínkách byly vybírány generátory s obdobnými jmenovitými výkony kolem 30 kW a shodnými průřezy větrného odběru o velikosti přibližně 80 m².

Při velmi nízkých rychlostech větru není točivý moment působící na lopatky turbíny dostatečný k jejich roztočení a následné výrobě elektrické energie. Rychlost větru, při které dochází k uvedení lopatek do pohybu a zahájení výroby elektřiny, se označuje jako cut-in speed (rychlost zapnutí). Se zvyšující se rychlostí větru zároveň rostou síly působící na konstrukci turbíny, což může vést k jejímu poškození. Z tohoto důvodu je při dosažení určité maximální rychlosti větru, známé jako cut-out speed (rychlost zastavení), rotor zastaven pomocí brzdného systému, aby se předešlo jeho poškození.

Obecně se rychlosti cut-in a cut-out u větrných turbín pohybují v rozmezí 3,5–24 m/s. Oproti tomu větrné draky disponují aerodynamickou konstrukcí, která umožňuje jejich provoz ve výrazně širším rozsahu rychlostí větru, a to 1–45 m/s. Díky těmto rozdílům lze volit generátory odpovídající specifickým větrným charakteristikám každého systému, což umožňuje optimalizaci jejich výkonu v různých podmínkách [20].

Tab. 1.1 Porovnání konvenční větrné elektrárny a větrného draka o stejném výkonu [20].

	Joliet cyclone 30 kW větrná turbína	Fortis Montana 30 kW AWE
Cut-out speed [m/s]	24	45
Cut-in speed [m/s]	2,5	1,5
Plocha [m ²]	78,5	80
Průměr rotoru [m]	10	N/A



Obr. 1.26 Weibullovo a kumulativní rozdělení četností větru v lokalitě Aberdeen ve Skotsku ([20], upraveno).

Rychlost větru získaná z meteorologických dat softwaru Energy Plus Simulation Software byla analyzována pomocí funkce Weibullova rozdělení a Hellmannova mocninného zákona s cílem vytvořit model profilu rychlosti větru. Tento analyzovaný profil byl následně dosazen do rovnic pro predikci výkonu, což umožnilo stanovit generovaný výkon jak pro systém draka, tak pro větrnou turbínu.

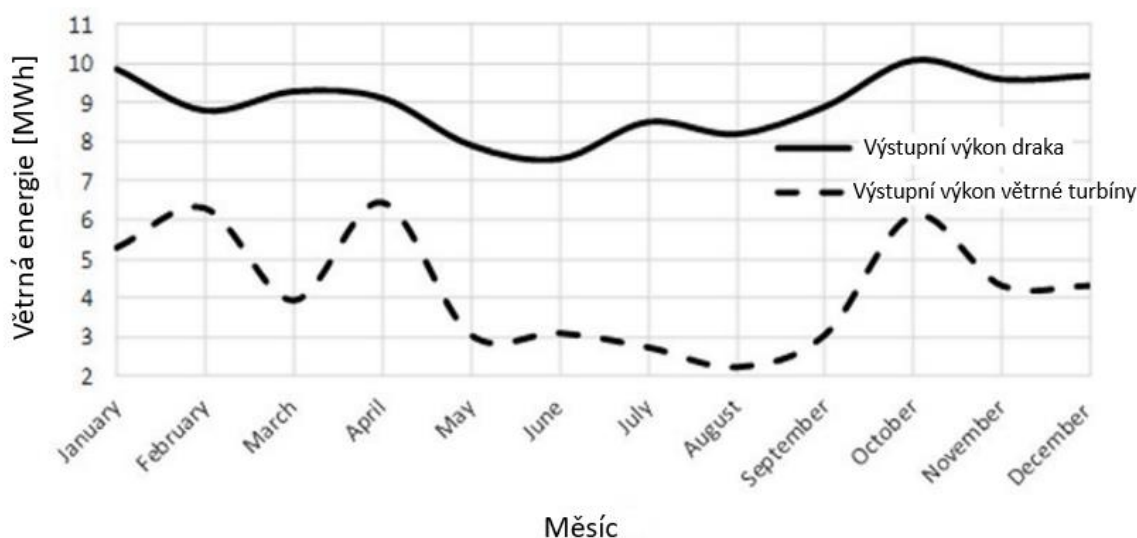
Weibullovo rozdělení bylo využito k transformaci hodinových údajů o větru na rozdělení četností, což umožnilo podrobné zkoumání a měření větrného potenciálu v oblasti Aberdeenu ve Skotsku. Výsledky analýzy ukázaly, že průměrná rychlost větru činí 4,8 m/s, zatímco nejpravděpodobnější hodnota dosahuje 3,52 m/s.

Jak je patrné z Obr. 1.26, přibližně 60 % času během roku se rychlost větru pohybuje v rozmezí 2,2–6,5 m/s, což má zásadní vliv na efektivitu výroby elektrické energie z těchto systémů [20].

1.10.3 Výsledek studie

Výsledky této studie ukázaly, že větrný drak produkuje ročně dvojnásobek energie ve srovnání s konvenční větrnou turbínou. Největší rozdíl v energetické produkci mezi oběma systémy je zaznamenán v srpnu. Dále bylo zjištěno, že výroba energie obou systémů roste s výškou instalace. Tento jev je způsoben charakteristikami *cut-in* a *cut-out*, které jsou u větrných turbín výrazně omezené, zatímco konstrukce aerodynamického draka umožňuje vyšší produkci energie při nižších i vyšších rychlostech větru.

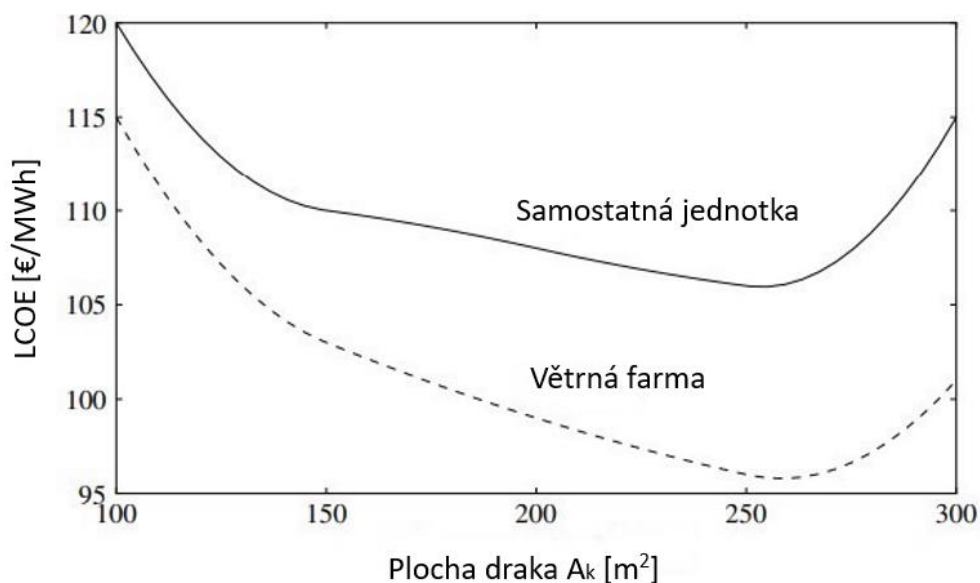
Závěrem lze konstatovat, že při porovnání roční produkce energie mezi systémem s drakem a tradiční větrnou turbínou se systém s drakem ukazuje jako výhodnější [20]. Tento výsledek naznačuje, že technologie založené na obnovitelných dracích mají větší potenciál pro výrobu energie než starší technologie větrných turbín. Získané výsledky zdůrazňují, že systémy AWE mohou být konkurenceschopné a že v rámci Spojeného království existuje vysoký potenciál pro využití AWE. Co se týče odhadované nákladové efektivity kompletního systému AWE, do poloviny roku 2030 by měla být dosažena průměrná cena nižší než u tradičních větrných turbín.



Obr. 1.27 Srovnání měsíčních výkonů větrného draka a konvenční větrné elektrárny ([20], upraveno).

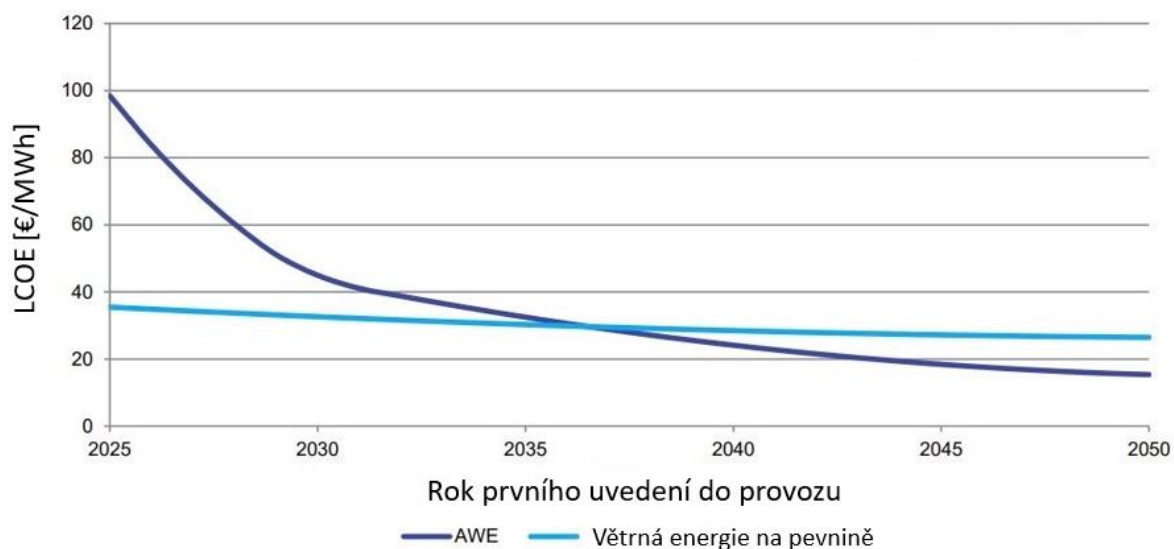
1.11 Ekonomika

Analýza citlivosti ukazuje silný vliv zatížení křídla a plochy křídla na LCOE. Zvýšení zatížení křídla rovněž zvyšuje roční výrobu energie, čímž snižuje LCOE. Maximální zatížení křídla je konstrukční parametr, který závisí na materiálových vlastnostech a specifickém návrhu draka, včetně jeho systému vedení. Jak je znázorněno na Obr. 1.28, zvýšení velikosti křídla má stejný efekt, dokud vyšší cena větších draků nepřeváží zisk v oblasti výroby energie. Na základě grafu na Obr. 1.28 je optimální velikost křídla přibližně 250 m².



Obr. 1.28 Levelizované náklady na energii jako funkce celkové plochy křídla na jednotku ([23], upraveno).

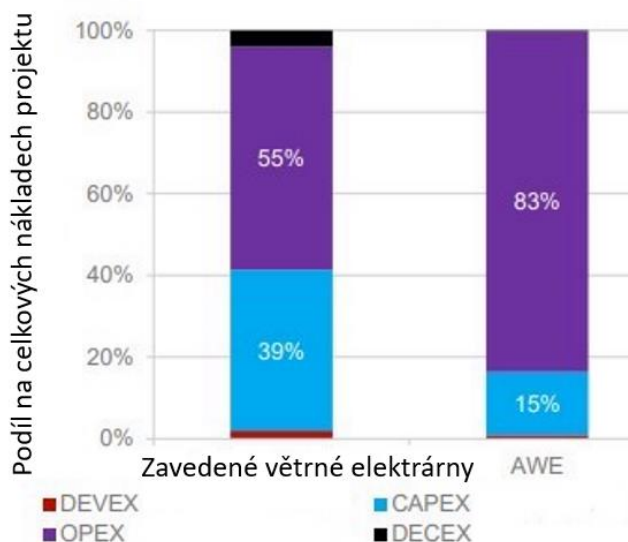
V současnosti jsou náklady na výrobu energie u systémů AWE vyšší než u tradičních větrných turbín. S rostoucími veřejnými investicemi do technologie AWE se však očekává, že tyto systémy budou postupně konkurenceschopnější, přičemž do poloviny 30. let 21. století by měly dosáhnout nižší průměrné ceny než tradiční větrné turbíny. Počáteční náklady na systémy AWE jsou podstatně nižší než u tradičních větrných turbín, neboť představují pouze 15 % celkových diskontovaných nákladů projektu, zatímco u tradičních turbín je tento podíl 40 %. Naopak, provozní náklady u systémů AWE mají podle odhadů vyšší podíl na celkových nákladech než u tradičních turbín, a to díky vyšším ročním provozním nákladům, které činí 3–20 % investičních nákladů, oproti 2–3 % u tradičních větrných turbín [20].



Obr. 1.29 Trend průměrné LCOE pro AWE a technologii větrných turbín na pevnině ([1], upraveno).

Z Obr. 1.29, lze vyčíst, že se LCOE bude postupně snižovat. Jak studie hovoří, je možné 40% snížení LCOE pro AWE, protože hmotnostní a materiálové náklady na AWE jsou již nyní

o 70 % nižší než zavedené větrné technologie pro projekty vyrábějící stejné množství energie. Významná část budoucího vývoje je zaměřena na technologie související s drony, UAS a nízkouhlíkovou leteckou dopravou, které mají mnoho společných synergií s průmyslovými odvětvími budoucnosti [1].



Obr. 1.30 Indikativní podíl celkových nákladů projektu pro reprezentativní systémy AWE a etablovanou větrnou technologii nainstalovanou v roce 2025 ([1], upraveno).

Ve srovnání s etablovanou větrnou technologií jsou počáteční náklady pro systémy AWE výrazně nižší, přičemž CAPEX tvoří 15 % celkových diskontovaných nákladů projektu, zatímco u etablovaných větrných projektů je to přibližně 40 %. Obr. 1.30 ukazuje rozdělení výdajů na vývoj (DEVEX), kapitálových výdajů (CAPEX), provozních výdajů (OPEX) a výdajů na dekomisaci (DECEX) pro etablovanou větrnou technologii a AWE. Provozní náklady u projektů AWE představují větší podíl celkových nákladů projektu, což je dáno plánovanou výměnou komponent [1].

- Levelizované náklady

Levelizované náklady na energii (LCOE) jsou ekonomickým ukazatelem, který slouží k určení celkových nákladů na výrobu jedné jednotky energie (například 1 MWh) během životního cyklu energetického zařízení. LCOE zohledňuje všechny náklady spojené s výstavbou, provozem a údržbou zařízení během jeho životnosti. Tyto náklady jsou pak rozděleny na množství energie, kterou zařízení vyprodukuje během této doby. Výsledkem je cena za jednu jednotku energie, která může být použita k porovnání různých energetických technologií nebo projektů. Tento ukazatel je užitečný pro srovnání různých způsobů výroby energie, protože zohledňuje jak výnosy, tak i náklady v průběhu celé doby životnosti energetického zařízení.

$$LCOE = \frac{ICC \cdot CRF + OMC}{AEP} \quad [€/MWh] \quad (1.8)$$

ICC počáteční kapitálové náklady [€]

OMC roční náklady na provoz a údržbu [€/rok]

AEP roční výroba energie [MWh/rok]

CRF faktor návratnosti kapitálu [1]

CRF je funkcí diskontní sazby i a počtu let provozu n :

$$CRF = \frac{i(1+i)^{ny}}{(1+i)^{ny} - 1} \quad [1] \quad (1.9)$$

[56].

1.12 Potenciál AWE ve světě

Pro identifikaci oblastí na světě, kde by mohla být technologie AWE nejkonkurenceschopnější, byla provedena prostorová analýza v článku [1] pro pevninské oblasti. Cílem bylo zjistit, jak si AWE povede ve srovnání s jinými zdroji výroby elektřiny (tradiční větrné elektrárny, solární fotovoltaika a diesellové generátory) v letech 2030 až 2050. Aby bylo možné technologie spravedlivě porovnat, byla u všech variant stanovena velikost projektu na 500 kW.

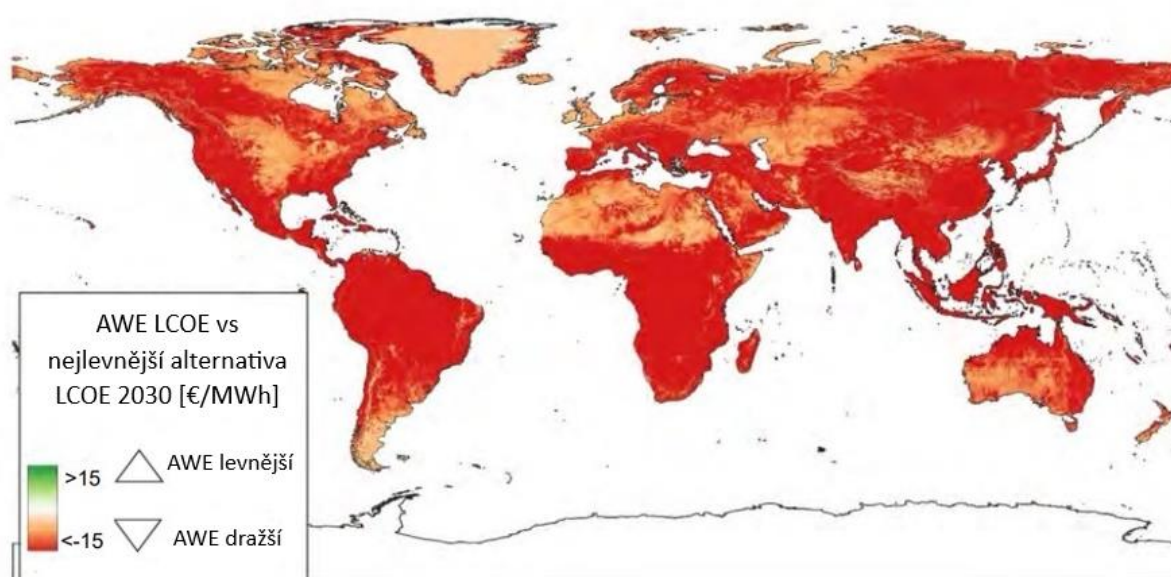
Tato analýza rozdělila veškeré pevninské lokality na celém světě do čtverců o velikosti 10 km × 10 km. Pro každou lokalitu a technologii byla modelována výroba energie. Tato výroba byla následně kombinována s kapitálovými a provozními náklady pro každý typ technologie v letech 2030 a 2050, což umožnilo vypočítat LCOE pro každou technologii a každý rok.

Na základě prostorové analýzy technologických scénářů byly porovnány náklady systémů AWE s nejlevnější alternativní výrobní technologií v letech 2030 a 2050, přičemž se uvažovala solární fotovoltaika, zavedené větrné technologie a diesellové generátory. Výsledky těchto srovnávacích analýz jsou uvedeny na Obr. 1.31 a Obr. 1.33.

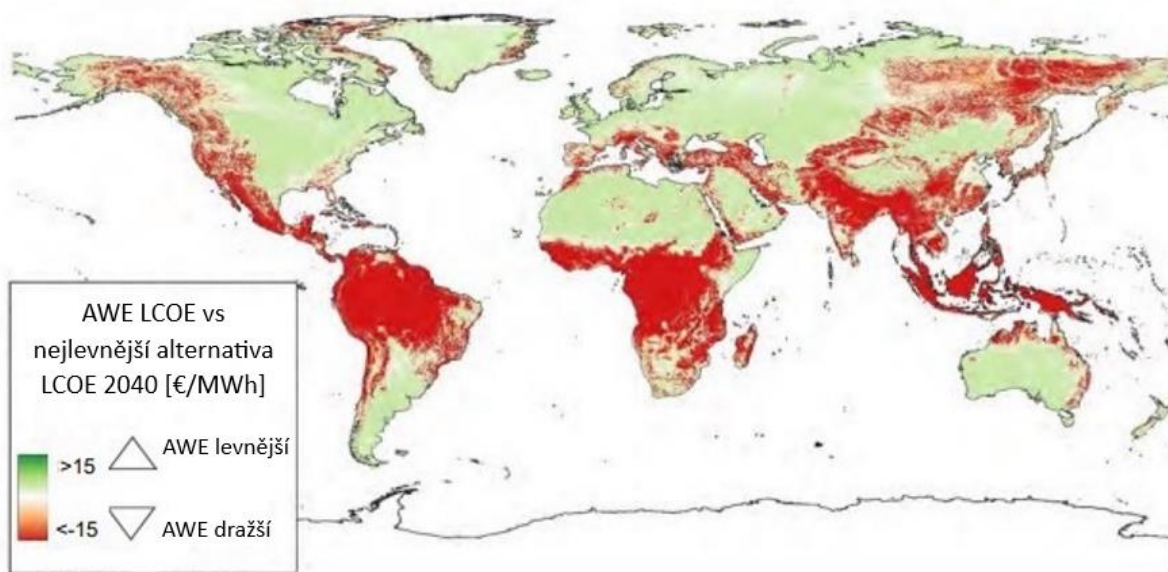
Výsledky prostorové analýzy uvedené na Obr. 1.31 pro rok 2030 ukazují, že technologie AWE je nejlevnější v několika oblastech Grónska a Chile a je mírně konkurenceschopná (světle červené oblasti) v některých částech severní Afriky, Asie, Jižní Ameriky a Austrálie.

Do roku 2050 se srovnání nákladů výrazně mění, jak je znázorněno na Obr. 1.33. AWE se stává nejlevnějším zdrojem energie pro více než polovinu pevninské plochy, včetně rozsáhlých částí severní Afriky, Asie, Jižní Ameriky a Austrálie. AWE se posouvá z nízko konkurenceschopného zdroje energie (oranžové až tmavě červené) na výrazně levnější formu výroby energie (zelené oblasti) a stává se nejlevnějším zdrojem výroby elektřiny na více než 60 % pevninské plochy.

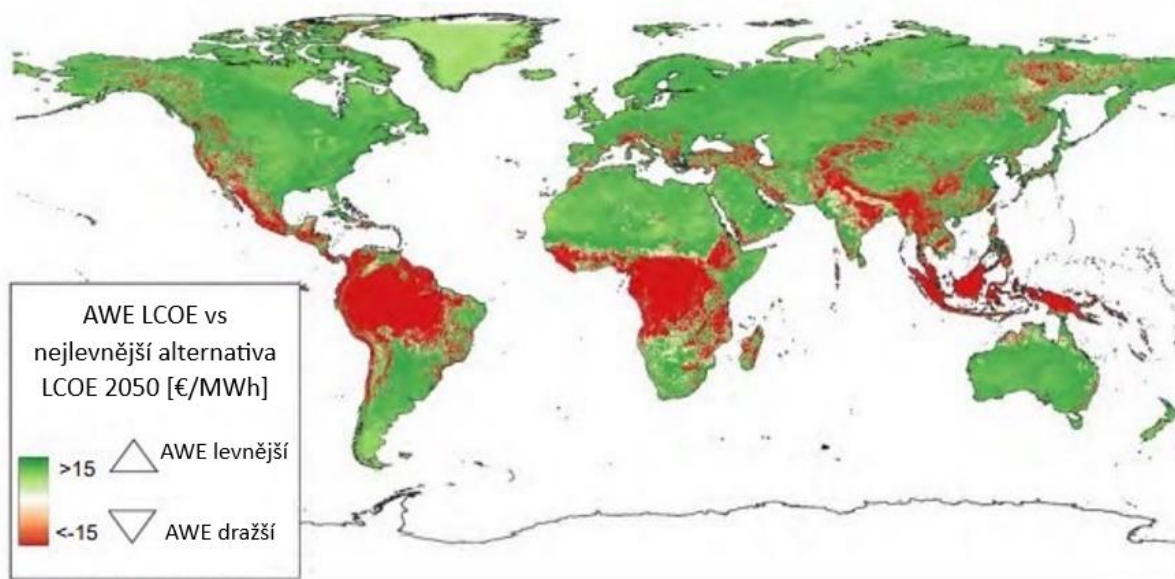
Analýza ukazuje, že severní Evropa a centrální část Severní Ameriky mohou být klíčovými trhy pro rozsáhlé nasazení AWE do roku 2040 (Obr. 1.32) [1].



Obr. 1.31 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2040 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).



Obr. 1.32 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2040 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).



Obr. 1.33 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2050 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).

2 Lokality vhodné pro umístění větrných draků

2.1 Výkon větru

Pro efektivní využití síly větru je nezbytné znát zdroje větrné energie a množství energie, které tyto zdroje poskytují. Výkon větru závisí na hustotě pohybujícího se vzduchu (ρ), ploše (A) a rychlosti větru (V). Výkon větru (P_{wind}) lze vyjádřit následujícím vzorcem

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Z této rovnice je patrné, že výkon větru je ovlivněn jak rychlostí, tak hustotou větru. Při porovnávání výkonu větru na zemi a ve větších výškách je nutné vzít v úvahu dva faktory: 1) rychlost větru s rostoucí výškou obvykle stoupá a 2) hustota vzduchu s výškou klesá. Jelikož výkon je funkcí kubické rychlosti větru, je pro zvýšení vyráběného výkonu klíčové dosáhnout vyšší rychlosti větru.

AWE je definována jako větrná energie generovaná ve výškách, kde tradiční pozemní větrné turbíny dosahují výšky obvykle mezi 100 a 150 m. Technologie AWE se uvažuje ve výškách od 150 m do přibližně 16 km.

Meteorologická data ukazují, že hustota vzduchu klesá s rostoucí teplotou a nadmořskou výškou. Hustota vzduchu se mění z 1,225 kg/m³ na úrovni moře na 0,413 kg/m³ ve výšce 10 km. Z toho vyplývá, že energie vyrobená při určité rychlosti větru na úrovni moře by byla třikrát větší než energie vyrobená stejnou větrnou turbínou umístěnou ve výšce 10 km. Změna hustoty vzduchu s výškou je přibližně lineární, přičemž hustota ve výšce 1 km je 1,112 kg/m³, což je o 9,2 % méně než hustota na úrovni moře. Vzhledem k průměrné roční teplotě má sezonní změna teploty zanedbatelný vliv na dostupnost větrné energie [20].

2.2 Vliv výšky na rychlosti větru

Hlavní rozdíl při používání hodinových větrných databází pro systémy AWE oproti běžným větrným turbínám spočívá v tom, že systémy AWE neustále mění svou operační výšku, zatímco běžná větrná turbína má pevnou výšku rotoru. Při výpočtu faktoru využití kapacity pro běžné větrné turbíny se větrná rychlost v dané výšce náboje považuje za průměrnou větrnou rychlost pro celou plochu vrtule turbíny. U AWE musí větrná rychlost odpovídat operační výšce v daném okamžiku, aby se zajistilo přesné přiblížení faktoru využití kapacity v tomto přesném okamžiku [36].

2.3 Terén

Tato doporučení platí pro systém od společnosti SkySails Power. Pro optimální výkon je vhodné mít rovinný terén jak v oblasti samotné instalace, tak i v okolí. To pomáhá minimalizovat překážky, které by mohly ovlivnit směr nebo sílu větru.

V okolí o poloměru 850 m od základny draka by neměly být žádné vysoké stromy nebo jiné překážky ve směru převládajícího větru, ani za oblastí provozu, protože by mohly narušovat stabilitu větrného toku, a tím i výkon systému. Nejvhodnější jsou oblasti s nízkým nebo žádným lidským osídlením, například zemědělské oblasti nebo nevyužívané pozemky, které nebudou rušit provoz zařízení. Provoz by neměl probíhat v oblastech, které jsou blízko letišť nebo jiných zón s omezeným vzdušným prostorem, kde by to mohlo ohrozit letadla nebo jiný vzdušný provoz [53].

2.4 Podmínky pro provoz

Systémy AWE musí být regulovány pro úspěšné komerční zavedení a širokou veřejnou akceptaci. V konečném důsledku se očekává, že systémy AWE budou větší a těžší než současné prototypy. Měly by fungovat v třídě G vzdušného prostoru, kde je možné, že dojde k interakci s jinými uživateli vzdušného prostoru. Navíc systémy AWE představují riziko pro osoby na zemi. Proto se očekává, že komerční systémy AWE budou muset splňovat mezinárodní předpisy pro vzdušný prostor.

Třída G je vzdušný prostor, který je obvykle poblíž země. To je obvykle do výšky 1200 stop (366 m) nad zemí. Nicméně třída G může být omezena na 700 stop (215 m) AGL, pokud se poblíž nachází letiště, což vyžaduje třídu B ve své blízkosti. Třída G je známá jako neřízený vzdušný prostor. Pro vstup do třídy G není vyžadováno žádné specifické vybavení letadla nebo specifikace pilota. Navíc není vyžadováno žádné spojení s ATC pro let ve třídě G. Přestože je třída G neřízená, pravidla civilního letectví stále platí. Pro lety ve třídě G platí požadavky na dohlednost a průhlednost mraků a většina letů se provádí podle pravidel letu za viditelnosti, což znamená, že rozstupy jsou založeny na zásadě „vidět a vyhnout se“.

Regulační rámec pro systémy AWE je zatím v počáteční fázi. Současné prototypy fungují na základě speciálních povolení. Tato provozní povolení vydávají místní letecké úřady. Registrace prototypu jako překážky pro letecký provoz nebo bezpilotního letadla (UAV) je hlavní přístup, který používají společnosti AWE a akademické výzkumné skupiny. Klasifikace systémů AWE jako UAV je kontroverzní téma: na jedné straně současný názor EASA uznává připevněná bezpilotní letadla jako UAV, na druhé straně FAA vylučuje připevněná letadla z kategorie UAV.

Soubor předpisů specifických pro systémy AWE bude postupně budován na základě specificky vyjednávaných případů prvních uživatelů. Dokud taková regulace nebude na místě, bude nutné vybrat nejvhodnější stávající certifikační specifikace a standardy ve spolupráci s příslušnými úřady a případně je přizpůsobit.

Nakonec by pracovníci AWE měli přijmout společnou odpovědnost za prevenci incidentů, které by mohly zasahovat do jiných uživatelů vzdušného prostoru, lidí na zemi nebo kritické infrastruktury. Takový incident, pokud by nebyl zajištěn správný preventivní nebo zmírňující přístup, by mohl celou AWE průmyslovou oblast postavit pod nejprísnejší letecké předpisy, což by ohrozilo její komerční životaschopnost a konečný úspěch [38].

2.4.1 Prostorová omezení větrných farem

Aby bylo možné AWE systémy integrovat do energetického systému ve velkém měřítku, budou muset být rozmístěny podobně jako konvenční větrné turbíny, tedy ve formě větrných farem. Jedním z klíčových faktorů při rozmístění AWE systémů je bezpečnostní odstup mezi jednotlivými zařízeními. Velmi konzervativní přístup by vyžadoval ponechání celého kruhu o poloměru rovném délce lana kolem každého AWE systému. Příklad požadavků na půdu při tomto uspořádání je znázorněn na Obr. 2.1. V uvedeném příkladu je navíc zahrnuta bezpečnostní rezerva.

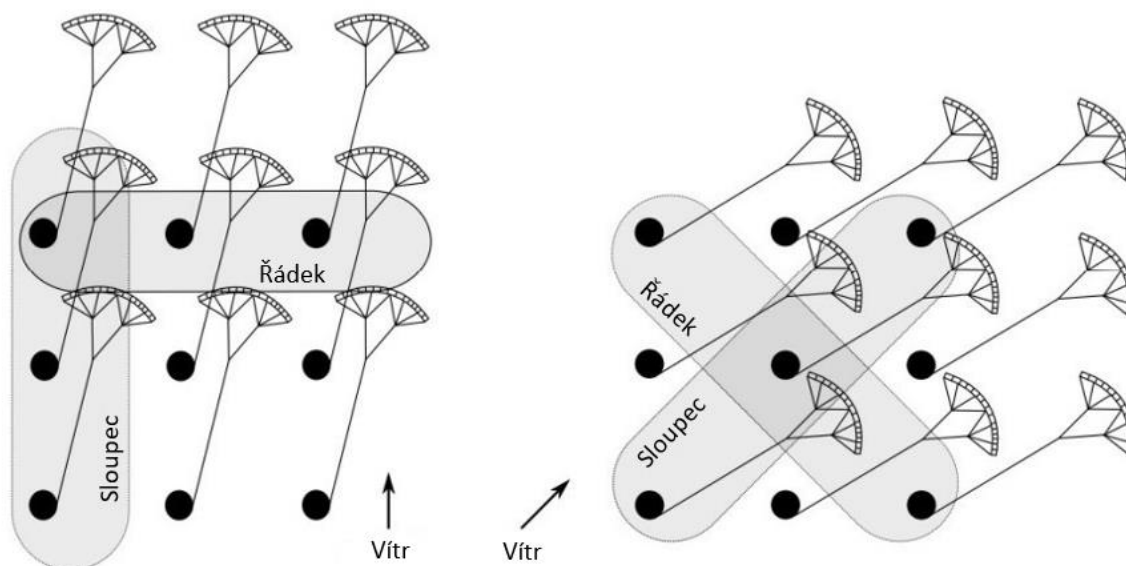
V praxi však vítr nemění směr v celém prostoru větrné farmy. Proto se studují možnosti zvyšování hustoty rozmístění AWE systémů. Reálnější přístup by spočíval v ponechání pouze jedné délky lana jako odstupů mezi jednotlivými systémy. Jelikož vzdušné jednotky budou teoreticky vždy směřovat stejným směrem, je v tomto uspořádání stále dostatek prostoru, aby se dvě sousední jednotky nikdy nesrazily.



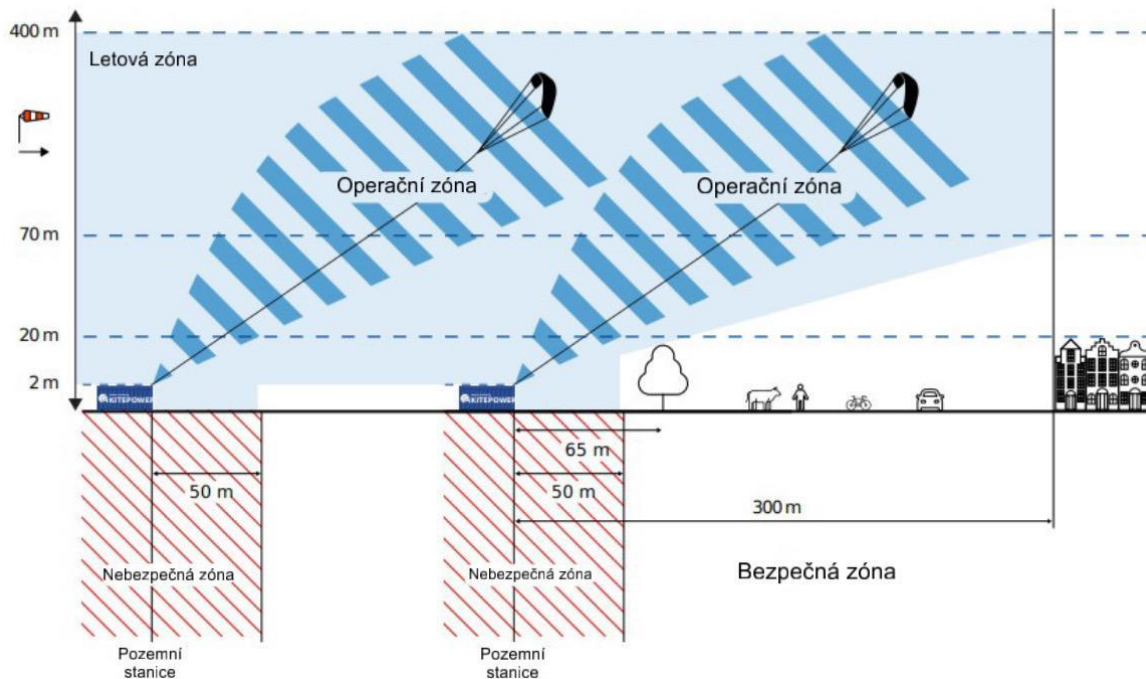
Obr. 2.1 3D vizualizace provozní oblasti systému AWE. V tomto případě je R délka lana (800 m) a je zohledněna bezpečnostní vzdálenost 50 m ([1], upraveno).

Zvýšení hustoty nad $1/L^2$ je předmětem probíhajícího výzkumu. Mezi hlavní omezení patří: Limity letové dráhy ukotvených zařízení → Maximální a minimální letový úhel. Optimalizace řízení → Možnost synchronizovaného provozu více zařízení. Bezpečnostní mechanismy → Například rychlé navinutí lana při překročení provozních limitů.

Teoreticky by to znamenalo, že pozemní stanice by mohly být umístěny blíže k sobě, což by vedlo k vyšší hustotě rozmístění AWE systémů. Různé studie uvádějí různé limity hustoty rozmístění, buď $1,2/L^2$ nebo $3/L^2$. Příklad možného rozložení větrné farmy s vysokou hustotou je zobrazen na Obr. 2.2 [36].



Obr. 2.2 Uspořádání systému pro hustotu vyšší než $1/L^2$ pro horizontální a diagonální proudění větru ([36], upraveno).

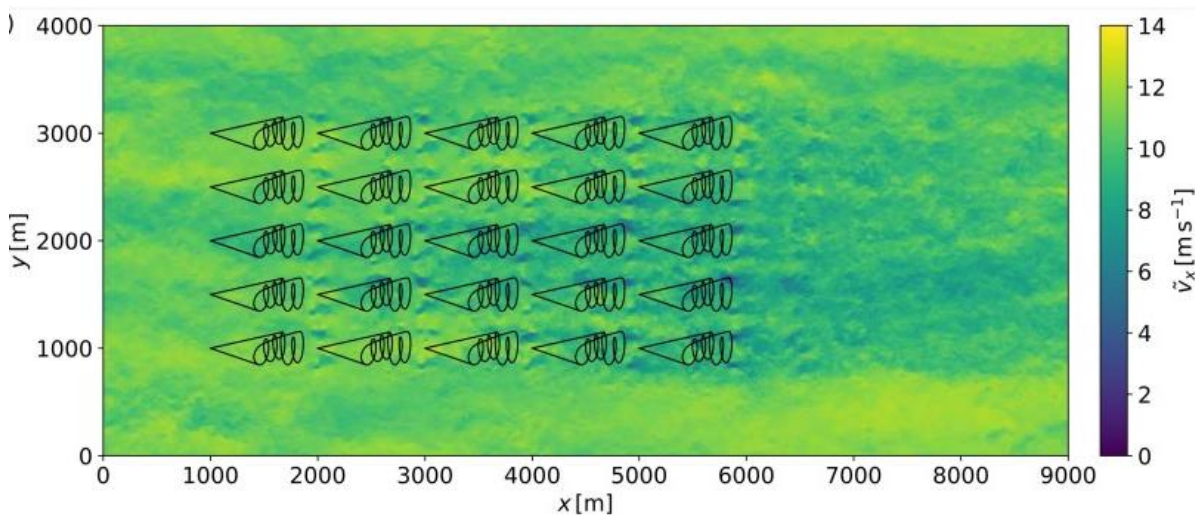


Obr. 2.3 Schematické znázornění letové oblasti draka ([58], upraveno).

2.4.2 Turbulence a ovlivnění proudění vzduchu za větrnými farmami

Je nutné brát v úvahu účinky vírových efektů (wake). Do současnosti nebyly provedeny fyzické testy s více AWE systémy současně, což znamená, že jediná dostupná měření těchto účinků pocházejí z numerických simulací.

Na Obr. 2.4 je zobrazen topografický pohled na modelované uspořádání AWE větrné farmy, kde vítr přichází kolmo na mřížové uspořádání. Ztráty výkonu u systémů generujících energii ze země byly stanoveny na 18 % pro celé uspořádání farmy s mezerami $2/L^2$ mezi jednotkami. Tato simulace zohledňuje jak ztráty způsobené vírovými efekty, tak ztráty vyplývající z neoptimálního řízení. Ztráty způsobené vírem činí 17 % mezi první a poslední řadou systémů, což vede k průměrným ztrátám ve výši 8,5 % na celém systému [36].



Obr. 2.4 Pohled na CFD modelování vírových efektů pro návrh větrné farmy AWE [36].

2.5 Výška letu

Letové oblasti AWE systému se dělí: nízká (do 300 metrů), střední (300 m až 600 m), vysoká (nad 600 m), kombinovaná [7].

Tok v mezní vrstvě je poháněn geostrofickým větrem ve výšce 1000 až 1500 m, který je zase řízen horizontálními tlakovými gradienty a Coriolisovou silou. Mezní vrstva se skládá ze tří různých oblastí: velmi turbulentní smíšené vrstvy, která přechází do méně turbulentní zbytkové vrstvy, a rostoucí noční mezní vrstvy, která je pouze příležitostně turbulentní. Zatímco větrné turbíny převážně pracují v povrchové vrstvě do výšky 100 až 200 m, která je také označována jako Prandtlova vrstva, systémy AWE převážně pracují v Ekmanově vrstvě, ve které tok přechází z povrchové vrstvy na geostrofický vítr [40].

Podle Monin–Obukhovovy teorie roste rychlost větru s výškou v mezní vrstvě atmosféry podle logaritmického zákona. Nad výškou mezní vrstvy, kde geostrofické větry vanou bez vlivu zemského povrchu, se předpokládá, že jsou větry rychlejší. Ještě výše, v oblasti tryskového proudění (jet stream) ve výškách kolem 10 km, lze najít velmi silné větry, které byly před zhruba deseti lety považovány za slibné pro AWE.

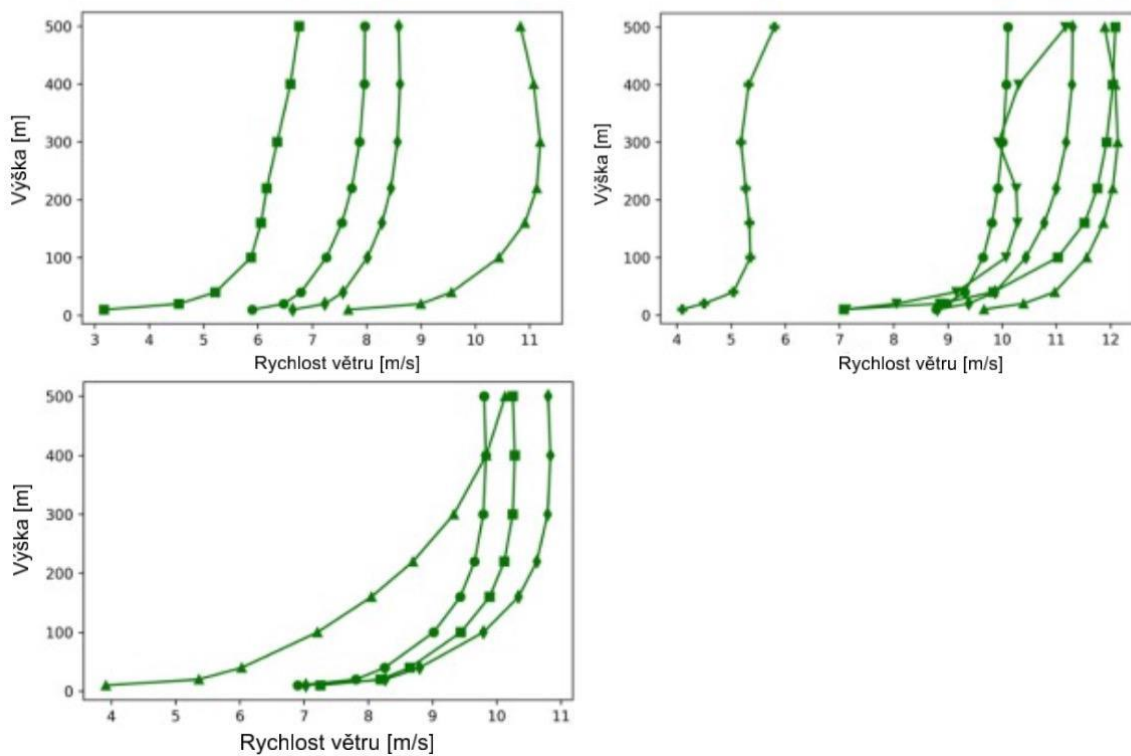
Například Archer a Caldeira zhodnotili větrné zdroje v rozmezí výšek 500–12000 m po celém světě. Zjistili, že vysokohorské větry nejsou vždy silné a stabilní a že optimální hustoty větrné energie a výšky s nejvyššími větry se liší podle počasí. Došli k závěru, že optimální hustoty větrné energie se nacházejí nad 6 km.

Naopak Miller et al. později tvrdili, že větrná energie z tryskového proudění nemá potenciál stát se významným obnovitelným zdrojem energie.

V Evropě bylo analyzováno mnoho zdrojů AWE. Gambier například zjistil, že v Německu se mezi 200–1000 m v noci objevuje silná větrná smykovaná vrstva, zatímco ve dne je tato vrstva menší.

Bechtle et al. porovnali větrné zdroje do 500 m s těmi ve 100 m (typická výška větrných turbín). Výsledky ukazují, že v některých případech je vyšší zdroj větrné energie dostupný ve vyšších výškách, v jiných naopak v nižších výškách. Hustota větrné energie se v Evropě v 5. percentilu při variabilních výškách zvýšila o více než 100 % oproti hodnotám ve stometrové výšce.

Protože zařízení pro AWE létají v kruhových nebo osmičkových trajektoriích v rozmezí přibližně 100 až 500 m nad zemí, je důležité brát v úvahu větrnou smykovou vrstvu (*wind shear*), tedy změnu rychlosti větru s výškou. Fluktuace výkonu způsobené větrnou smykovou vrstvou mohou nastat, pokud letová dráha AWE pokrývá široký rozsah nadmořských výšek. Není tedy pravda, že větry jsou vždy silnější ve výšce 500 m než ve 100 m [7].



Obr. 2.5 20leté průměrné profily rychlosti větru z offshore WRF simulací NREL na třech hlavních lokalitách: Severozápadní Pacifik – levý graf, Havaj – pravý graf, Atlantik – spodní graf [7].

Tyto profily ukazují na Obr. 2.5, jak se rychlost větru mění s výškou v průběhu 20 let na těchto vybraných místech. Rychlost větru se s výškou zvyšuje hlavně do 200 m, poté se profil většinou stabilizuje. Ne vždy je vítr silnější v 500 m než ve 100 m [7].

3 Konstrukce draka

3.1 Základní druhy křídel

Základním rozdělením v oblasti systémů AWE je rozdíl mezi měkkými a pevnými křídly, která připomínají surfovací draky nebo padáky, a pevnými křídly, která se podobají letadlům nebo koncům lopatek větrných turbín.

Nezpevnění draci jsou obecně mnohem lehčí než jejich pevné protějšky, snáze se ovládají a v případě havárie je riziko většího poškození výrazně nižší. Naproti tomu pevnokřídlé systémy dosahují podstatně vyššího poměru vztlaku k odporu (lift-to-drag ratio), což vede k rychlejšímu letu napříč větrem, a tím i k výrazně vyššímu výkonu na jednotku plochy křídla. S tím však souvisejí zvýšené nároky na přesné a bezpečné řízení těchto systémů [34].

3.1.1 Měkká křídla

Anglicky *flexible wings* nebo také *soft wings*. Měkká křídla si udržují svůj tvar pouze díky aerodynamickému rozložení zatížení generovanému prouděním vzduchu a mohou být vyrobena s extrémně nízkou hmotností vzhledem k jejich ploše [34]. Tato křídla jsou zobrazena na Obr. 3.1 vlevo.

Měkká křídla se používají již delší dobu, např. v kite-surfingu nebo v meteorologii, takže jejich využití pro výrobu energie v AWE bylo logickým krokem. Mezi jejich jasné výhody patří minimální hmotnost na jednotku plochy, kompaktnost, stabilní letové chování a nízké výrobní náklady. Díky použití textilu jsou také odolnější vůči haváriím než tuhá křídla.

Na druhou stranu mají své nevýhody při jejich vyřazení z provozu (depower) (zásadní pro minimální spotřebu energie u systémů s *pumping cycle*), protože v této fázi je v řídicích lanech téměř nulové napětí. Měkká křídla jsou zcela závislá na řízení pomocí lan, podobně jako u kite-surfingu; napětí v lanech je tedy klíčové pro jejich udržení ve vzduchu. Další nevýhodou je jejich omezená životnost kvůli použití textilních materiálů, proto je výběr materiálu extrémně důležitý. Lehké tkaniny z vláken s vysokou pevností (např. aramid) byly shledány jako vhodné pro zlepšení odolnosti.

Existují dva hlavní typy měkkých křídel: nafukovací křídla s přední hranou a ram-air křídla. Oba typy mají své výhody a nevýhody, které budou dále rozebrány v kapitole 3.2 [38].

3.1.2 Pevná křídla

Anglicky *rigid wings*. Pevná křídla udržují svůj tvar nezávisle na okolních povětrnostních podmínkách a vyžadují větší hmotnost na metr čtvereční křídla. Díky vyššímu poměru vztlaku k odporu mohou dosahovat velmi vysokých rychlostí, což přináší výhodu výrazně vyššího výkonu na jednotku plochy křídla, ale také riziko značných škod v případě nehody [34]. Tato křídla jsou zobrazena na Obr. 3.1 vpravo.

Zatímco měkká křídla byla zvažována díky své historii v zacházení s velkými tahovými silami, pevná křídla byla brána v úvahu kvůli jejich využití v konvenčním letectví. Několik desítek let zkušeností s jejich vývojem a optimalizací představuje významnou výhodu. V systémech AWE se tato křídla vždy používají v systémech s palubní výrobou energie, ale také se využívají v systémech s výrobou energie na zemi. Ve skutečnosti se v případě výroby energie *pumping cycle* tvrdí, že pevná křídla mají rychlejší a efektivnější fáze tahu.

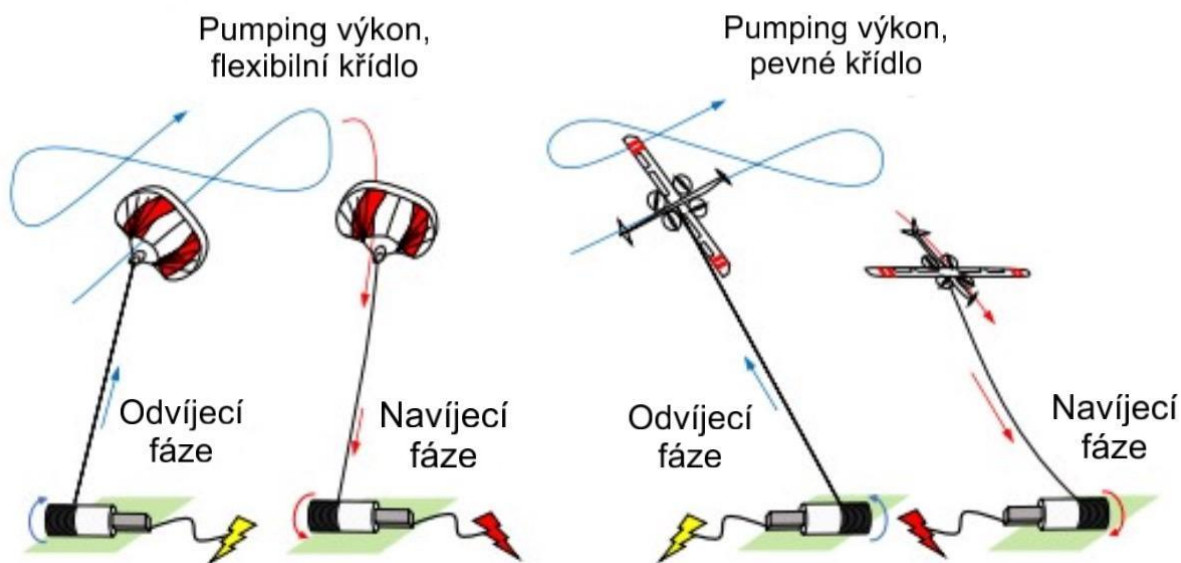
Tento typ křídel vykazuje výrazně vyšší aerodynamickou účinnost díky vysokému štíhlostnímu poměru, použití profilů s vysokým *glide ratio* a skutečnosti, že se téměř nedeformuje. Díky tomu křídlo odolává velkým aerodynamickým zatížením, což vede k vysokým ohybovým momentům. Navíc v případě palubní výroby musí křídla nést také samotné generátory. Proto jsou obvykle vyráběna z kompozitních materiálů z uhlíkových nebo skelných vláken. Tyto materiály, ačkoliv jsou dražší a hustší než textilie, mají vynikající poměr pevnosti k hmotnosti a jsou velmi odolné vůči chemickému i mechanickému opotřebení. Díky pravidelné

údržbě mají tedy pevná křídla výrazně delší životnost, což přispívá k vyšší opakovatelnosti procesů.

Tyto výhody však přicházejí za cenu vyšších výrobních nákladů a vyšší hmotnosti systému, což omezuje výkon za nízkých rychlostí větru. Například mají vyšší *cut-in speed* větru potřebnou k provozu a pro vzlet vyžadují externí zdroj energie (např. palubní vrtule, startovací mechanismy). Nicméně díky výrazně vyšší aerodynamické účinnosti lze pro dosažení stejného výkonu použít pevná křídla s menší plochou. Zvýšení poměru hmotnosti k ploše tedy nemusí být tak výrazné. Další nevýhodou je, že v případě nehody je nepravděpodobné, že by bylo možné křídlo zachránit bez poškození.

Řízený let těchto křídel je typicky realizován pomocí palubních turbín, podobně jako u běžných letadel s trupem a ocasními plochami: výškovka pro klopení (pitch), křídélka pro náklon (roll) a směrovka pro zatáčení (yaw). To přidává křídlu hmotnost navíc a vyžaduje silnější lana, aby bylo možné vést vodivé kabely. Pro snížení hmotnosti a zjednodušení konstrukce (odstraněním některých turbín) lze však křídlo řídit i pomocí lan.

Dalším konceptem jsou morfující křídla, což jsou pevná křídla schopná měnit svůj tvar a rozložení vztaku podél rozpětí k dosažení optimálního výkonu za různých letových podmínek. Například v systému s *pumping cycle* lze tvar křídla upravit tak, aby se maximalizovalo *glide ratio* během fáze tahu, a následně jej přizpůsobit k minimalizaci součinitele odporu během fáze přitahování [38].



Obr. 3.1 Ukázka jednotlivých druhů křídel měkkých a pevných [5]

3.1.3 Hybridní křídla

Zajímavé je, že existuje jen málo hybridních systémů, které kombinují měkké a pevné prvky. Nicméně mnoho měkkých křídel obsahuje některé polopevné prvky, například trubice naplněné stlačeným vzduchem (tzv. tube kites). Jedním zajímavým hybridním konceptem je *tensairity*, který využívá trubice se stlačeným vzduchem a napínací prvky k dosažení vyššího zatížení křídla při zachování velmi nízké hmotnosti [34].



Obr. 3.2 Hybridní křídlo LEI C-draka vyvinutého na TU Delft [41].

3.2 Druhy křídel podle typu generování energie

3.2.1 Groud generation systémy

Mezi hlavní typy letounů využívaných v GG systémech patří:

1) LEI draci

Jednovrství draci, jejichž tuhost v ohybu je zvýšena nafukovacími prvky umístěnými podél náběžné hrany (Obr. 3.3a, b). V rámci AWE se nejčastěji uplatňují dva typy těchto draků:

a) SLE draci – varianta LEI draků, která disponuje alespoň jedním úvazkem podpírajícím centrální část náběžné hrany (Obr. 3.3a). Ve srovnání s C-draky dochází v důsledku tahové síly působící na centrální úvazky ke zploštění křídla v jeho střední části, což vede ke zvýšení aerodynamické účinnosti.

b) C-draci – čtyřúvazkoví draci, jejichž úvazky jsou upevněny na krajní body křídla (Obr. 3.3b). V *pumping cycle* jsou tyto draky kotveny jedním, dvěma nebo třemi lany. V případě jednoho lana je jeho upevnění realizováno k náběžné hraně, zatímco úvazky odtokové hrany jsou ovládány KSU – malou létající jednotkou obsahující jeden nebo více akčních členů, která je uchycena na laně pod drakem. Pokud jsou použita dvě lana, dochází ke spojení levých úvazků do jednoho a pravých do druhého, přičemž ovládání je realizováno regulací rozdílného napětí lan. Varianta se třemi lany zahrnuje jedno lano pro úvazky náběžné hrany a dvě lana pro úvazky odtokové hrany, což umožňuje ovládání úhlu náběhu i směrového řízení přímo ze země. Nafukovací trubková konstrukce LEI draků představuje výhodu zejména při vzletu a přistání, kdy není křídlo ještě plně podporováno aerodynamickými silami. Přestože LEI draci vykazují výhodné provozní vlastnosti, jejich škálovatelnost je omezená, jelikož při zvětšování křídla je nutné úměrně zvětšovat i průměr nafukovacích prvků, což s sebou přináší konstrukční komplikace.

2) Foil draci

Tyto dvouvrstvé draci jsou tvořeny soustavou vzduchových komor (Obr. 3.3c), které probíhají od náběžné hrany k odtokové. Některé či všechny vzduchové kapsy jsou otevřené na náběžné hraně, čímž se během letu plní vzduchem a zajišťují křídlu potřebnou tuhost. Úvazky bývají seskupeny do několika hlavních linií, obvykle tří: centrální a dvou bočních. Oproti LEI drakům nabízejí křídla vyšší aerodynamickou účinnost, ačkoli jejich konstrukce vyžaduje větší množství úvazků. Díky tomu lze *foil* draky konstruovat v mnohem větších rozměrech.

3) Delta draci

Konstrukčně připomínají křídla závěsných kluzáků. Jsou tvořeny jednovrstvou textilní plachtou vyztuženou pevným rámem. Ve srovnání s LEI a foil draky vykazují vyšší aerodynamickou účinnost, což vede k efektivnější přeměně větrné energie. Jejich hlavní nevýhodou je nutnost dimenzovat pevný rám na vysoké mechanické namáhání způsobené aerodynamickými silami. To vyžaduje použití odolných a tuhých nosníků, což zvyšuje celkovou hmotnost, náklady a také minimální požadovanou rychlost větru pro vzlet.

4) Kluzáky

(Obr. 3.3d). Stejně jako delta draci jsou kluzáky (větroni) během letu vystaveny značným ohybovým silám. Pevná křídla mají vynikající aerodynamické vlastnosti, avšak oproti měkkým konstrukcím jsou těžší a jejich výroba je nákladnější. Při pravidelné údržbě mohou mít dlouhou životnost v řádu několika desetiletí.

5) Šípovitá pevná křídla

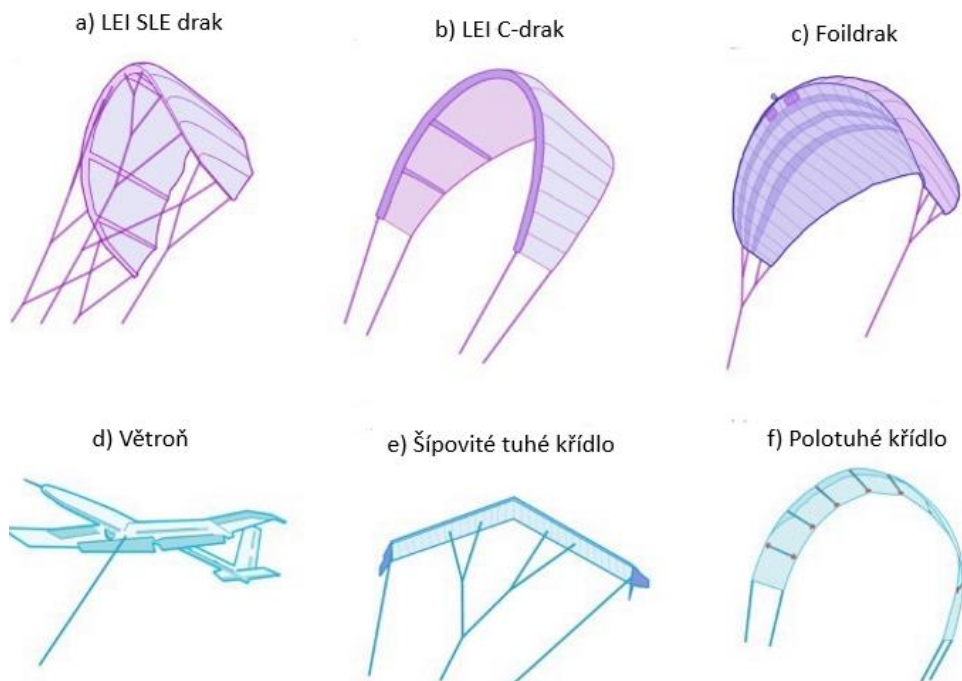
Kategorie letounů bez trupu a ocasních ovládacích ploch (Obr. 3.3e). Stabilita letu je obvykle zajištěna vhodným systémem úvazků a úhlem zkosení křídla.

6) Polotuhá křídla

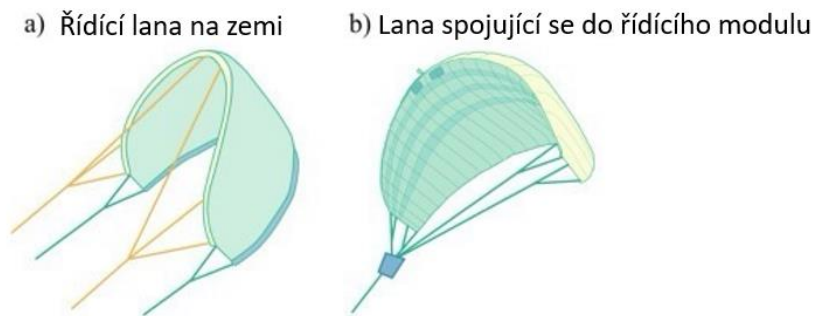
Vývojový koncept společnosti Kitegen Research. Tyto konstrukce se skládají z více krátkých tuhých modulů propojených kloubovými spoji (Obr. 3.3f). Výsledná struktura je lehčí než standardní pevná křídla a zároveň aerodynamicky efektivnější a odolnější než textilní draci.

7) Speciálně konstruované draci

Mezi inovativní konstrukce patří Kiteplanes a Tensairity Kites, jejichž vývoj probíhá na TU Delft a EMPA. Tyto projekty se zaměřují na zvýšení aerodynamické účinnosti obloukových draků bez nutnosti použití pevných nosníků [37].



Obr. 3.3 Různé typy letadel v systémech Ground-gen. (a) LEI SLE drak; (b) LEI C-drak; (c) Foil drak, design od Skysails; (d) větroň, konstrukce od společnosti Ampyx Power; (e) šípovitě tuhé křídlo, konstrukce od společnosti Enerkite; (f) polotuhé křídlo, konstrukce od společnosti Kitegen ([37], upraveno).



Obr. 3.4 Řízení napětí řídicích lan

(a) Řídící lana jsou připevněny k náběžné a odtokové hraně draka LEI SLE.

(b) Řídící modul KSU lze použít k řízení trajektorie letu a úhlu náběhu ([37], upraveno).

3.2.2 Fly generation systémy

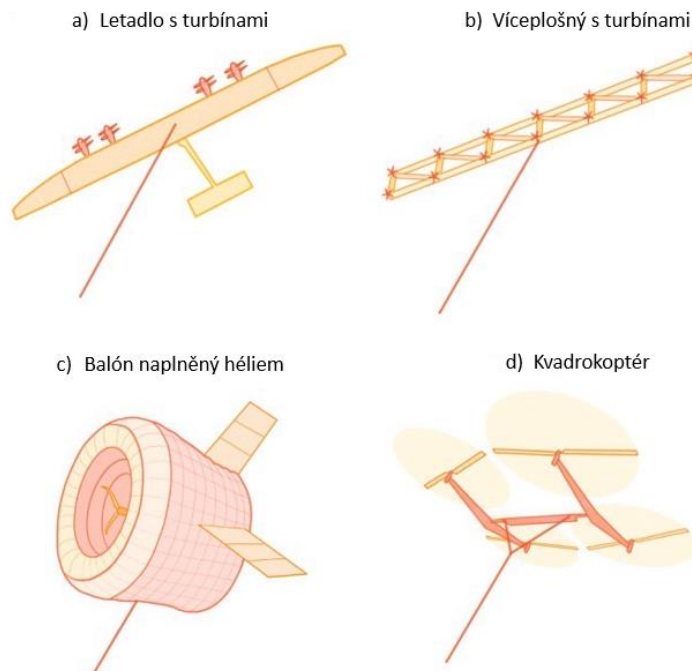
FG-AWE lze rozlišit podle jejich letových principů:

Vztlak křídel: Dosahuje se uvázaným letem speciálních kluzáků (Obr. 3.5a) nebo rámu s více křídly (Obr. 3.5b).

Vztlak a statické nadnášení: Dosahuje se aerodynamicky tvarovanými aerostaty naplněnými plynem lehčím než vzduch (Obr. 3.5c).

Tah rotorů: Dosahuje se pomocí turbín, které se zároveň používají k výrobě elektrické energie (Obr. 3.5d).

Letouny na Obr. 3.5a, b létají s příčným větrem a využívají relativní vítr, zatímco ty na Obr. 3.5c, d létají bez příčného větru a využívají absolutní vítr [37].



Obr. 3.5 Různé typy letounů v systémech Fly-gen.

(a) Letoun se čtyřmi turbínami, design od Makani Power.

(b) Letoun složený z rámu křídel a turbín, design od Joby Energy.

(c) Toroidní vztlakový aerostat s větrnou turbínou uprostřed, design od Altaeros Energies.

(d) Staticky zavěšený kvadroptér v autorotaci, design od Sky WindPower ([37], upraveno).

3.3 Ground generation s pohyblivou pozemní základnou

Systémy GG-AWE s pohyblivou pozemní stanicí (a) představují technicky náročnější řešení, jejichž hlavním cílem je zajistit nepřetržitý tok elektrické energie, čímž se usnadňuje jejich integrace do elektrické sítě. Existuje několik různých konceptů těchto systémů, avšak dosud nebyl dokončen žádný plně funkční prototyp.

Na rozdíl od systémů s pevným navíjením lana není u GG-AWE s pohyblivou pozemní stanicí navíjení a odvíjení lana primárním mechanismem výroby nebo spotřeby energie. Slouží především k řízení trajektorie letounu. Elektrická energie je generována tahovou silou lan, která způsobuje rotační nebo lineární pohyb generátoru. Tento generátor je poháněn pohybem pozemní stanice, nikoliv samotným navíjecím mechanismem [33].

Tyto systémy lze rozdělit do dvou základních kategorií:

3.3.1 Generátor s vertikální osou rotace

Obr. 3.6a, kde jsou pozemní stanice umístěny na obvodu rotoru velkého elektrického generátoru s vertikální osou. Tahové síly letounu uvádějí do pohybu pozemní stanice, které následně přenášejí točivý moment na generátor [33].

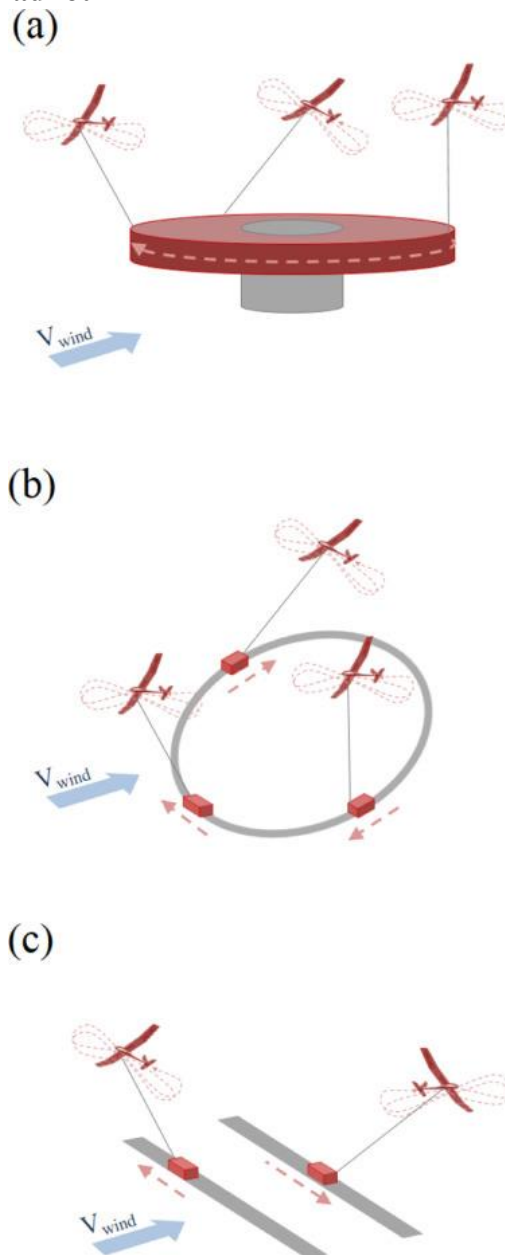
3.3.2 Generátory využívající kolejovou dráhu

Mohou mít podobu systému s uzavřenou smyčkou Obr. 3.6b nebo otevřenou smyčkou Obr. 3.6c. V těchto systémech jsou pozemní stanice umístěny na kolejových vozíčkách a elektrická energie je generována z jejich pohybu, což lze přirovnat k opačnému chodu elektrické železnice.

Porovnáním těchto kolejových konfigurací a systému *pumping cycle* bylo zjištěno, že kolejová konfigurace s konstantní délkou lana a systém s cyklem čerpání měly podobné výstupy výkonu. Nicméně, i když kolejový systém s proměnnou délkou lana vykazoval lepší maximální celkový výkon, není to dostatečné na to, aby bylo možné ignorovat jeho nevýhody, a to vyšší náklady (elektrické a mechanické komponenty) a složitost konstrukce. Bylo tedy uzavřeno, že neexistují žádné jasné výhody kolejových konfigurací oproti systémům s *pumping cycle* [33].

3.4 Systém s více draky

„Tancující draci“. Tato varianta používá dvě křídla, ale pouze jedno lano pro přenos mechanického



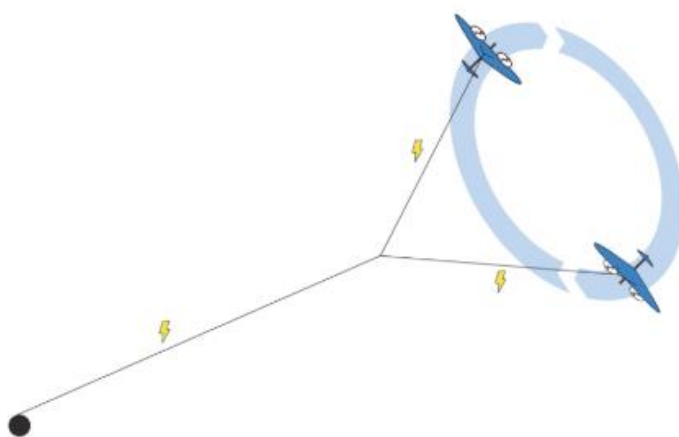
Obr. 3.6 Schéma tří různých koncepcí GG-AWES s pohyblivou základnou.

(a) Generátor se svislou osou: pozemní stanice jsou upevněny na obvodu rotoru generátoru se svislou osou. (b) Kolejnice s uzavřenou smyčkou: pozemní stanice jsou upevněny na vozících, které se pohybují po kolejnici s uzavřenou smyčkou. (c) Kolejnice s otevřenou smyčkou: pozemní stanice jsou upevněny na vozících, které se pohybují po kolejnici s otevřenou smyčkou [37].

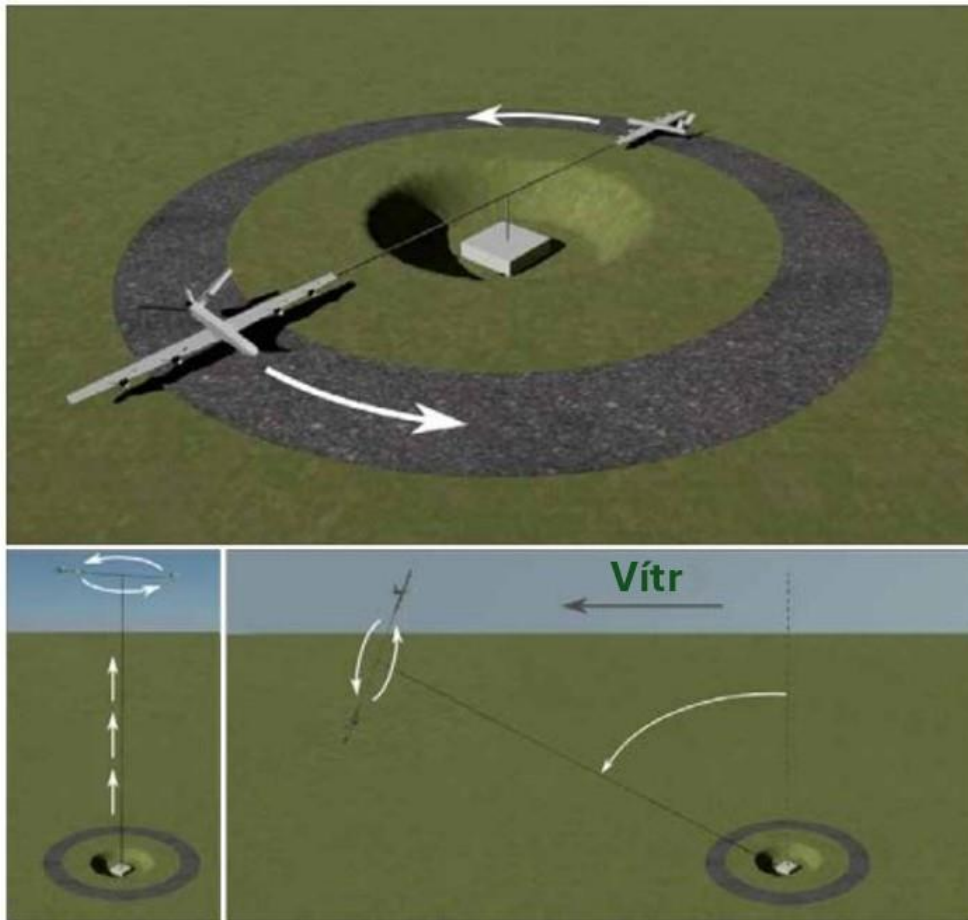
výkonu. Křídla jsou připojena k hlavnímu lanu pomocí sekundárních kabelů, které jsou spojeny v jednom společném bodě, jak je znázorněno na Obr. 3.7. V tahové fázi létají v antisymetrických trajektoriích, což umožňuje hlavnímu lanu zůstat téměř statickým, čímž se snižuje vznikající odporová síla. Konečným důsledkem je možnost vyššího výstupu výkonu. Retrakční fáze také vyrábí elektrickou energii, protože draci mohou létat v trajektoriích, kde se síly na sekundárních lanech téměř vyruší, čímž se výrazně sníží tahová síla v hlavním lanu. I přes tyto výhody existují vážné výzvy pro praktickou realizaci, konkrétně zajištění toho, že trajektorie letu v tahové fázi jsou zcela antisymetrické, nebo zajištění, že se draci nesrazí v případech turbulence [33].

Vzhledem k tomu, že odpor lana představuje významnou překážku dosažení vysokých *glide ratio*, bylo by výhodné mít krátká lana. Na druhou stranu je však dlouhé lano potřeba k dosažení vysokých nadmořských výšek. Proto některé koncepty využívají více draků a rozdělují lana na dvě role: prvního, primárního lana, které umožňuje systému AWE dosáhnout požadované výšky, a druhého, jednoho či více sekundárních lan, která jsou připojena na konec primárního lana a spojují ho s draky upevněnými na jejich koncích. Tato konfigurace umožňuje drakům rychle kroužit kolem bodu připojení mezi dvěma typy lan, přičemž se pohybují pouze krátká sekundární lana, zatímco primární lano zůstává téměř nehybné, jak je znázorněno na Obr. 3.7. Tento koncept skutečně vede k výrazně nižším ztrátám způsobeným odporem lana ve srovnání se systémem s jedním drakem. Totéž platí pro systémy s generováním energie na zemi.

Jiný koncept využívající více křídel spočívá v připojení několika draků na stejné hlavní lano, jeden za druhým, aby se zvýšila celková plocha křídel. Tato myšlenka byla základem projektu Laddermill od W. Ockelse (Obr. 1.2) a v zásadě poskytuje jednoduchý způsob, jak vytvořit rozsáhlý systém složený z mnoha středně velkých křídel umístěných nad sebou. Energie by mohla být generována *pumping cycle* způsobem nebo jinými metodami. Je však třeba dbát na rozestupy mezi draky, protože jejich vzdušné proudy se vzájemně ovlivňují, takže celkový výkon neroste lineárně s počtem draků. Obecně platí, že spuštění systémů s více křídly je složitý úkol a spolehlivost propojených křídel je kritickým faktorem [34].



Obr. 3.7 Vizualizace duálního letadlového systému se sníženým odporem lana [34].



Obr. 3.8 Vzlet duálního systému draků ([35], upraveno).

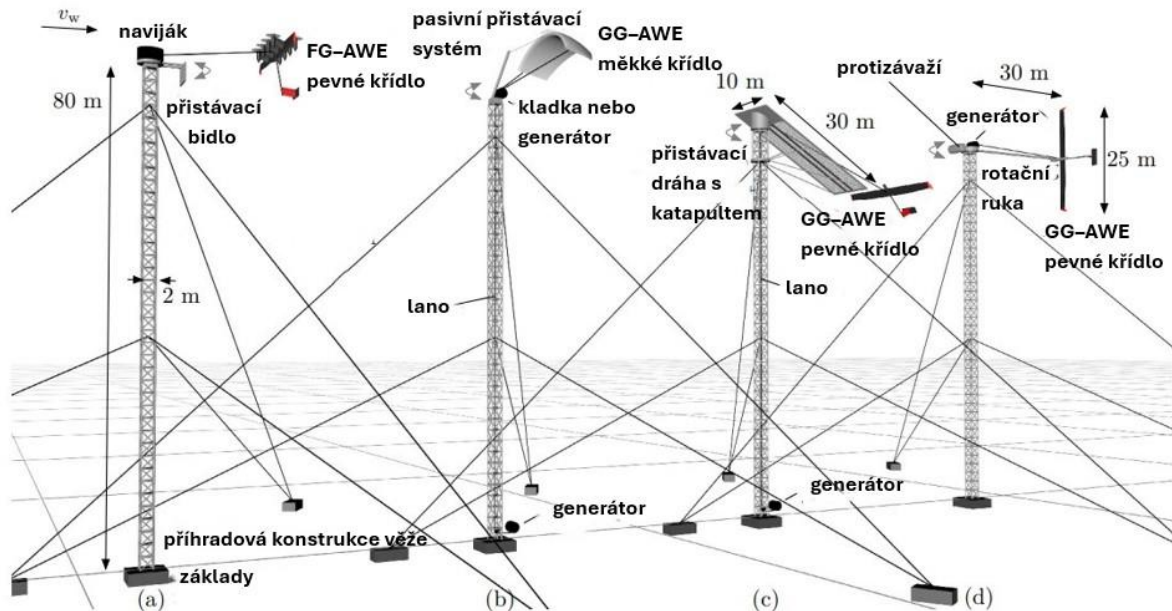
Na Obr. 3.8 je naznačen vzlet těchto „tancujících draků“. Dva větrní draci jsou propojeny kabelem na pravém křídle. Zrychlují podél kruhové dráhy pomocí energie z motorů, dokud nedosáhnou vzletu (nahore). Po vzletu oba drony zvednou hlavní kabel na požadovanou výšku (dole vlevo). Na požadované výšce je hlavní kabel natočen proti větru, zatímco drony pokračují v otáčení (dole vpravo) a nakonec může začít fáze generování, tj. hlavní kabel je zafixován a drony pokračují v otáčení díky síle větru, zatímco jejich motory fungují jako generátory.

3.5 Vzlet pomocí stožáru

Výroba energie pomocí výkonu draka s příčným větrem nahrazuje věž a nosnou konstrukci konvenční větrné turbíny lehkým lanem, což může vést k nižším nákladům na vyrobenou elektřinu (LCOE). V této části je však ukázáno, že upevnění draka na vrchol věže místo na zem může přinést výhody: Nejvýznamnější je snížení tzv. kosinové ztráty, tedy ztráty způsobené nesouladem mezi směrem větru a směrem přenosu tažné síly. Věž tedy může zvýšit výkon a vyrobenou energii až na přibližně dvojnásobek. Dokonce i při malé výšce věže vzhledem k provozní výšce draka lze dosáhnout výrazného zvýšení účinnosti. Další výhody věže jsou například ulehčení autonomního startu a přistání a zjednodušení měření rychlosti větru.

Obr. 3.9 ilustruje možné koncepty věží pro různé systémy získávání energie z draků. Navrhovaná věž je ocelová příhradová konstrukce podepřená zavěšenými lany, která snižují ohybový moment přenášený na věž a základy. Ve speciálních případech mohou zavěšená lana absorbovat většinu síly od draka. Taková věž může být nákladově efektivní, přepravitelná v malých částech a smontovaná na místě. Podobně jako u běžné větrné turbíny zabírá jen malou plochu a okolní území může být využito například pro zemědělství. Navíc, po skončení své

životnosti má taková ocelová konstrukce vysokou míru recyklovatelnosti. U systémů příčného letu draků se zavěšená lana s lanem nebo drakem nekříží, a to ani při změnách elevačního úhlu β v rozsahu $[-30^\circ, 30^\circ]$ (vzhledem k letové dráze), protože elevace zavěšených lan β_s může být například navržena jako $\beta_s > 60^\circ$. Přesto je třeba při detailním návrhu zohlednit bezpečnou vzdálenost i pro přechodové situace.



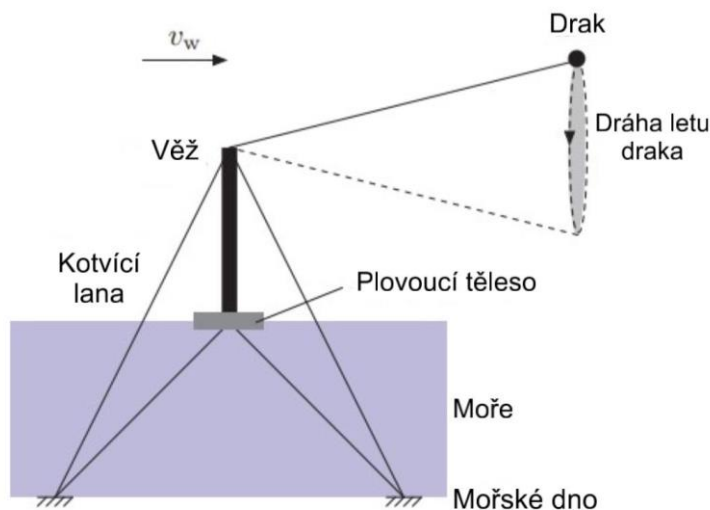
Obr. 3.9 Vyobrazení navržené ocelové rámové věže se závěsnými lany pro vlečného draka (a), vztlakového draka s pasivním startem a přistáním (b), vztlakového draka s katapultem (c) a vztlakového draka s otočným ramenem (d) ([36], upraveno).

Ve všech případech na Obr. 3.9 je vrchol věže otočný pro natáčení podle směru větru. Pro systém Fly-gen lze použít svislý naviják na vrcholu věže, jak to navrhovala společnost Makani Power/Google.

Pro systém GG-AWE jsou představitelná různá řešení, jak se vyhnout tření lana a zlepšit účinnost celého systému. Jedním z možných přístupů je použití navijáku, který by mohl fungovat podobně jako generátor během fáze navijení, nebo použití adaptivního řízení draku, které by minimalizovalo úhel mezi směrem větru a trajektorií letu draku, čímž by se snížilo zatížení lana. Dalším přístupem by bylo použití automatických systémů řízení letu draku, které by optimalizovaly jeho trajektorii podle aktuálních větrných podmínek, což by vedlo k menšímu opotřebení lana a nižším ztrátám při generování energie.

Tyto koncepce by mohly pomoci zlepšit účinnost a snížit náklady spojené s údržbou systému. V případě použití věže s navijákem na vrcholu věže by bylo možné dosáhnout větší stability a větší kapacity pro generování energie, protože věž by byla schopna absorbovat větší část zatížení a minimalizovat dynamické síly, které by jinak mohly ovlivnit výkon systému.

Pokud by se tyto technologie a návrhy dále vyvíjely a optimalizovaly, mohly by představovat významný krok vpřed v komerčním využívání energie z křížového letu draků a výrazně přispět k snížení nákladů na výrobu elektrické energie z větrných zdrojů.



Obr. 3.10 Věž s napjatými lany pro nasazení na moři [36].

Ocelová příhradová věž se zavěšenými lany je také možností pro nasazení na moři. Obr. 3.10 ukazuje možné řešení, které by mohlo být jednodušší než věže pro běžné offshore větrné turbíny, díky možnosti absorbovat velkou část momentů pomocí zavěšených lan [36].

3.5.1 Výhody a nevýhody věže

- + Výrazné zvýšení kosinové účinnosti, resp. snížení kosinové ztráty téměř na její eliminaci.
- + Snížení odporu a hmotnostních ztrát lana, protože lano je kratší pro dosažení stejné výšky bez zvýšení horizontální vzdálenosti.
- + Zvýšení poměru pevnosti k hmotnosti.
- + Zdánlivé zjednodušení startu a přistání jak pro systémy FG-AWE, tak GG-AWE.
- + Nižší požadavek na potenciální energii při startu, pokud je drak odstartován z vrcholu věže.
- + Zjednodušené měření/odhady rychlosti větru v letové výšce draka.
- + Možnost nasazení systémů draků i nad lesy (bez nutnosti mýtiny).
- + Multifunkčnost věže, např. přidání meteorologické stanice nebo antén.
- + Ve srovnání s konvenčními větrnými turbínami se zdá být možná jednodušší a nákladově efektivnější věž.

Nicméně, nevýhody oproti drakům ukotveným na zemi zahrnují vyšší spotřebu materiálu, vyšší náklady na výstavbu a vyšší náklady na údržbu. Stejně jako u klasických větrných turbín musí věž přenášet indukované ohybové momenty do základu, zatímco drak ukotvený na zemi vyžaduje pouze lehkou tažnou strukturu [36].

3.6 Lana a jejich vlastnosti

Anglicky v terminologii AWE *tether*. Kabely pro systémy AWE jsou obvykle vyráběny z polyetylenu s ultra vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE), což je poměrně levný materiál s vynikajícími mechanickými vlastnostmi, ačkoliv se používá a zkoumá mnoho různých materiálů [37].

Funkcí tohoto klíčového prvku je, jak již bylo zmíněno, spojit létající křídlo (či křídla) se zemní stanicí a zároveň omezovat jeho pohyb. Musí tedy odolávat vysoké tahové síle, která vzniká působením aerodynamických sil generovaných křídlem. Lano je proto navrženo tak, aby zvládlo maximální zatížení, které by během letu nemělo být překročeno – aktivní řízení je nezbytné k zajištění tohoto požadavku.

Maximální přípustné zatížení je hlavním konstrukčním kritériem pro všechny systémy. Navíc u systémů s výrobou energie na palubě je třeba zohlednit vedení elektrického proudu skrz lano, zatímco u systémů s *pumping cycle* je nutné zohlednit ohybové chování lana. Při návrhu lana pro konkrétní systém je třeba provést kontrolu životnosti vůči creepu a ohybové únavě, přičemž tyto kontroly musí odpovídat očekávané životnosti.

Pro zhodnocení životnosti lana je nutné definovat tři klíčové parametry: materiál (mez pevnosti), rozměry (například šířku a délku) a typ konstrukce. Zřejmou volbou pro materiál lana je vysoce pevné vlákno s vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti. Tato vlastnost nejenže snižuje vliv gravitačních sil na výrobu energie, ale také umožňuje menší průměr lana, a tím i snížení aerodynamického odporu. Příkladem je vlákno z polyetylenu s ultravysokou molekulovou hmotností (např. Dyneema®), které kromě vynikající odolnosti vůči creep efektu vykazuje i dobrou odolnost proti oděru (což je výhodné například pro použití v offshore prostředí) a stabilitu vůči UV záření (důležité pro systémy FG-AWE). Existuje více typů materiálu Dyneema i konkurenční materiál Spectra®, přičemž oba jsou založeny na polyetylenu s vysokou molekulovou hmotností.

Z hlediska konstrukce existují dva hlavní typy lan podle techniky proplétání: lana stočená (*laid*) a pletená (*braided*). Častěji se používají pletená lana, protože se při zatížení neotáčejí a mají duté jádro, které lze využít například k uložení vodivých kabelů pro přenos elektřiny nebo komunikaci.

Kromě tahového zatížení je třeba zohlednit i aerodynamický odpor, odstředivou sílu a gravitační sílu, které vedou k prověšení lana. Prověšení ovlivňuje úhel náběhu křídla, čímž snižuje účinnost výroby energie. Numerické simulace ukazují, že nejvyšší výkon nastává tehdy, když prověšení zmizí a lano se napne – tedy při dosažení maximální tahové síly. Se zvyšující se rychlostí větru roste i tahová síla, ale úhel prověšení lana zůstává téměř stejný, což je důležité pro stabilitu pohybu křídla.

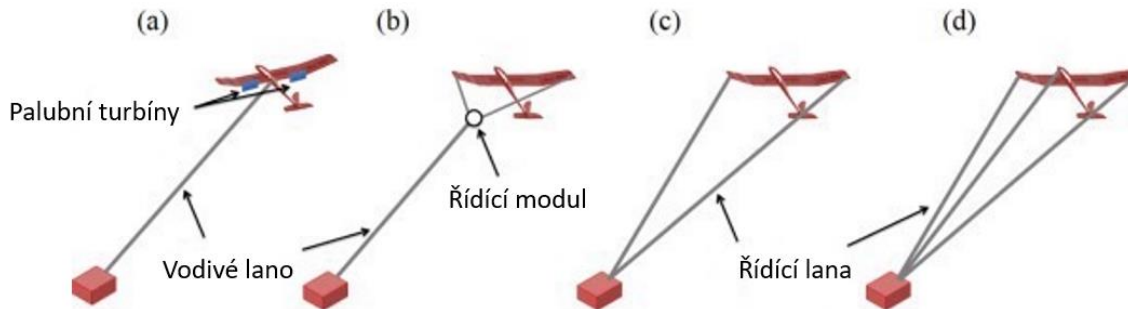
Odstředivé a gravitační síly závisejí na hmotnosti lana, která je přímo spojena s provozní výškou. Se zvyšováním této výšky, za účelem zvýšení výroby energie, roste délka lana, a tím i jeho hmotnost (a odpor). To má přímý dopad na provozní úhel elevace – ten musí být větší, což vede ke zvýšení ztrát způsobených složkou gravitace (kosinové ztráty). Existence optimální provozní výšky je tedy zřejmá.

Aerodynamický odpor lana je ovlivněn především jeho rozměry, geometrií a aerodynamickými jevy. Jak vyplývá z rovnice C_{Di} , čím větší je šířka, délka a součinitel kolmého odporu C_L , tím větší je aerodynamický odpor. Je tedy zřejmé, že systémy vyžadující vodivé kabely uvnitř lana budou mít vyšší odpor. Co se týče dynamických jevů, vibrace vyvolané víry (např. *lock-in* efekt) a jev galopování (druh aerodynamické nestability, při které se těleso ve větru začne periodicky a výrazně kývat) mohou zvýšit odpor až o 300 %, resp. 210 %. Jedním z navržených řešení je použití spráženého lana (*faired tether*), jehož průřez je aerodynamicky optimalizovaný. Toto lano má pasivní mechanismus zarovnání s proudem vzduchu, aby se dosáhlo zmíněných pozitivních účinků. Je také důležité poznamenat, že čím větší je systém AWE, tím menší je citlivost na odpor lana.

Nakonec mají lana důležitou roli i při zajištění integrity pozemní stanice, zejména bezpečnosti generátoru u pozemních systémů při bouřkách. Existuje vysoká pravděpodobnost, že lano spustí povrchový výboj (*flash-over*), který povede obrovské množství elektrické energie dolů, což může poškodit generátor. Proto je nezbytné počítat s ochranou před bleskem a kvalitní izolací kabelů [38].

3.7 Uchycení lan a řízení draka

Ovládání letové trajektorie může být realizováno několika způsoby: buď prostřednictvím palubních turbín (Obr. 3.11a), ovládacího modulu (Obr. 3.11b), regulací napětí hlavních nosných lan (Obr. 3.11c) nebo pomocí tenčích lan určených k řízení pohybu (Obr. 3.11d) [37].



Obr. 3.11 Uspořádání řízení GG-AWE s příčným větrem. (a) s palubními řídicími akčními turbínami; (b) s létajícím řídicím modulem; (c) řízení pomocí silových lan; (d) s přidavným řídicím lanem ([37], upraveno).

3.8 Měření a regulace napětí v lanu

V systémech AWE je napětí v lanu klíčovým parametrem, který ovlivňuje jak efektivitu generace energie, tak řídicí stabilitu draka. Správné měření a regulace napětí minimalizuje ztráty způsobené prověšením lana a opožděným odhadem polohy draka [5].

3.8.1 Měřicí obvod

K měření napětí v lanu lze využít:

- Tenzometry: Umístěné na ukotvení lana pro měření tahové síly.
- Akcelerometry a gyroskopy (IMU): Umístěné na drakovi pro odhad směru pohybu a dynamiky letu.
- UWB systém: *Ultrawideband* lokalizace pro sledování polohy draka v reálném čase.
- Senzory délky lana: Měření vytažené a zatažené délky lana.

Umístění senzorů:

- Senzory síly jsou na kotevním bodě a/nebo na navíjecím bubnu.
- IMU a UWB systém jsou na drakovi.
- Senzor délky lana je umístěn na cívku generátoru [5].

3.8.2 Regulační a optimalizační mechanismus

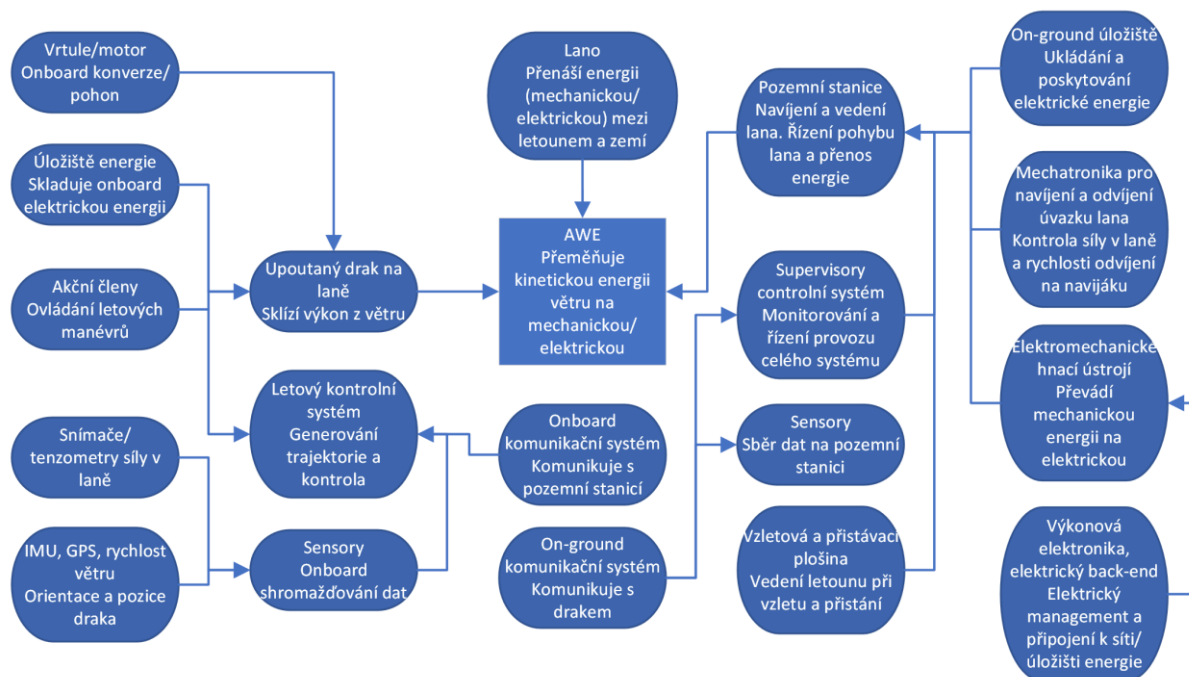
Regulace tahové síly

- PID regulátor napětí v lanu: Používá zpětnovazební řízení k udržení optimální tahové síly. Pro snížení oscilací a zajištění stabilního letu je PID regulátor naladěn s ohledem na dynamiku systému a aktuální podmínky větru.
- Prediktivní model řízení: Využívá časově zpožděný model dynamiky lana, který umožňuje kompenzaci opožděné odezvy systému. Model zahrnuje parametry, jako jsou pružnost lana, aerodynamické síly působící na draka a variabilita větru.

Optimalizace napětí

- Adaptivní řízení podle větru a polohy draka: Řídicí algoritmus průběžně upravuje tahovou sílu v závislosti na změnách rychlosti a směru větru. Využívá aktuální data z větrného senzoru a polohového systému k optimalizaci letového profilu.

- Kompenzace opoždění odhadu polohy draka pomocí predikce trajektorie: Algoritmus kombinuje aktuální sensorová data s prediktivními modely, aby minimalizoval negativní dopady latence měření. To zlepšuje přesnost řízení a umožňuje stabilnější let draka.



Obr. 3.12 Schéma řízení AWE systému ([5], upraveno).

[5].

3.9 Environmentální dopady

Studie nezbytné pro fázi výstavby systému pro získávání energie z výškového větru (AWE) se v zásadě neliší od běžného procesu posuzování vlivů na životní prostředí (EIA), který se vztahuje ke konkrétnímu stavebnímu místu.

Fáze provozu (využití) je však spojena s největší mírou nejistoty. Nejzásadnějším faktorem je úmrtnost ptáků způsobená pohybujícím se letounem a lanem. Tento dopad je (relativně) hodnocen jako střední, zatímco všechny ostatní faktory mají nižší ekologický dopad.

První teoretické odhady naznačují, že počet úhynů bude poměrně nízký. Úmrtnost způsobenou letounem lze odvodit ze statistik civilního letectví. Při zohlednění nejhorších možných scénářů docházíme k závěru, že ročně by mohlo dojít ke 2–13 srážkám ptáků s drakem. Pro pohybující se lano vycházíme z dat studií věnovaných elektrickému vedení, které poskytují nejlepší srovnatelný základ. Na základě těchto studií odhadujeme, že průměrné stanoviště bude vykazovat přibližně 11 úhynů ptáků ročně způsobených lanem.

Celkový počet usmrcených ptáků se tedy pohybuje mezi 13–24 za rok. Tento odhad platí pro systém s drakem, který je aktivní celoročně, 24 hodin denně, s lanem dlouhým 1 km, a umístěným v lokalitě se střední ptačí aktivitou.

V případě, že by byl systém v provozu pouze během dne a pouze za větrného počasí, a navíc s kratším lanem, by byl počet úhynů podstatně nižší – reálný odhad je 5–15 úhynů ročně.

Závěr v této fázi zní, že počet ptáků usmrcených AWE systémy je srovnatelný s údaji z konvenčních větrných elektráren (0,6–63 ročně, medián 7).

Jednou z výzev do budoucna bude shromažďování empirických dat a jejich srovnání s údaji z větrných elektráren za podobných podmínek. Pro smysluplné srovnání bude nakonec nutné škálovat množství vyrobené energie vůči ekologické stopě [39].

3.10 Hmotnost a velikost AWE

Hmotnost a velikost AWE systému přímo souvisí s jmenovitým výkonem, pro který je systém navržen. Vyšší výkon znamená větší hmotnost a rozměry.

Cílem návrhu je co nejnižší poměr m/A_w (hmotnost/plocha křídla) pro požadovaný výkon. Čím těžší systém, tím větší ztráty vlivem kosinového efektu a nižší dostupný výkon z větru. Vyšší hmotnost znamená: Vyšší setrvačné zatížení; Nutnost tužších konstrukcí (pevnější křídla a lana); Vyšší minimální rychlost větru pro vzlet a provoz – což může výrazně omezit využitelnost lokality.

Hmotnost lana je také klíčová: Vyšší provozní výška = delší lano = vyšší hmotnost; Stejně tak tlustší lana zvyšují hmotnost.

Větší plocha křídla umožňuje: Vyšší výkon; Větší obtékanou plochu → nižší indukční ztráty; Menší relativní dopad odporu lana. Ovšem zvětšení plochy zároveň zvyšuje strukturální hmotnost.

Nižší štíhlost (AR) → delší tětivy → tlustší křídla → větší pevnost při nižší hmotnosti. Výhodné je tedy mít: Lehká, ale velkoplošná křídla, která také lépe pracují při nízkých rychlostech větru.

Měkká křídla dosahují nižšího poměru m/A_w [38].

4 Budoucí a vzniklé realizace AWE

4.1 Fly generation

4.1.1 Makani

Společnost Makani vznikla v roce 2006, kdy skupina nadšených kite-surfářů přišla s neotřelou myšlenkou, že draci by mohli být schopni využít dostatek větrné energie pro napájení světa. První draci byli vyrobeni z látky a velmi se podobali kiteboardovému vybavení. Při testování těchto prvních prototypů se ukázalo, že draci potřebují větší účinnost a kontrolu, než jakou by jim látka mohla poskytnout. To vedlo k myšlence pevných draků, které by mohly podporovat palubní rotory, jež by využívaly relativní vítr k vyššímu vztlaku a větší produkci energie.

Po sestrojení pevných draků bylo jejich dalším krokem testování malých prototypů draků v široké škále větrných a environmentálních podmínek. Zde musel tým vyřešit některé zásadní technické problémy, například jak přecházet mezi vertikálním vznášením a jak generovat energii při letu s příčným větrem, kdy drak letí v akrobatických smyčkách.

V prosinci 2016, po mnoha generacích prototypů, tým zúročil znalosti získané během let testování v drakovi z uhlíkových vláken s rozpětím křídel 26 metrů. Tento drak dokázal vyrobit až 600 kW elektřiny, což je 30krát více energie než předchozí prototyp a dost na to, aby napájel asi 300 domácností.

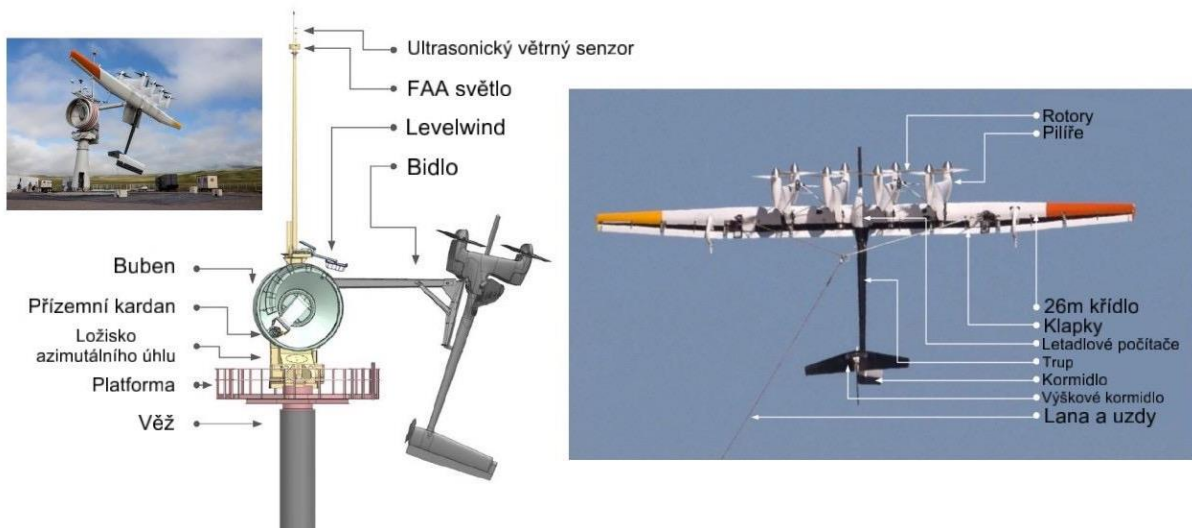
V roce 2019 se společnost Makani stala samostatnou firmou a navázala spolupráci se společností Shell, aby mohla energetické draky používat v mořském prostředí. V téže roce tým uskutečnil u norského pobřeží první let vzdušné větrné turbíny na moři na světě.

V roce 2020 tato firma skončila a své zkušenosti a data z projektu Makani nasdílela široké veřejnosti. Drak se během testování ztratil a havaroval a další realizace projektu již nepokračovala [40].



Obr. 4.1 Drak Makani společnosti X/Google [40].

Vrtule na křídle fungují jako rotory vzletajícího vrtulníku a zvedají draka od pozemní stanice. Drak vzletne kolmo k větru a vystoupá do výšky 305 m, načež začne kroužit, aniž by spotřebovával energii [40].



Obr. 4.2 Konstrukce draka Makani s popisem jeho částí ([5], upraveno).

4.1.2 Altaeros BAT

Společnost Altaeros plánovala nabídnout „větrnou energii v kostce“ tím, že navrhla svůj BAT jako kompaktní mobilní systém, který by bylo možné schovat do dvou přepravních kontejnerů a poslat na místo užití (např. na vzdálené ropné pole, ostrov nebo vojenské stanoviště). Na místě by se sestavila mobilní pozemní stanice a související systémy, aerostat BAT by se vybalil, nainstaloval, nafoukl heliem a mohl se spustit.

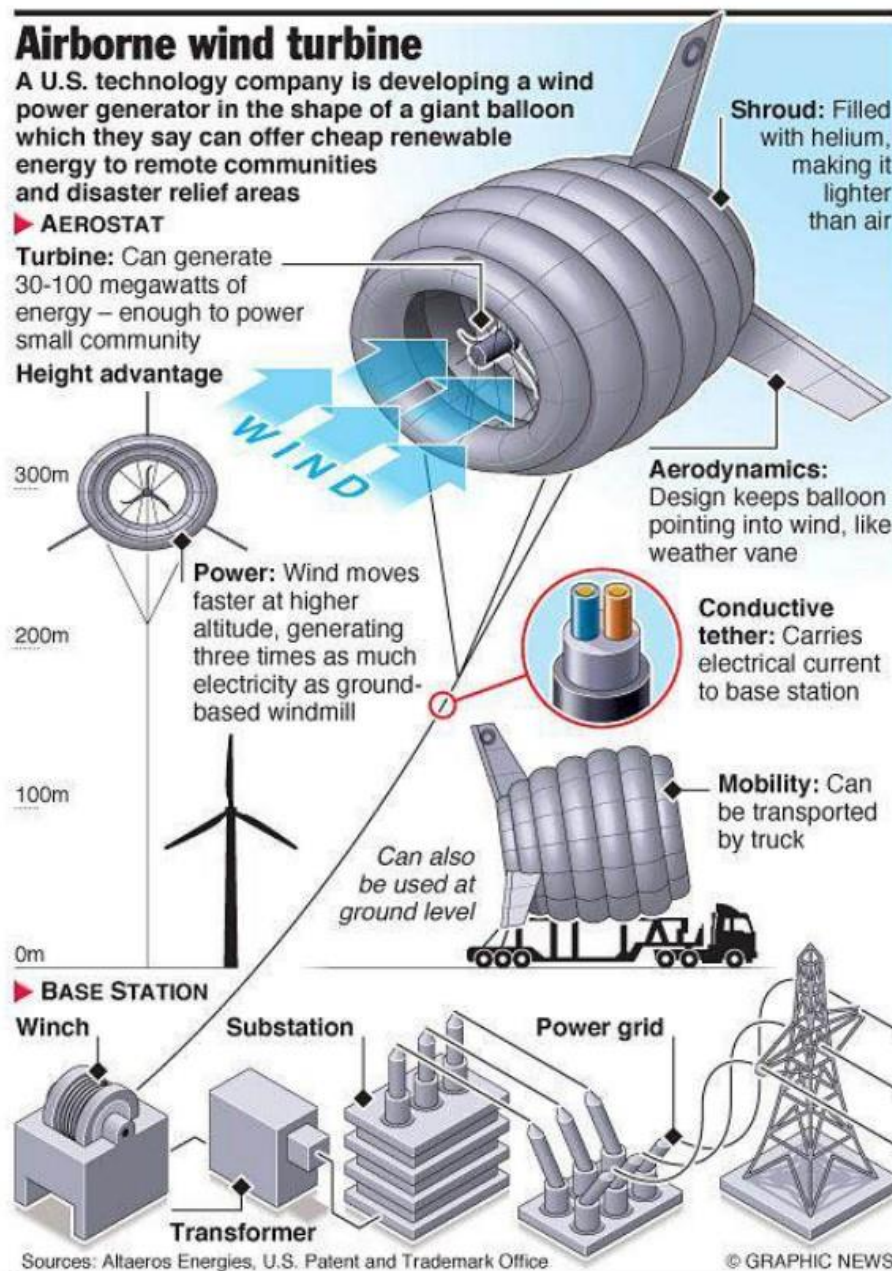
Společnost Altaeros očekávala, že aerostat bude moci létat a vyrábět elektrickou energii již po jednom dni provozu. Poté by aerostat stačilo každé tři až čtyři měsíce spustit na zem, aby se doplnilo helium a provedla se pravidelná údržba.

Očekávalo se, že náklady na dopravu a instalaci nasazené BAT budou až o 90 % nižší než náklady na stavbu srovnatelné větrné turbíny na věži na vzdáleném místě.

Prototyp Altaeros BAT o výkonu 30 kW pro zkoušky na Aljašce byl navržen pro provoz ve výšce 308 m. Prototyp BAT byl provozně testován na východním pobřeží USA ve větru o rychlosti 70 km/h, ale očekávalo se, že bude schopen odolat silnějším poryvům, které se pravděpodobně vyskytnou na Aljašce, a to až do rychlosti 161 km/h.

Společnost Altaeros navrhla zahrnout nasazení BAT do plánů reakce na přírodní katastrofy pro případy, kdy je místní nebo regionální elektrická síť nedostupná. V místech katastrofy by BAT také mohly pomoci obnovit komunikaci a poskytnout záchranářům místní dohled nad oblastí pro lepší informovanost o situaci, řízení zdrojů a bezpečnost.

V roce 2015 bohužel firma oznámila odchod od vývoje systému BAT a přeorientovala se na letecké telekomunikační platformy [41].



Obr. 4.3 Vizualizace projektu Altaeros BAT [41].

- **Plášť**

Jedná se o lehký, netuhý, tlakově stabilizovaný toroidní plynový obal s aerodynamickým kruhovým průřezem, který směřuje zachycené proudění okolního vzduchu do Venturiho trubice a urychluje vzduch před setkáním s palubním turbogenerátorem v hrdle Venturiho trubice.

Vícevrstvý plynový obal plněný heliem je vyroben z průmyslových tkanin s nízkou propustností. Ventilační systém může rychle vypustit heliový vztlakový plyn, pokud je třeba v případě nouze (např. náhlé extrémní počasí, přetržení jednoho nebo obou mechanických lan) a vrátit BAT zpět na úroveň země.

- **Generátor větrné turbíny**

Lehká konvenční větrná turbína s horizontální osou spojená s generátorem střídavého proudu tvoří integrální jednotku, která je zavěšena na lanech podél středové osy Venturiho trubice tvořené nafouknutým pláštěm.

- **Lano**

BAT je k pozemní stanici připojen lehkým, vysoce pevným, víceprvkovým kabelem. Tento kabel obsahuje redundantní pevnostní prvky, prvek napájecího vodiče a prvek řídicího signálu. Kotevní kabel umožňuje vypouštění a navrácení aerostatu, udržuje jej na místě za všech povětrnostních podmínek a zároveň přenáší elektrickou energii z palubního generátoru do pozemní stanice. Řídicí systém aerostatu autonomně upravuje výšku letu a polohu pláště tak, aby se hledala optimální rychlost větru a orientace pláště pro výrobu energie.

- **Mobilní pozemní stanice**

Mobilní pozemní stanice je postavena na návěsové plošině pro snadnou přepravu na vzdálené místo a pro zjednodušení přemístění systému v případě potřeby. Mobilní pozemní stanice obsahuje následující prvky: přívod helia k nafouknutí BAT, navijáky pro nasazení a vytažení BAT, otočný držák, který umožňuje otáčení aerostatu a lana podle toho, jak se mění směr větru, autonomní řídicí systém, který dokáže optimalizovat provozní podmínky aerostatu (tj. výšku, úhel náklonu, tlak helia), zařízení pro úpravu elektrické energie (transformátor) a připojení k místní rozvodně.

Není třeba personálu na místě. Může být monitorován na dálku a vyžaduje pouze pravidelné kontroly údržby na místě a doplňování helia do aerostatu [41].

4.1.3 WindLift

Společnost WindLift byla založena v roce 2006. Tato americká společnost vyvinula prototyp AWE systému, který se podobá draku od společnosti Makani. Systém je schopen generovat špičkový výkon 12 kW při rychlosti větru mezi 12 a 40 km/h.

V budoucnu plánuje WindLift vylepšit vlastnosti křídla, aby zvýšila výkon v generační fázi a snížila spotřebu energie během fáze návratu [44].



Obr. 4.4 Prototyp AWE od společnosti WindLift [43].

4.1.4 KiteKraft

Společnost KiteKraft vznikla jako výzkumný projekt na Technické univerzitě v Mnichově. Technologie se skládá z multikoptéry s křídly, která je kabelem spojena s pozemní stanicí.

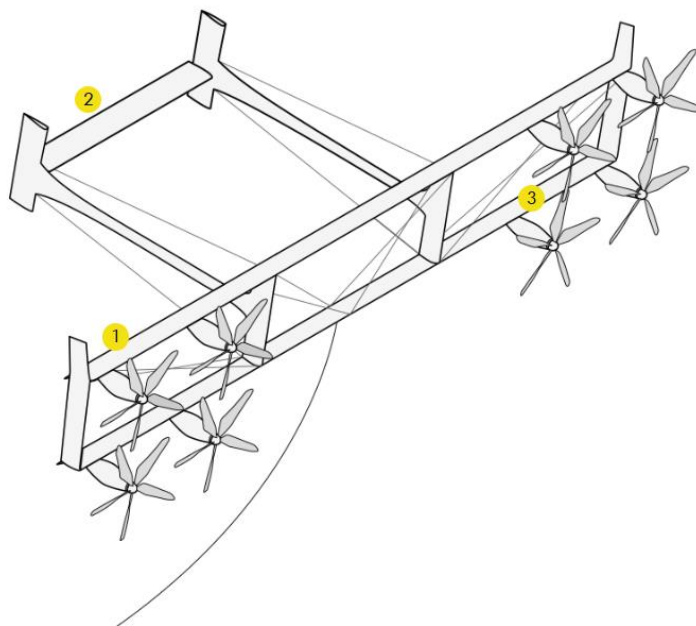
Drak vyrobený z hliníku a uhlíku létá ve vodorovných osmičkách nebo kruzích, srovnatelných se špičkami lopatek běžné větrné turbíny, ve výšce až 500 metrů. Konstrukce *boxplane* s příhradovým drakem maximalizuje tuhost a zároveň minimalizuje hmotnost. Dvě křídla zvyšují hustotu výkonu, což umožňuje ekonomickou životaschopnost i při malých rozměrech systému. Vnější povrch křídel je vyroben z extrudovaného hliníku. Tato metoda je velmi nákladově efektivní a snadno škálovatelná. Víceprvkový aerodynamický profil generuje

velmi vysoký vztlak, což umožňuje vysokou hustotu výkonu. Osm palubních elektrických turbín slouží jako motory během vzletu a přistání. Ty samé stroje jsou během letu ve tvaru osmičky využívány jako generátory. Odolný stejnosměrný motor/generátor zajišťující spolehlivost, dlouhou životnost a vysokou účinnost. Pevně nastavené listy rotorů z uhlíkových vláken optimalizované pro maximální výrobu energie při minimální hlučnosti.

Jednobodové uchycení umožňuje plnou kontrolu nad náklonem draku, čímž se optimalizuje účinnost získávání energie a stabilita. Elektromechanické lano se skládá z jádra z kevlaru, které nese mechanické zatížení, a elektrických kabelů vinoucích se kolem jádra. Lano zajišťuje plně redundantní přenos vysokonapětového stejnosměrného proudu [44].



Obr. 4.5 Vizualizace systému od společnosti KiteKraft [45].



Obr. 4.6 Vizualizace draka společnosti KiteKraft

1) Ovládací plochy

Každé křídlo – horní i spodní – má několik ovládacích ploch, které slouží k řízení draka.

2) Vodorovné ocasní plochy (elevator)

Ocasní část obsahuje prvky pro pasivní stabilizaci, což umožňuje stabilní let i při poryvech větru.

3) Výztuhy

Příhradová konstrukce je zesílena diagonálními výztuhami [44].

4.2 Ground generation

4.2.1 AMPYX power

Ampyx Power, nizozemská společnost, byla první firmou, která vyvinula *pumping cycle* generátor s pevným kluzákem pro výrobu elektrické energie. Po několika prototypech nyní vyvíjejí a testují dva 5,5 m dlouhé modely s názvem AP-2A1 a AP-2A2. Oba jsou oficiálně registrovaná letadla s plně automatizovaným řízením pomocí moderní avioniky.

Konstrukce: Tělo z uhlíkových vláken a centrální uhlíková trubka ukrývající elektroniku, senzory a turbíny. Letoun je plně autonomní při vzletu, letu (*pumping cyklech*) i přistání, ale v případě potřeby je možné ovládní záložním autopilotem přes bezdrátové spojení.

Pomocné systémy: Katapult pro start a pohonná jednotka pro stoupání. Přistává podobně jako běžné letadlo, s pomocí záchytného lana pro přesné zastavení a přípravu na další vzlet [40].

Nyní společnost vstoupila do firmy OrangeAerospace a představila větrného draka AMPYX power AP3. Jedná se o draka s rozpětím křídel 12 m a s 24/7 autonomním řízením za každého počasí [41].



Obr. 4.7 Větrný drak nizozemské společnosti OrangeAerospace AMPYX Power AP3 [41].

4.2.2 Kitemill

Kitemill je norská společnost, která se zaměřila na vývoj GG-AWE systémů. Jejich vývoj probíhal takto: Používali měkké materiály (podobně jako draky SkySails), ale narazili na problémy s ovladatelností a životností. Rychle tedy přešli na pevné křídlo [40].

Řešení společnosti Kitemill se skládá z draka připojeného lanem k pozemnímu generátoru. Drak je speciálně navržené letadlo složené z kompozitních materiálů. Má tvar věttroně a 4 vrtule potřebné pouze pro vzlet a přistání. Jakmile se drak vznesse do vzduchu, udržuje se ve vzduchu díky plynulému plachtění na vzdušných proudech. Drak je navržen tak, aby se mohl pohybovat rychle a bez námahy a zároveň přidával vysokou tažnou sílu na úvazku. Lano je vyrobeno z pletených polyethylenových vláken. Sensory umístěné na letadle poskytují řídicímu systému datové body pro řízení a vyvážení letadla [42].



Obr. 4.8 Drak od společnosti Kitemill [43].

4.2.3 EnerKíte

EnerKíte byla založena v roce 2010 v Německu a využila své zkušenosti z projektu CyberKíte k vývoji nového prototypu nazvaného EK30. Toto zařízení AWE je 30kW prototyp poháněný třílanovým pozemním systémem. Prototyp byl vyvinut jako mobilní AWE systém namontovaný na vozidle a pracující v off-grid režimu s využitím bateriového úložiště. Může operovat v nadmořských výškách mezi 100 a 300 metry a využívá křídlo o ploše 30 m².

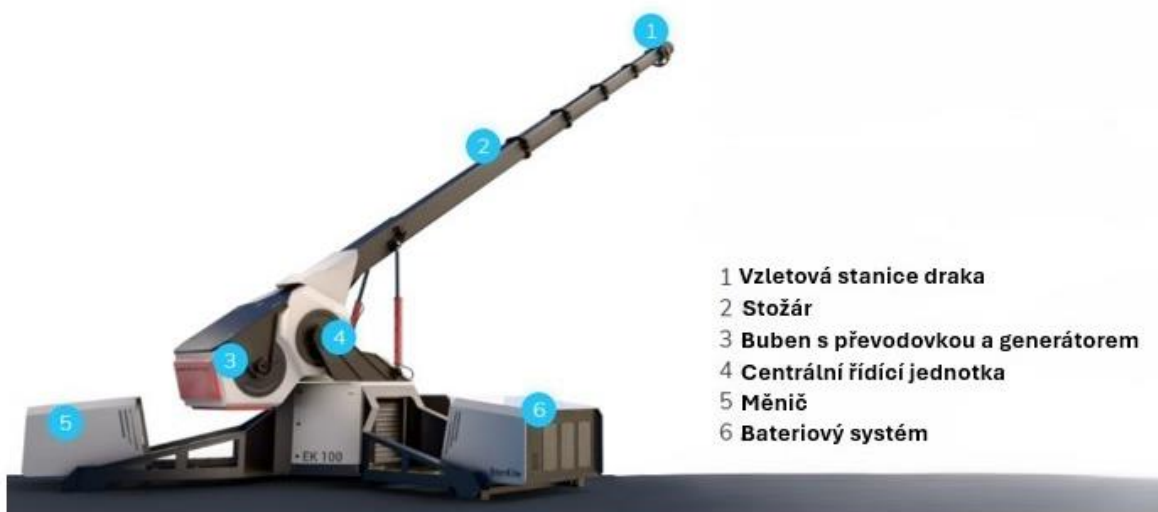
EnerKíte vyvinula v letech 2017 a 2018 dva nové prototypy: EK200 je navržen jako samostatný systém. Jmenovitý výkon EK200 je 100 kW. Plocha křídla tohoto systému činí 30 m² a je schopný provozu při rychlostech větru mezi 3 m/s a 20 m/s [44].



Obr. 4.9 Systém německé společnosti EnerKite [45].

Struktura žeber je z uhlíkových vláken s polotuhou konstrukcí – tj. nepřenáší se síly centrálně, ale prostřednictvím několika kontaktních bodů na křídle. Základní stanice obsahuje elektrický systém se střídači, pohony, baterií. Na vrcholu základnové stanice je umístěno centrální otočné rameno pro vzlet a přistání. Na rameni jsou umístěny stožár, kabelové vedení, bubny a také generátor a převodovka.

Jedinečný startovací systém umožňuje vzlet i bez větru na úrovni země: rotační start. Rotační stožár vytahuje křídlo do výšek s dostatečným větrem. Stejný princip se používá i při přistávání, kdy se křídlo přiblíží k základní stanici kruhovým letem a zakotví na stožáru.



Obr. 4.10 Schéma základové stanice ([46], upraveno).

4.2.4 Kitepower

Firma Kitepower vyrábí dva druhy AWE systémů. Hawk je prototypem Groud-gen draka společnosti. Doba provozu je 10 hodin a jmenovitý výkon 30 kW. Falcon má vyšší výkon, a to 100 kW. Tyto dva typy lze už nyní zakoupit, a to je činí jako jedny z prvních komerčních produktů tohoto typu na světě.

Společnost plánuje do budoucna vyrobit draky i o výkonu 500 kW s až o 90 % menším množstvím materiálu, než by se použilo na tradiční větrné elektrárny.

Co se týče konstrukce draku, jedná se o hybrid mezi nafukovacím a pevným tělem draka ze skelných vláken [47]. Celý systém se vejde do standardního přepravního kontejneru a podle společnosti Kitepower trvá montáž na novém místě méně než 24 hodin [48].

Společnost Kitepower udržuje úzké spojení s TU Delft prostřednictvím společného výzkumu. TU Delft je jednou z průkopnických institucí v oblasti letecké větrné energie, jejíž základy položil nizozemský astronaut a profesor leteckého inženýrství Wubbo Ockels [49].

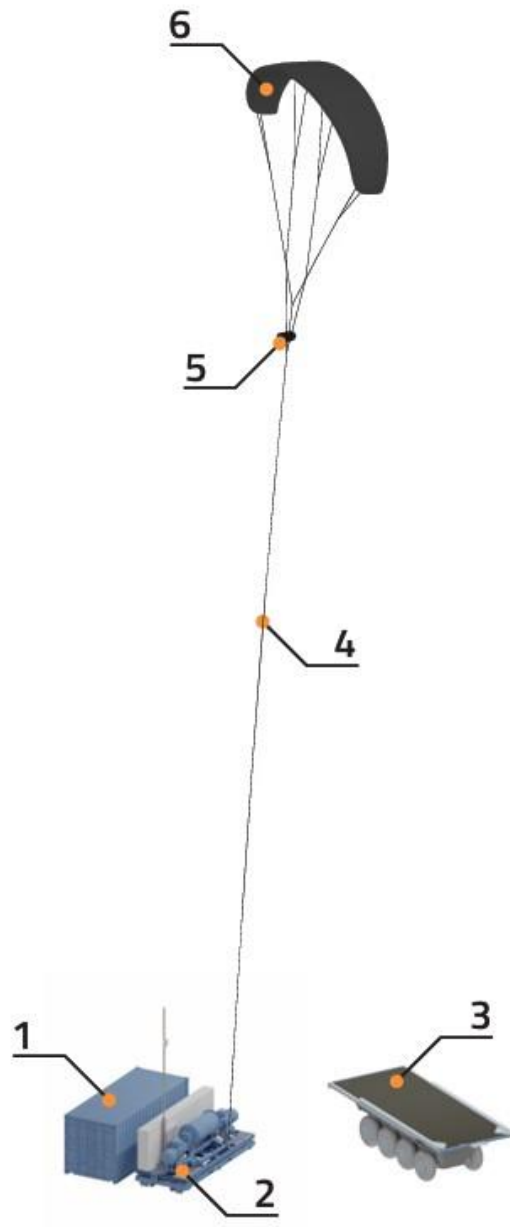
Detailnější podobu draka lze vidět na Obr. 3.2.

Tab. 4.1 Jednotlivé parametry provozu draka Hawk [47].

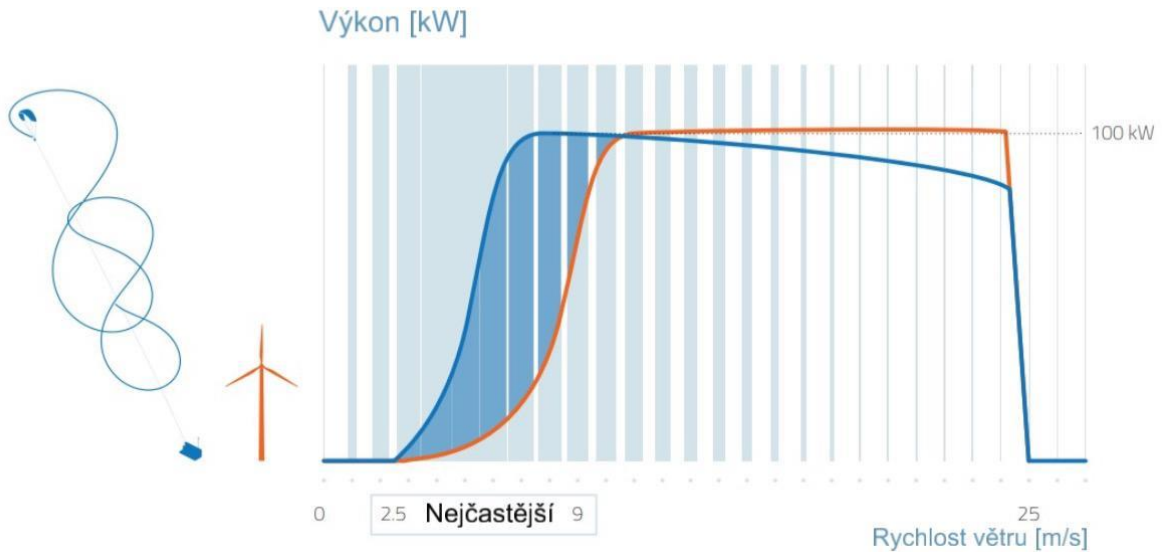
Parametry zařízení	Hodnota
Jmenovitý výkon	30 kW
Týdenní produkce energie ¹	Více jak 1 MW/týdně
Nominální rychlost větru	10 m/s
Rychlost větru při spuštění	6 m/s
Maximální provozní rychlost větru (včetně porывů)	20 m/s
Minimální rychlost větru pro start	5 m/s
Maximální letová výška	350 m
Požadovaný prostor (poloměr) ²	425 m
Čas na uvedení do provozu	2,5 h
Počet startů týdně	3
Počet operátorů ke startu	1–2
1	Při létání každý druhý den po dobu 10 hodin za dostatečného větru.
2	Pozemek lze využít k alternativním činnostem v době, kdy je Kitepower nasazen. Během provozu není dovoleno, aby se v letové zóně pohybovaly nevyškolené osoby.

Tab. 4.2 Specifikace jednotlivých
komponent draka Hawk [47].

Položka číslo	Zařízení
1	Baterie
Rozměry	2,99 m × 2,44 m × 2,59 m
Hmotnost	7,5 t
Špičkový výstupní výkon	330 kW
Kapacita	400 kWh
Typ baterie	Lithium-ion
IP	IP65
Životnost	10 let
2	Ground station
Váha	9,6 t
IP	IP64
Životnost	25 let
Rozměry	2,44 m × 2,60 m × 6,06 m
3	Vypouštěcí plošina
4	Lano
Typ	UHMWPE Dyneema®
Délka	352 m
5	KCU
Bezdrátový dosah	2 km
IP	IP65
6	Drak
Plocha	40–60 m ²
Síla	2,5 t
Průměrná hodnota rychlosti letu	110 km/h

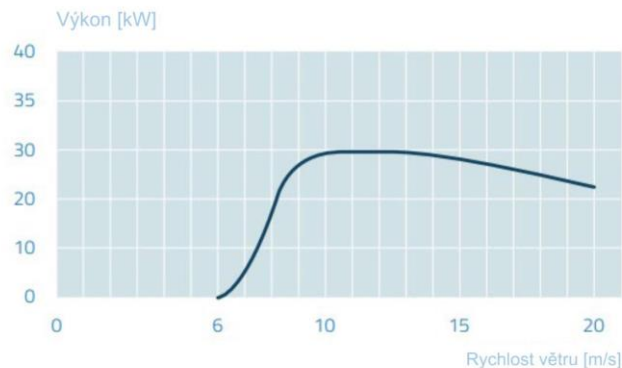


Obr. 4.11 Schematické znázornění
systému Hawk [47].

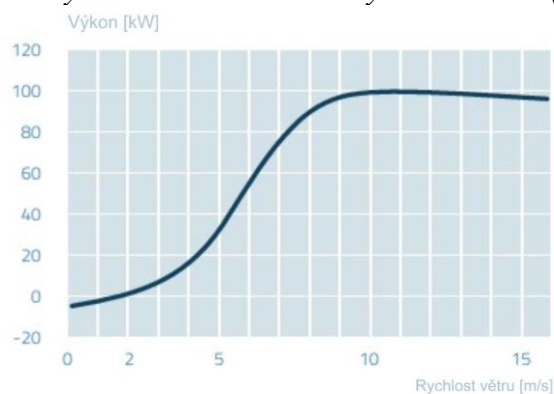


Obr. 4.12 Porovnání výkonu v závislosti na rychlosti větru systému Falcon a tradiční větrné elektrárny ([50], upraveno).

Délka jednoho cyklu je 100 sekund. Produkuje 40 kW po 80 % času cyklu během odvíjení a spotřebovává 10 kW po 20 % času cyklu během navíjení. Disponuje plně automatizovanými letovými schopnostmi v uzavřeném vzdušném prostoru. Vyžaduje místního pozorovatele letového provozu v otevřeném vzdušném prostoru. Zahrnuje nepřetržitý dálkový dohled během letů. Vyžaduje přítomnost personálu na místě při každém startu a přistání [47].



Obr. 4.13 Závislost výkonu draka Hawk na rychlosti větru ([47], upraveno).



Obr. 4.14 Závislost výkonu draka Falcon na rychlosti větru ([50], upraveno).

Je zajímavé porovnat mezi sebou systémy Falcon a Hawk, kdy je vidět na grafech na Obr. 4.13, Obr. 4.14, že Falcon má cut-in už při 2 m/s, přičemž Hawk až při 6 m/s. Ale minimální rychlost větru pro start pro oba druhy draka je až při 5 m/s.

4.2.5 SkySails Power

SkySails byla založena v roce 2001 s cílem vyvíjet zařízení pro využití energie větru ve vzduchu k podpoře pohonu lodí. V letech 2001 až 2006 testovala malé prototypy na různých plavidlech. V roce 2013 společnost SkySails vyvinula tažného draka pro lodě, který byl schopen nahradit až 2 MW výkonu pohonu. Tento drak o ploše 320 m² umožňuje snížit spotřebu paliva až o 10 tun ropy denně.

Firma následně rozšířila své zaměření na výrobu elektrické energie. V roce 2011 SkySails vyvinula 55kW prototyp pro výrobu elektřiny. Tento prototyp využívá *pumping cycle*. SkySails plánuje vývoj 1 MW offshore AWE zařízení, které by používalo draka o ploše 400 m² na laně dlouhém 1 000 m. Společnost měla také v plánu vybudovat první *offshore* AWE farmu s výkonem přes 7 MW na jedno zařízení [44].

Aktuálně prodáváný onshore drak je označován jako SKS PN-14. Tento systém je již dostupný k zakoupení, což z něj činí jeden z prvních AWE systémů připravených pro komerční nasazení. Systém může využívat větrnou energii ve výškách až 400 metrů, čímž čerpá silnější vítr. Může být použit v oblastech náchylných k hurikánům a tajfunům, protože ho lze snadno stáhnout a uložit před extrémními povětrnostními jevy [51].

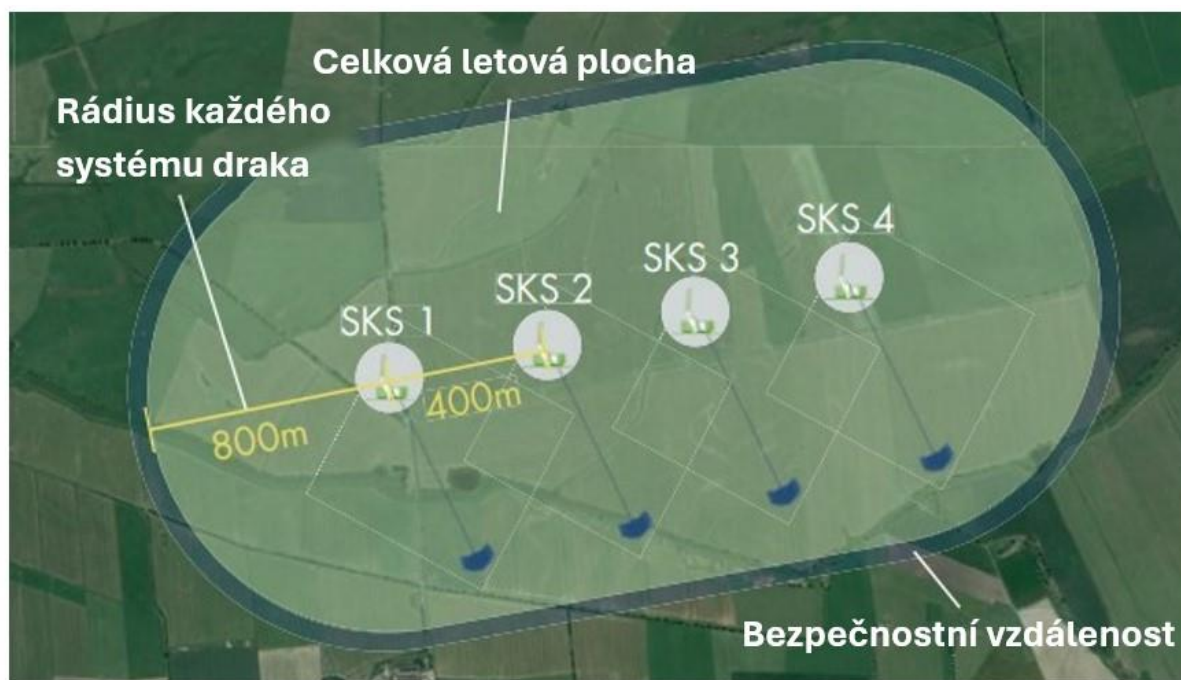
Na souši lze systém SkySails Power System nastavit jako mobilní nebo stacionární zařízení. Na moři jej lze zřídit na konvenčních nebo plovoucích základech. Systémy tak mohou být ukotveny ve velkých hloubkách až 700 m a díky osvědčené kotevní technice je lze snadno a rychle instalovat pomocí dostupných offshore montážních plavidel [52].



Obr. 4.15 Větrný drak od společnosti SkySails Power ([52], upraveno)

Tab. 4.3 Parametry draka SKS PN-14 [52].

Technická data SKS PN-14	Veličina
Jmenovitý výkon	80–200 kW
Provozní rychlost větru	4–25 m/s
Průměr lana	14 mm
Velikost draka	90–180 m ²
Délka lana	800 m



Obr. 4.16 Ukázka možnosti umístit vedle sebe více systémů od firmy SkySails a vytvořit tzv. AWE farmu ([53], upraveno).

5 Aerodynamický výpočet AWE systémů

Nejprve jsou uvedeny zprěsňené modely pro GG-AWE a FG-AWE. Tyto modely vycházejí z předpokladů o stabilním letu a zanedbatelné hmotnosti. Poté je odvozen unifikovaný model, který dokáže současně zpracovávat generaci energie na zemi i na palubě. Model uvedený v této kapitole má za cíl vyřešit hlavní charakteristiky a nejdůležitější fyzikální aspekty AWES s příčným větrem, aniž by se zabýval podrobnostmi jednotlivých subsystémů. Modely navržené v této práci jsou pouze reprezentativní pro tvrdé draky [4].

5.1.1 Aerodynamický výkon

Aerodynamický výkon je jedním z hlavních faktorů návrhu AWE systému, zejména jeho létajícího křídla. Klíčový je člen C_R (C_R/C_D)², který lze u aerodynamicky efektivních *crosswind* systémů přiblížit jako $C_L(C_L/C_D)$ ². Ten je zásadní pro dosažení maximální výroby výkonu. Roční výroba energie je vysoce závislá na aerodynamickém výkonu.

Existují dvě hlavní strategie návrhu:

Maximalizace *glide ratio* (C_L/C_D) – protože vstupuje ve druhé mocnině.

Maximalizace vztlakového součinitele (C_L) – protože vstupuje ve třetí mocnině, ovšem za cenu podstatného nárůstu odporu (C_D).

Druhá možnost byla navržena pro systémy s palubní výrobou elektřiny a implementována například pomocí dvojplošníku s pevným křídlem, podobnému prototypu Kitekraft, uvedeného v 4.1.4. Simulace uvedené v [38] ukázaly, že i přes vyšší odpor křídel a lana vedla tato konfigurace k vyšší výrobě energie a větším ekonomickým ziskům než jednoplošník. Navíc maximalizovala poměr pevnosti k hmotnosti konstrukce. Další studie ukázaly, že vyšší C_L vede k vyšší výrobě, ale je méně výhodný při nízkých větrech.

Naopak první strategie (nízký odpor a střední vztlak) se ukazuje jako lepší pro systémy s pozemní výrobou (*pumping-cycle*):

Ve fázi tahu je výhodný vysoký C_L .

Ve fázi navíjení je zásadní co nejnížší odpor, hlavně základní odpor C_{D_0} .

Tyto úvahy úzce souvisí s vlastnostmi profilu křídla. Pevná křídla mají podstatně lepší aerodynamický výkon než měkká křídla:

$C_L/C_D \sim 20\text{--}35$ pro pevná

$C_L/C_D \sim 4\text{--}10$ pro měkká [38].

5.2 Princip výroby energie z příčného větru

Většina systémů pro výrobu energie z větru vyskytujících se ve vzduchu se skládá z létajícího zařízení připojeného k základnové stanici prostřednictvím lana. Nejvyšší efektivita výroby energie je dosaženo při letu zařízení napříč větrem, kde je zjevná rychlost větru na křídle V_a maximalizována ve srovnání s rychlostí větru V_w při statickém letu $V_a=V_w$. Aerodynamická vztlaková síla je vyjádřena vzorcem:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A C_L V_a^2 \quad (5.1)$$

Kde ρ je hustota vzduchu, A představuje plochu křídla a C_L je koeficient vztlaku.

Při letu napříč větrem, kdy je V_a větší než V_w , dochází ke kvadratickému nárůstu napětí na laně. Vysoké rychlosti letu napříč větrem lze udržet díky proudění okolního vzduchu a lze je využít buď přímo, nebo prostřednictvím tahu lana pro výrobu energie [2].

Loyd odhaduje vyrobený výkon P za ideálních podmínek podle následujícího vzorce:

$$P = \frac{2}{27} \rho A V_w^3 C_L \left(\frac{C_L}{C_D} \right)^2 \quad (5.2)$$

kde A představuje plochu křídla, C_L a C_D jsou koeficienty vztlaku a odporu a v_w je rychlost větru. Poměr $\frac{C_L}{C_D}$, označovaný jako *gliding number* u letadel, je klíčovou vlastností křídla. Prototypový systém použitý v disertační práci [9] má například hodnoty koeficientů vztlaku a odporu $C_L=0,9$, $C_D=0,2$ při řízeném letu s pohonem a $C_L=0,2$, $C_D=0,1$ při letu bez pohonu.

V realističtější scénáři je součinitel odporu C_D zvýšen tak, aby zahrnoval odpor tažného lana. Kromě toho hmotnost systému AWE a lana, stejně jako mechanismy řízení letu, mají významný vliv na výkon, který může být z tohoto systému získán. Elektrický výkon je navíc nižší než teoreticky získaný výkon kvůli energetickým ztrátám při přeměně energie v generátoru.

Pro realistické modelování je také nutné zohlednit vliv kosinových ztrát na maximální výkon, který může být získán. Tento výkon závisí lineárně na rychlosti větru a aerodynamické síle na křídle, přičemž ztráty jsou redukovány podle kosinu úhlu γ mezi směrem větru a lanem. Tento úhel se navíc zvyšuje vlivem gravitačních efektů, které mají menší význam než vysoké napětí na laně. Při zohlednění větrných podmínek, které nejsou paralelní se zemí, je nutné provést projekci směru větru na aktivní povrch křídla, což zavádí dodatečnou závislost na kosinu umocněném na druhou. Výkon je tak snížen faktorem kosinu umocněným na třetí.

Výkon, který lze z tohoto systému získat, je tedy definován jako rozdíl mezi maximálním teoretickým výkonem a systémovými ztrátami. Nejmenší ztráty výkonu jsou způsobeny aerodynamickým odporem $P_D = V_a F_D$, kde F_D je aerodynamická odporová síla, jak je uvedeno ve vzorci 1.8 s použitím C_D . Výsledná rovnice P poskytuje horní mez pro využitelný výkon jakéhokoliv létajícího zařízení, které může získat energii z větrného pole, pokud nahradíme C_L obecným koeficientem výsledné aerodynamické síly C_R , přičemž jsou zohledněny například další příspěvky odporu (např. větrné turbíny na draku) a zanedbávány kosinové ztráty [9].

Teoreticky by moderní křídlo se součinitelem vztlaku $C_L=1$ a vnitřním součinitelem odporu $C_D=0,03$ a za podmínek větru o rychlosti $V_w=13$ m/s mohlo dosáhnout výkonu 217 kW na 1 m² křídla. Toto však není realistické, protože se ukazuje, že odpor lana je významný. Realističtější hodnota celkového součinitele odporu je například $C_D=0,07$ což vede k teoretickému výkonu $P=40$ kW na 1 m² křídla. Tato vysoká hustota výkonu zatím nebyla experimentálně dosažena žádnou ze společností AWE ani akademickým výzkumem [34].

5.3 Poměr vztlaku k odporu

Další možností, jak zvýšit vyrobený výkon, je zvýšení součinitele vztlaku C_L a snížení součinitele odporu C_D . Zdvojnásobení vztlakových schopností totiž vede k přímému zvýšení výkonu podle vztahu $\frac{C_L^3}{C_D^3}$. Vyšší vztlaková síla však zároveň vede i k vyšší odporové síle. Je to částečně způsobeno tím, že se narušuje větší objem proudícího vzduchu, což vede k vyšším třecím silám a tím i k vyššímu odporu. Poměr C_L/C_D , nazývaný *glide ratio*, vyjadřuje efektivitu jakéhokoliv povrchu v kapalném nebo plynném prostředí (v případě systémů AWE je to atmosféra) a používá se pro kvantifikaci výkonu jakékoliv vztlakové plochy v takovém prostředí. Protože vyrobený výkon je úměrný druhé mocnině poměru C_L/C_D , je poměr vztlaku k odporu klíčovým ukazatelem při výběru vzdušné platformy, například měkkého draka, pevného křídla, UAV, Magnusova válce atd. Výběr vzdušné platformy s vysokým poměrem C_L/C_D tedy přímo ovlivňuje schopnost systému vyrábět energii [34].

5.4 Základní fyzikální limity technologií využívajících energii výškového větru

Uvažujme konstantní vítr o rychlosti V_w . Celkový výkon P_{wind} , který letící křídlo z tohoto větrného pole odebírá, je dán součinem rychlosti větru V_w , velikosti aerodynamické síly R_a , kterou je křídlo tlačeno, a kosinu úhlu γ mezi směrem této síly a směrem větru:

$$P_{wind} = V_w R_a \cos(\theta) \quad [W] \quad (5.3)$$

Z této rovnice přímo plyne jednoduchý, ale zásadní závěr: žádné zařízení nemůže získávat energii z větru, pokud na něj nepůsobí složka síly proti směru větru. U většiny AWE zařízení není aerodynamická síla přesně rovnoběžná se směrem větru – dochází k tzv. kosinové ztrátě. U všech systémů s lanem je nutné, aby mělo určitou elevaci (úhel lana vůči horizontále), aby se zařízení dostalo do požadované výšky. Naštěstí pro umírněné úhly je kosinus stále blízky jedné. Například: při úhlu 45° je ztráta menší než 30 %, při 20° (běžné u optimalizovaných systémů) je ztráta jen asi 6 % – tedy zanedbatelná.

Tato rovnice představuje zásadní limit pro všechny koncepty AWE, u nichž lano stoupá téměř svisle vzhůru. V takových systémech je velká část aerodynamické síly využita pouze k překonání tíhy a tahu lana vzhůru, aniž by docházelo ke skutečnému odebírání energie z větru. Tyto systémy mají tedy velmi vysoké kosinové ztráty.

Druhým zdrojem kosinových ztrát je hmotnost samotného létajícího systému, která způsobuje, že výsledná aerodynamická síla musí svírat ještě větší úhel θ se směrem větru, než jaký je dán pouze elevací lana. Ve většině AWE systémů je tato složka kosinových ztrát zanedbatelná, ale může nabýt významu při nízkých rychlostech větru a u systémů, které mají vysoké účinné zatížení na jednotku výkonu, tedy u systémů s palubní výrobou energie, které nevyužívají ani aerostatický vztlak, ani příčný pohyb.

Z hlediska fyziky lze říci, že gravitaci lze kompenzovat velmi malou změnou náklonu křídla, přibližně o méně než 6 stupňů, což vede k poklesu tahové síly po směru větru o méně než 0,5 %. Dokonce i v případě, že by celková hmotnost systému představovala až třetinu aerodynamické síly, postačila by změna orientace křídla o 20 stupňů, přičemž ztráty způsobené gravitací by činily pouze asi 6 % [54].

5.5 Kosinová účinnost

Výkon P , který může drak generovat, je úměrný

$$P \sim \cos^3 \beta = \eta_{\cos}(\beta)$$

kde β je úhel mezi vektorem rychlosti větru a směrem přenosu trakčního výkonu, což je úhel elevace, pokud se předpokládá, že lano je napnuté, a $\eta_{\cos}(\beta)$ je tzv. kosinová účinnost neboli $1 - \eta_{\cos}(\beta)$ představuje kosinovou ztrátu.

Pokud je drak přivázan k zemi, pak $\beta > 0$. Při typickém elevačním úhlu $\beta \approx 30^\circ$ je kosinová účinnost už snížena na $\eta_{\cos}(30^\circ) \approx 0,65$. Při $\beta \approx 40^\circ$ což je hodnota použitá např. pro demonstrátor od Makani Power/Google, klesá účinnost dokonce na $\eta_{\cos}(40^\circ) \approx 0,45$.

Z toho plyne, že pokud je drak připevněn na vrchol věže – a výška věže odpovídá ideální výšce provozu draka, může být vyrobeno až přibližně $\frac{1}{\eta_{\cos}(40^\circ)} \approx 2,22$ -krát více energie a výkonu, tedy více než dvojnásobek. I u nižších věží může být kosinová účinnost, a tím i výkon a energetický výnos, významně zvýšena [36].

5.5.1 Kosinové ztráty způsobené gravitací

Zdrojem kosinových ztrát je hmotnost vzdušného systému, která způsobuje, že směr aerodynamické síly musí svírat s větrem ještě větší úhel θ , než jaký vyplývá pouze ze sklonu lana. Ve většině systémů je tato složka kosinových ztrát malá, ale může se stát významnou při nízkých rychlostech větru a u systémů s výraznou účinnou hmotností na jednotku výkonu – tedy u systémů vyrábějících elektřinu ve vzduchu, které nevyužívají ani aerostatický vztlak, ani pohyb napříč větrem.

V tomto kontextu je zajímavé provést jednoduchý výpočet, který ukazuje, že u zařízení využívajících příčný vítr je gravitační síla ve srovnání s obrovským tahem v laně zanedbatelná: pokud se předpokládá, že křídlo letí s rychlostí vzduchu přibližně $V_a = 70$ m/s a součinitel

vztaku je $C_L = 1$, potom podle vztaku (rovnice (5.1)) vychází tah lana F_L přibližně na 3000 N. Pokud předpokládáme, že jeden metr čtvereční pevného křídla váží přibližně 25 kg, pak na něj působí gravitační síla menší než 250 N, což je 12krát méně než tah v laně. Z toho plynou kosinové ztráty způsobené gravitací menší než 0,5 %. Podrobnější analýza by měla zahrnovat i hmotnost lana, která činí méně než 3 kg na metr čtvereční křídla při délce lana 1000 m – a kosinové ztráty přitom zůstávají pod 0,5 %.

Fyzikálně vzato lze vliv gravitace kompenzovat velmi malou změnou orientace křídla, menší než 6 stupňů, což vede ke snížení síly lana ve směru větru o méně než 0,5 %. I kdyby byla celková hmotnost systému výrazně vyšší, například odpovídající třetině aerodynamické síly, byla by nutná změna orientace křídla pouze 20 stupňů, což by vedlo ke kosinovým ztrátám způsobeným gravitací jen asi 6 %. To je důvod, proč lze gravitační vliv často zanedbat při odhadech výkonu systémů pro získávání větrné energie ze vzduchu [54].

Pokud předpokládáme, že lano je zcela napnuté, a tedy síla R_a je v rovnováze s tahovou silou v lanu (jak to předpokládal Loyd), pak skutečný celkový výkon P_{wind} , který může letící křídlo získat z větrného pole, je dán rovnicí:

$$P_{wind} = V_w R_a \cos \beta \quad [W] \quad (5.4)$$

[38].

5.5.2 Průměrná kosinová účinnost

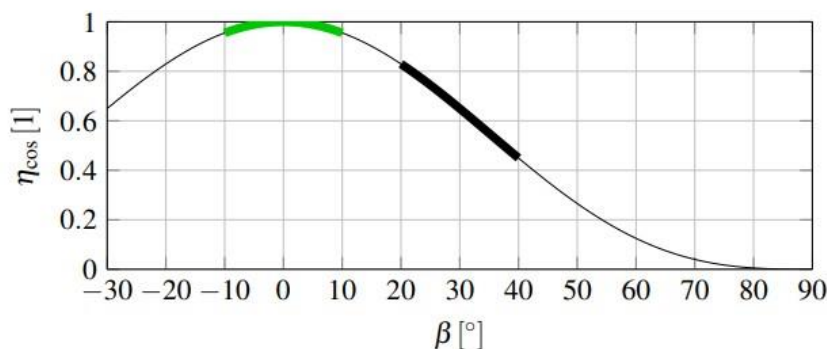
Oblast $\beta \in [20^\circ, 40^\circ]$ je vyznačena tučnou černou čarou a představuje průměrnou elevaci $\beta \approx 30^\circ$, což odpovídá draku ukotvenému k zemi.

Oblast $\beta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ je vyznačena tučnou zelenou čarou a odpovídá průměrné elevaci $\beta \approx 0^\circ$, což představuje draka ukotveného na věži, kde výška věže odpovídá průměrné provozní výšce draka.

Průměrná kosinová účinnost (tj. přes celou letovou dráhu při dané rychlosti větru) se určuje vztahem:

$$\eta_{cos} := \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \eta_{cos}(\beta) dt \quad (5.5)$$

kde t_0 je počáteční čas a T je perioda.



Obr. 5.1 Graf rovnice (5.7) pro $\beta \in [-30^\circ, 90^\circ]$ [36].

Předpokládejme, že drak letí po kruhové nebo osmičkové trajektorii, kde platí:

$$\beta - \Delta\beta_{max} \leq \beta \leq \beta + \Delta\beta_{max} \quad (5.6)$$

s maximální odchylkou elevace v důsledku trajektorie $\Delta\beta \approx 10^\circ$, nebo méně. Dále předpokládáme, že rychlost draka je přibližně konstantní.

Pak je průměrná elevace (tj. přibližně výška středu kruhu nebo průsečíku osmičky) vhodná pro odhad $\bar{\eta}_{\cos}$, jak je patrné z Obr. 5.1, a lze učinit následující předpoklad:

Průměrnou kosinovou účinnost $\bar{\eta}_{\cos}$ lze přibližně určit jako kosinovou účinnost při průměrné elevaci $\bar{\beta}$,

$$\eta_{\cos} \approx \eta_{\cos}(\beta) = \cos^3 \beta \quad (5.7)$$

5.6 Betzův limit

Je známo, že existuje teoretický limit množství energie, kterou lze z volného proudění získat – tzv. Betzův–Žukovského limit, odvozený z *Actuator Disc Theory*. Tento model představuje zjednodušenou reprezentaci rotoru nebo obecně jakéhokoli zařízení, které z proudu odebírá energii. Výkonový koeficient C_p (poměr výkonu získaného z proudu ku výkonu dostupnému na stejné ploše) je dán vztahem:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (5.8)$$

kde a je indukční faktor – míra zpomalení proudu proudícího diskem. Maximum $C_p = 16/27$ je dosaženo při $a = 1/3$.

Protože CKPS je podobný klasické větrné turbíně, nabízí se využít tuto teorii i zde. Nicméně někteří autoři (např. Loyd) zpochybňují její použití na draky – tvrdí, že indukční efekt draka (tedy zpomalení větru) je zanedbatelný, a že účinnost odpovídající aktivačního disku je jen několik procent. Jiný autor uvádí, že hodnota C_p pro AWE systémy není známá, a zpochybňuje platnost Betzova limitu, protože koncept disku zde nelze aplikovat. Podobně Costello et al. tvrdí, že Betzův limit nelze smysluplně použít na draky, protože zabírají velkou plochu, ale využívají jen malou část dostupné energie [55].

5.7 Rovnice výkonu pro Ground-gen AWE

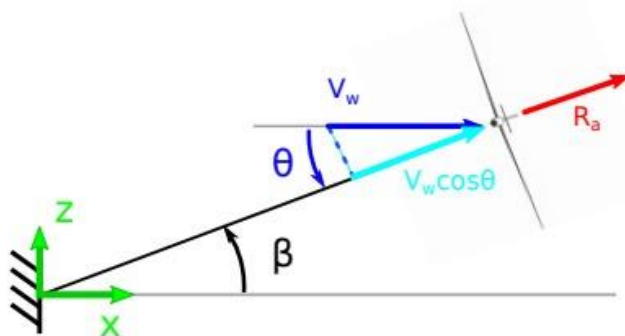
V této sekci jsou zobrazeny hlavní kroky zpřesněné derivace rovnice výkonu pro GG-AWE navržené Loydem. Cílem této kapitoly je seznámit čtenáře s terminologií a představit hlavní fyzikální principy, které budou použity později v této kapitole. Hlavní předpoklady této derivace jsou:

1. Externí síly působící na draka jsou považovány za vyvážené a síly setrvačnosti jsou zanedbatelné. V této analýze jsou hmotnost a trajektorie zanedbány. Nicméně, v mnoha efektivních systémech mají tyto efekty během fáze produkce malý vliv.
2. Lano je považováno za přímé a bez hmotnosti.
3. Rovnice výkonu popisuje pouze fázi produkce. Při zohlednění celého cyklu je výkon nižší [4].

5.7.1 Aerodynamické síly

S ohledem na Obr. 5.2, vítr fouká zleva doprava (podél osy x) a drak se pohybuje mimo stránku (podél osy y). Rychlost větru, kterou drak vnímá, je snížena o faktor $\cos(\theta)$, kde θ představuje sklon lana v místě spojení s drakem:

$$V_{w\parallel} = V_w \cos(\theta) \quad [m/s] \quad (5.9)$$



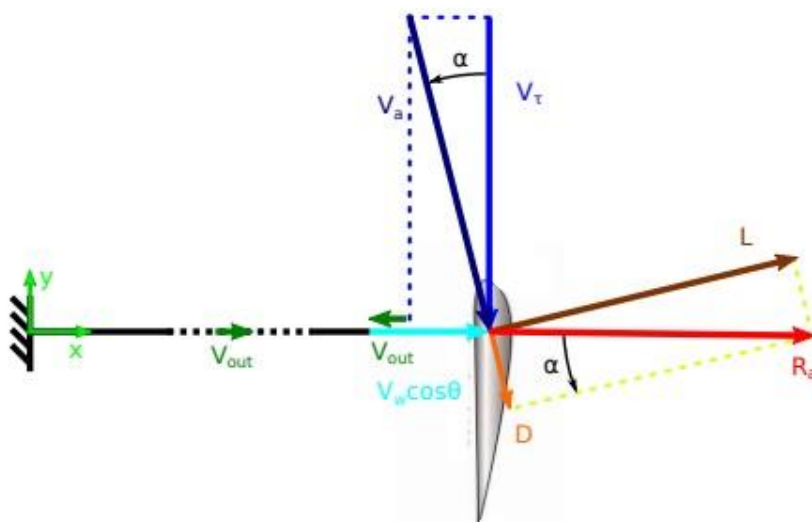
Obr. 5.2 Výška úvazku a relativní rychlost větru z pohledu od draku [4].

Při pohledu na Obr. 5.3, L představuje vztlak draku, D je odpor a R_a je výsledná aerodynamická síla. Síla lana T je rovna výsledné aerodynamické síle R_a . Rychlost odvíjení lana V_{out} je definována jako: $V_r = V_{w\parallel} - V_{out}$, což je rychlost větru podél směru lana pozorovaná z draku. Výkon pro GG-AWE lze získat vynásobením síly lana T a rychlosti odvíjení lana V_{out} [4] [56]:

$$P_{GG} = TV_{out} \quad [W] \quad (5.10)$$

Je dobře známo, že let ve směru napříč větrem s rychlostí $-\vec{V}_\tau$, jak je znázorněno Obr. 5.3, která je vyšší než skutečná rychlost větru \vec{V}_w (předpokládáme rovnoměrnou a konstantní rychlost, rovnoběžnou s povrchem země), maximalizuje výkon. Křídlo i lano „vidí“ proudění vzduchu s výslednou rychlostí $\vec{V}_a = \vec{V}_w + \vec{V}_\tau$, jejíž velikost může být podstatně větší než \vec{V}_w .

Tímto způsobem jsou ve srovnání s generováním bez pohybu napříč větrem aerodynamické síly vztlaku (L) a odporu (D) silnější, což poskytuje jeden až dva řády vyšší výkon. Tyto veličiny jsou na Obr. 5.3 znázorněny jako výsledné síly působící v jednom bodě (tlakové centrum) a jsou definovány rovnicí (5.11) [38].



Obr. 5.3 Rychlostní trojúhelník a aerodynamické síly při pohledu shora pro GG-AWE [4].

Při předpokladu, že systém je v rovnováze, je R_a v opačném směru než lano a D je rovnoběžný s relativní rychlostí V_a , lze nalézt následující poměr:

$$\frac{L}{D} = \frac{\frac{1}{2} \rho_{air} A C_L V_a^2}{\frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_a^2} = \frac{C_L}{C_d} = \frac{V_\tau}{V_r} \quad [1] \quad (5.11)$$

kde ρ_{air} je hustota vzduchu, A je plocha křídel draka, C_L a C_d jsou koeficienty vztlaku a odporu draka a V_a je relativní rychlost větru pozorovaná z draka.

Tangenciální rychlost V_τ lze vyjádřit jako funkci větrné rychlosti, aerodynamických koeficientů a rychlosti vytažení lana:

$$V_\tau = V_r \cdot \frac{C_L}{C_d} = (V_{w\parallel} - V_{out}) \cdot \frac{C_L}{C_d} \quad [m/s] \quad (5.12)$$

Definováním poměru *glide ratio* $Ge = \frac{C_L}{C_d}$ je relativní rychlost:

$$\begin{aligned} V_a^2 &= (V_{w\parallel} - V_{out}) \cdot G_e^2 + (V_{w\parallel} - V_{out})^2 \\ &= (V_{w\parallel} - V_{out})^2 \cdot (1 + G_e^2) \quad [m/s] \end{aligned} \quad (5.13)$$

Síla lana, jako funkce rychlosti vytažení, je:

$$T = R_a = \sqrt{L^2 + D^2} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d (V_{w\parallel} - V_{out})^2 (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [N] \quad (5.14)$$

Výkonovou rovnicí lze nyní odvodit:

$$P_{GG} = T V_{out} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d (V_{w\parallel} - V_{out})^2 V_{out} (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W] \quad (5.15)$$

Derivací P_{GG} podle V_{out} lze dokázat, že maximální výkon je dosažen při $V_{out} = \frac{V_{w\parallel}}{3}$. Maximální výkon je:

$$P_{GG,max} = \frac{4}{27} P_w \cos(\theta^3) A C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W] \quad (5.16)$$

kde výkonová hustota je:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^3 \quad [W/m^2] \quad (5.17)$$

Při zohlednění vysokých *glide ratio* lze výkon přibližně vyjádřit jako:

$$P_{GG,max} \approx \frac{4}{27} P_w \cos(\theta^3) A C_L G_e^2 \quad [W] \quad (5.18)$$

Když je maximální výkon produkován ($V_{out} = \frac{V_{w\parallel}}{3}$), síla lana:

$$T_{GG,\max} = \frac{2}{9} \rho_{\text{air}} A V_w^2 \cos(\theta^2) C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [N] \quad (5.19)$$

[4].

5.7.2 Konečná aerodynamika křídla

Pro modelování konečné aerodynamiky křídla je uvažována Prandtlova teorie vztlakové čáry. Tato teorie umožňuje určit vztlakový a odporový součinitel křídla na základě vlastností profilu a štíhlosti křídla (aspect ratio) $AR = \frac{s^2}{A}$ (poměr druhé mocniny rozpětí k ploše draka).

Při předpokladu eliptického křídla je rozložení vztlaku podél rozpětí rovněž eliptické a rychlost indukovaného proudu (downwash) je konstantní po celé délce křídla. Pokud se uvažují tenké profily, sklon vztlakového součinitele C_L vůči úhlu náběhu (α_0) lze aproximovat jako přibližně $\alpha_0 \approx 2\pi$.

Za těchto předpokladů má odpor letounu složku indukovaného odporu, která je funkcí druhé mocniny vztlakového součinitele a štíhlosti křídla. Indukovaný odporový součinitel lze vyjádřit jako:

$$C_{di} = \frac{C_L^2}{\pi AR e} \quad [1] \quad (5.20)$$

Kde e je Oswaldova (Oswald efficiency factor), účinnost, běžně uvažována jako 0,9 [4]. Je to závislost efektivity tvaru půdorysu křídla e , na štíhlostním poměru (AR) pro obdélníková křídla $AR > 3$ ve tvaru:

$$e = 1,78(1 - 0,045AR^{0,68}) - 0,64 \quad [1] \quad (5.21)$$

Pro obtékaná (*swept*) křídla pro $4 < AR < 15$:

$$e = \frac{2}{2 - AR + \sqrt{4 + AR^2(1 + \tan^2(\Lambda_{tmax}))}} \quad [1] \quad (5.22)$$

Kde Λ_{tmax} je *swept* úhel pro maximální tloušťku [57].

Tento vztah vychází z empirických dat z letadel. Vyšší provozní součinitel vztlaku C_L a nižší štíhlostní poměr (AR) vedou ke zvýšení indukovaného odporu, a naopak.

Pro přímé nekonečné křídlo $e = 1$. Neideální tvary zatížení pro ploché křídlo způsobují, že Oswaldova účinnost je menší. Eliptická křídla, například winglety, mohou mít $e > 1$ [4].

5.7.3 Dodatečný odpor způsobený lanem

Vzhledem k tomu, že výkon roste s kvadrátem G_e (glide ratio), je třeba věnovat zvláštní pozornost jeho odhadu. Součinitel odporu reprezentuje odpor celého systému, nikoli pouze samotného draka. Proto je třeba zohlednit i příspěvek od lana.

Normálová síla působící na jednotkovou délku lana (podle principu příčného (crossflow) proudu) je dána:

$$dF = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} d C_{\perp} V_n^2 \quad [N] \quad (5.23)$$

kde d je průměr lana, C_{\perp} je aerodynamický součinitel kolmého odporu lana a V_n je příčná rychlost lana.

Rychlost V_n je rovna V_{τ} na úrovni draka a nulová u země, tedy:

$$V_n = V_{\tau} \frac{l}{r} \quad [m/s] \quad (5.24)$$

kde r je délka lana a l je podélná souřadnice lana.

Ekvivalentní síla působící na draka může být nalezena tak, že se vyrovná (porovná) moment síly (točivý moment) vzhledem k bodu generátoru:

$$F_{tether} r = \frac{1}{2} \rho_{air} d C_{\perp} \int_0^r \left(V_{\tau} \frac{l}{r} \right)^2 l dl \quad [N] \quad (5.25)$$

Po integraci získáme výslednou sílu, kterou působí drak na lano směrem k navijecímu bodu (generátoru):

$$F_{tether} = \frac{1}{2} \rho_{air} d C_{\perp} \frac{V_{\tau}^2 r}{4} \quad [N] \quad (5.26)$$

Dodatečný součinitel odporu způsobený lanem pak je:

$$C_{d,tether} = C_{\perp} \frac{d r}{4A} \quad [1] \quad (5.27)$$

kde lano o délce r , s průřezem o šířce d a s kolmým součinitelem odporu C_{\perp} .

Nakonec lze celkový součinitel odporu systému vyjádřit jako:

$$C_d = C_{d0} + \frac{C_L^2}{\pi A Re} + C_{\perp} \frac{d r}{4A} \quad [1] \quad (5.28)$$

C_{d0} je součinitel odporu při nulovém vztlaku draka. Profilový odpor C_{D0} je způsoben viskózními efekty a v lineární oblasti závislosti $C_L(\alpha)$ (před odtržením proudu) ho lze považovat za konstantní. Druhý člen představuje vztlakový indukovaný odpor uvedený v předchozí sekci 5.7.2 [4] [56].

5.7.4 Úhel elevace a prověšení lana

Prověšení lana lze určit na základě hmotnosti na jednotku délky lana a normálové síly. Hmotnost na jednotku délky je:

$$m_r = A_{\sigma} \rho_{\sigma} + \eta_{is} A_{el} \rho_{el} \quad [kg] \quad (5.29)$$

Kde A_{σ} je průřezová plocha nesoucí zatížení, A_{el} je průřezová plocha elektrického kabelu přenášejícího výkon generovaný na palubě, η_{is} zohledňuje izolační vrstvu potřebnou pro kabel, ρ_{σ} a ρ_{el} jsou hustoty strukturálního a elektrického materiálu.

Pro modelování sklonu lana u připojení k drakovi je prověšení lana aproximováno parabolou. Použití paraboly namísto katenoidy (řetězovky) je dobrá aproximace při malém prověšení. Při použití rovnice paraboly $z = ax^2 + bx$ je člen a určen jako:

$$a = \frac{m_r g}{2T} \quad [1] \quad (5.30)$$

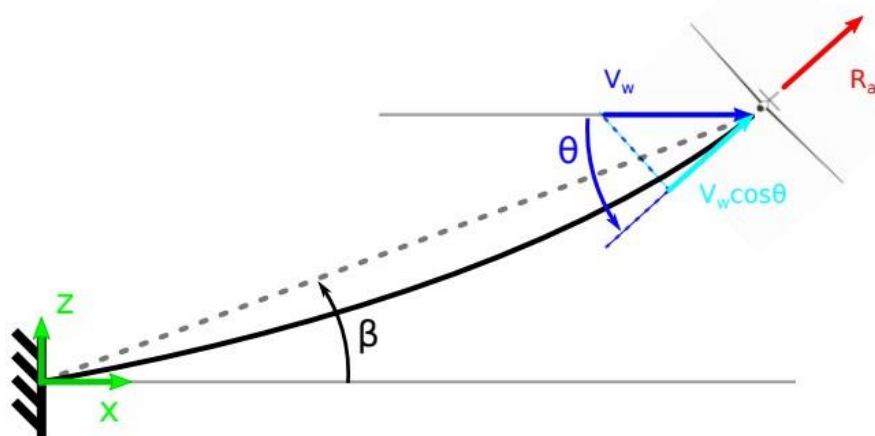
kde T je tah v laně a g je gravitační zrychlení.
Člen b je:

$$b = \frac{\tan \beta}{2a} - \frac{r \cos \beta}{2} \quad [1] \quad (5.31)$$

Nakonec úhel mezi lanem a osou x v bodě připojení k drakovi je:

$$\theta = \arctan(2a(r \cos \beta + b)) \quad [^\circ] \quad (5.32)$$

[4].



Obr. 5.4 Elevace lana β [$^\circ$], rychlost větru a celková aerodynamická síla na draka letícího příčně vůči větru se zohledněním prověšení lana. θ [$^\circ$] je sklon lana u připojení k drakovi [4].

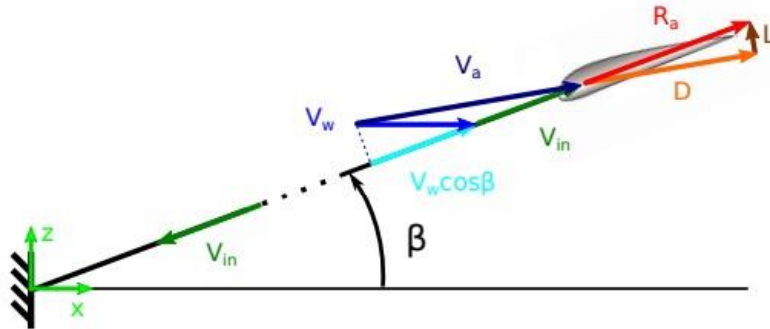
5.7.5 Vliv fáze navíjení lana

Protože u *Ground-gen* systému se celý cyklus skládá z produkční fáze (odvíjení lana) a rekuperační fáze (navíjení zpět), pro maximalizaci výkonu cyklu by měla být rovnice výkonu výrobních a regeneračních fází zahrnuta do jednoho modelu. Pokud vezmeme v úvahu rovnici (5.15), může být použit bezrozměrný součinitel odvíjení $\gamma_{out} = \frac{V_{out}}{V_w}$ pro vyjádření výkonové rovnice během fáze výroby:

$$P_{pr} = P_w A \gamma_{out} (\cos(\theta) - \gamma_{out})^2 C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W] \quad (5.33)$$

kde:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^3 \quad [W/m^2] \quad (5.34)$$



Obr. 5.5 Rychlostní trojúhelník a aerodynamické síly během fáze navíjení. β [°] je elevace lana [4].

Pro fázi navíjení existuje více strategií; ta, která je modelována v této práci, je možná pouze pro pevného draka. Předpokládá se, že drak je navrácen do výchozí polohy po přímé trajektorii (Obr. 5.5). Toto řešení není vhodné pro měkkého draka, protože křídlo nelze v této konfiguraci správně nasměrovat a síly při navíjení by byly příliš vysoké pro efektivní celkovou výrobu energie. Přechodové fáze mezi výrobní a návratovou fází jsou zanedbány. Relativní rychlost vnímaná z pohledu draka je:

$$V_a^2 = V_w^2 + V_{in}^2 + 2V_w V_{in} \cos(\beta) \quad [m/s] \quad (5.35)$$

Kde $V_{in} = \gamma_{in} V_w$. Předpokládá se, že během navíjení je drak v rovnováze, takže výsledná aerodynamická síla R_a je rovnoběžná s lanem, zatímco odporová síla D je rovnoběžná s relativní rychlostí V_a .

$$\frac{L}{D} = \frac{V_w \sin(\beta)}{V_w \cos(\beta) + V_{in}} = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta) + \gamma_{in}} \quad [1] \quad (5.36)$$

Síla v laně během navíjení je pak:

$$T_r = \sqrt{D^2 + L^2} = D \sqrt{1 + \left(\frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta) + \gamma_{in}} \right)^2} \quad [N] \quad (5.37)$$

Vzhledem k tomu, že β je obvykle menší než 30° a γ_{in} je obvykle větší než 1, je dobrou aproximací $R_a \approx D$:

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{1}{2} \rho_{air} A C_{d0} (V_w^2 + V_{in}^2 + 2V_w V_{in} \cos(\beta)) \\ &= \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 A C_{d0} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\beta)) \quad [N] \end{aligned} \quad (5.38)$$

Výkon spotřebovaný během navíjení lana je součin této síly a rychlosti navíjení:

$$P_r = P_w A C_{d0} \gamma_{in} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\beta)) \quad [W] \quad (5.39)$$

Průměrný výkon za cyklus může být nakonec odvozen, pokud vezmeme v úvahu, že poměr mezi dobou fáze výroby a zotavení je úměrný poměru mezi rychlostmi vyvíjení a navíjení. Poměr doby strávené v produkční fázi τ_{out} a v rekuperační fázi τ_{in} je:

$$\tau_{out} = \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} [1], \quad \tau_{in} = \frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} [1] \quad (5.40)$$

Průměrný výkon za cyklus může nyní být odvozen podle rovnice (5.33):

$$\begin{aligned} P_{cycle} &= P_{pr}\tau_{out} - P_r\tau_{in} \\ &= P_w A [(\cos(\theta) - \gamma_{out})^2 C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \\ &\quad - C_{d0}(1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\beta))] \left(\frac{\gamma_{in}\gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \right) [W] \end{aligned} \quad (5.41)$$

Maximální hodnota průměrného výkonu během cyklu je pak maximální hodnota funkce $P_{cycle}(\gamma_{in}, \gamma_{out})$ [4].

5.7.6 Další ztráty

Pro modelování účinnosti přeměny mechanické energie na elektrickou a pro zohlednění ztrát způsobených trajektorií se zavádějí některé účinnostní faktory.

Během fáze odvíjení (*reel-out*) jsou ztráty způsobené konverzí vyjádřeny jako:

$$\eta_{out} = \eta_{gen}\eta_{tr} [1] \quad (5.42)$$

kde η_{gen} je účinnost elektrického generátoru a η_{tr} je účinnost trajektorie.

Během fáze navíjení (*reel-in*) jsou ztráty způsobené motorem a bateriemi na zemi, které ukládají energii, vyjádřeny jako:

$$\eta_{in} = \eta_{mot}\eta_{batt} [1] \quad (5.43)$$

kde η_{mot} je účinnost generátoru používaného jako motor a η_{batt} je účinnost ukládání energie využívané během navíjení, pokud je tato strategie použita. Tato účinnost η_{in} může být dále snížena kvůli přechodovým fázím a nižší přesnosti modelu, což vede k nižší celkové účinnosti.

Nakonec lze výkon cyklu vyjádřit rovnicí:

$$\begin{aligned} P_{cycle} &= P_w A \left[\eta_{out}(\cos(\theta) - \gamma_{out})^2 C_d (1 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{C_{d0}}{\eta_{in}} (1 + \gamma_{in}^2 \right. \\ &\quad \left. + 2\gamma_{in} \cos(\beta)) \right] \left(\frac{\gamma_{out}\gamma_{in}}{\gamma_{out} + \gamma_{in}} \right) [W] \end{aligned} \quad (5.44)$$

[4].

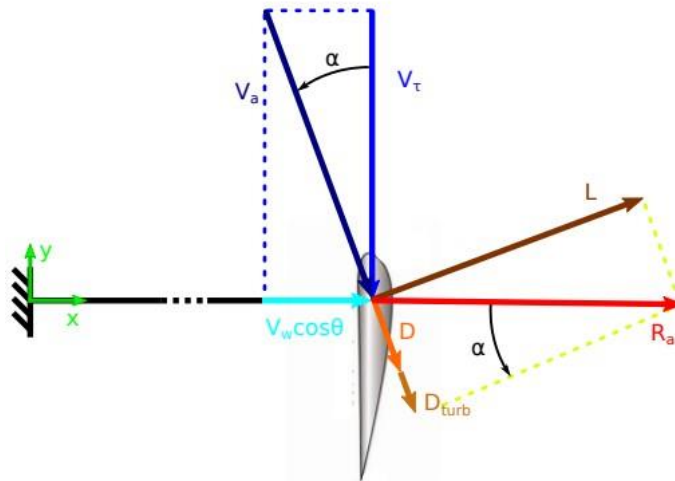
5.8 Rovnice výkonu pro Fly-gen AWE

Výkonová rovnice pro FG-AWE může být odvozena za použití stejných předpokladů, jaké byly uvedeny na začátku sekce 5.7 [4].

5.8.1 Odvození

S ohledem na Obr. 5.6 vítr vane zleva doprava (podél osy x) a drak se pohybuje směrem ven z roviny obrázku (podél osy y). Rychlost větru vnímaná drakem je snížena faktorem $\cos(\theta)$, kde θ představuje úhel naklonění lana v místě spojení s drakem:

$$V_{w\parallel} = V_w \cos(\theta) \quad [m/s] \quad (5.45)$$



Obr. 5.6 Rychlostní trojúhelník a rovnováha sil pro systém Fly-gen AWE [4].

Přítomnost turbín na draku, které generují výkon, může být modelována jako dodatečná odporová síla D_{turb} působící na drak. Maximální možný výkon je dán jako:

$$P_{FG} = D_{turb} V_a \quad [W] \quad (5.46)$$

Vzhledem k tomu, že systém je v rovnováze, aerodynamická síla R_a je opačně orientovaná než tah v laně, a síly D a D_{turb} jsou rovnoběžné s relativní rychlostí V_a . Lze tedy odvodit následující poměr:

$$\frac{L}{D + D_{turb}} = \frac{\frac{1}{2} \rho_{air} A C_L V_a^2}{D + D_{turb}} = \frac{V_\tau}{V_{w\parallel}} \quad [1] \quad (5.47)$$

kde L je vztlak a D je aerodynamický odpor. Síla D_{turb} může být vyjádřena podle referenční plochy draku A následovně:

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_{d,turb} V_a^2 \quad [N] \quad (5.48)$$

Definujme poměr:

$$\gamma_t = \frac{D_{turb}}{D_{kite}} = \frac{C_{d,turb}}{C_d} \quad [1] \quad (5.49)$$

Relativní rychlost větru na draku pak je:

$$V_a^2 = V_{w\parallel}^2 + \left(\frac{D_{kite} + D_{turb}}{L} V_{w\parallel} \right)^2 = V_{w\parallel}^2 \left(1 + \left(\frac{1 + \gamma_t}{G_e} \right)^2 \right) \quad [m/s] \quad (5.50)$$

Z rovnice (5.46) plyne ideální výkon generovaný FG-AWE:

$$P_{FG} = \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A C_{d,turb} V_{w\parallel}^2 \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right) \right) \left(V_{w\parallel} \sqrt{1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2} \right) \quad [W] \quad (5.51)$$

Tuto rovnici lze zjednodušit jako:

$$P_{FG} = P_w A \gamma_t C_d \cos(\theta^3) \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right)^{3/2} \quad [W] \quad (5.52)$$

kde $P_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^3$ je hustota větrného výkonu.

Vypočítáme-li derivaci P_{FG} podle γ_t , lze ukázat, že pro vysoké hodnoty *glide ratio* je maximální výkon dosažen, když $D_{turb} = \frac{1}{2} D_{kite}$, tedy $\gamma_t = \frac{1}{2}$. Maximální výkon potom je:

$$P_{FG,max} \approx \frac{4}{27} P_w A \cos(\theta^3) C_L G_e^2 \quad [W] \quad (5.53)$$

Lze si všimnout, že tato rovnice je shodná s rovnicí pro GG-AWE za předpokladu vysokého *glide ratio*.

Síla v laně se dá odvodit pomocí vektorového součtu sil vztlaku a odporu:

$$T = \frac{1}{2} \rho_{air} A \sqrt{(C_d(1 + \gamma_t))^2 + C_L^2 V_{w\parallel}^2} \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right) \quad [N] \quad (5.54)$$

Alternativně (za předpokladu vyjádření přes P_w):

$$T = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 A C_d (1 + \gamma_t) \cos(\theta^2) \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right)^{3/2} \quad [N] \quad (5.55)$$

Maximální síla v laně (pro $\gamma_t = \frac{1}{2}$ a vysoké G_e) je:

$$T_{FG,max} \approx \frac{2}{9} \rho_{air} A C_L G_e V_w^2 \cos(\theta^2) \quad [N] \quad (5.56)$$

[4].

5.8.2 Dodatečný odpor kvůli lanu a prohnutí lana

Vliv lana na celkový odpor a jeho prohnutí je stejný jako u GG-AWE, takže lze použít rovnice z kapitol 5.7.2, 5.7.3, 5.7.4 [4].

$$V_a^2 = V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2) [m/s] \quad (5.60)$$

Obecný výraz pro aerodynamickou sílu lze získat vektorovým součtem vztlakových a odporových sil:

$$R_a = \sqrt{(D + D_{turb})^2 + L^2} = \frac{1}{2} \rho_{air} A \sqrt{C_L^2 + (C_d + C_{d,turb})^2} V_a^2 [N] \quad (5.61)$$

což lze napsat jako:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} [N] \quad (5.62)$$

Odporová síla způsobená turbínami D_{turb} je:

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_a^2 [N] \quad (5.63)$$

což lze přepsat jako:

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2) [N] \quad (5.64)$$

Výkon generovaný na zemi P_{gr} lze vyjádřit jako součin síly lana T a rychlosti odvíjení V_{out} :

$$\begin{aligned} P_{gr} &= \left[\frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{3/2} \right] [V_w \gamma_{out}] \quad (5.65) \\ &= \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^3 \gamma_{out} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} [W] \end{aligned}$$

Výkon generovaný na palubě draka P_{ob} lze vyjádřit jako součin odporu produkovaného palubními turbínami D_{turb} a relativní rychlosti V_a :

$$\begin{aligned} P_{ob} &= \left[\frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2) \right. \\ &\quad \left. + G_e^2 \right] \left[V_w \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right) \sqrt{(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2} \right] \quad (5.66) \\ &= \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^3 \gamma_t \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} [W] \end{aligned}$$

Celkový výkon během fáze výroby je součtem P_{gr} a P_{ob} :

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho_{air} A V_w^3 C_d \left((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2 \right)^{3/2} \left[\gamma_{out} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 + \gamma_t \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 \right] [W] \quad (5.67)$$

Pro vysoký *glide ratio* může být tato rovnice formulována takto:

$$P_{out} \approx \frac{1}{2} \rho_{air} A C_L G_e^2 V_w^3 \left[\gamma_{out} \left(\cos(\theta) - \frac{\gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 + \gamma_t \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 \right] [W] \quad (5.68)$$

Dále lze dokázat, že výkonová rovnice pro GG-AWE a FG-AWE jsou speciálními případy této obecné výkonové rovnice. Příklad s $\gamma_t=0$ a $\gamma_{out} = \frac{\cos(\theta)}{3}$ popisuje maximální výkon pro GG-AWE, zatímco $\gamma_t = \frac{1}{2}$ a $\gamma_{out}=0$ popisují výkon pro FG-AWE.

Nakonec by měla být zvažena fáze zpětného získávání energie (5.7.5). Rovnice (5.38) je pak nutná pro modelování výkonu během fáze navíjení.

Průměrný výkon během cyklu je tedy:

$$P_{cycle} = \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \cdot P_{out} - \frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A V_w^3 \gamma_{in} C_{d0} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\theta)) \right) [W] \quad (5.69)$$

Konečně, s ohledem na rovnici (5.67) může být výkonová rovnice pro obecný systém s příčným větrem AWE napsána jako:

$$P_{cycle} = \frac{1}{2} \rho_{air} A V_w^3 \left[C_d \left((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2 \right)^{3/2} \left(\left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 + \frac{\gamma_t}{\gamma_{out}} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 \right) - C_{d0} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\theta)) \right] \cdot \frac{\gamma_{in} \gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} [W] \quad (5.70)$$

[4].

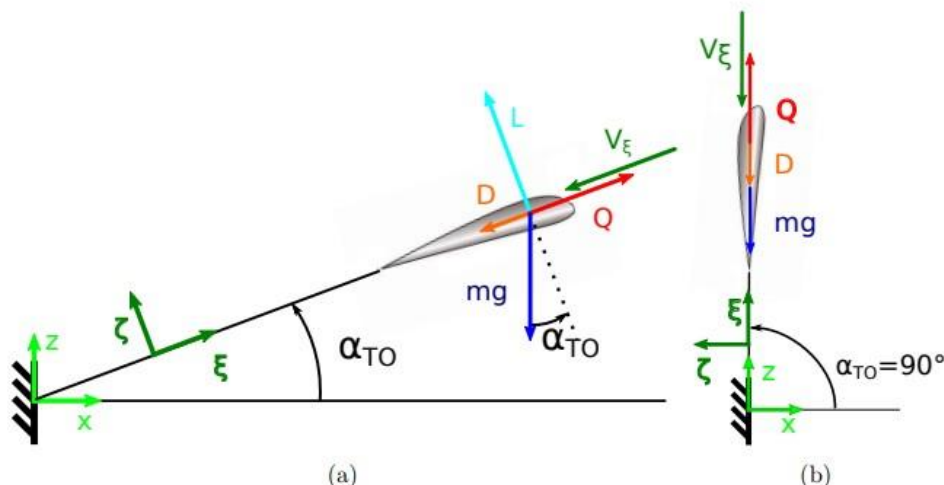
5.10 Model vzletu

Také anglicky *take-off* model. Cílem tohoto modelu je odhadnout dodatečnou hmotnost na palubě potřebnou pro vzlet a určit, která strategie vzletu je z hlediska systému výhodnější.

Pro pevné draky se v literatuře zkoumají tři strategie vzletu: vertikální vzlet pomocí rotorů, rotační vzlet a lineární vzlet s palubními vrtulemi. Literatura ukazuje klíčové rovnice těchto tří metod v souvislosti s GG-AWE. Porovnáním potřebného výkonu, dodatečné hmotnosti a plochy na zemi potřebné pro vzlet autor literatury [4] dospívá k závěru, že vertikální a lineární vzlet jsou výhodnější než rotační. Z tohoto důvodu jsou v této práci zvažovány pouze tyto dvě strategie.

Pro zahrnutí vzletu do optimalizačního problému je vertikální a lineární model sloučen do jednoho modelu. Stoupání může být charakterizováno stoupacím úhlem α_{TO} , který může nabývat nízkých hodnot (simulující lineární vzlet) až po $\alpha_{TO}=90^\circ$, což reprezentuje vertikální vzlet. Systém se považuje v rovnováze a počáteční fáze zrychlení je zanedbána.

V této práci jsou analyzovány pouze vzletové manévry využívající palubní pohon, protože tyto řešení se běžně používají s tuhými křídly



Obr. 5.8 Síly působící při lineárním (a) a vertikálním (b) vzletu [4].

Během stoupání je drak v rovnováze (Obr. 5.8a,b), a sílová bilance vzhledem k souřadnému systému (ξ, ζ):

$$Q = D + mg \sin(\alpha_{TO}) \quad [N] \quad (5.71)$$

$$L = mg \cos(\alpha_{TO}) \quad [N] \quad (5.72)$$

kde Q je tah od vrtulí, D a L jsou aerodynamický odpor a vzlak, m je letová hmotnost, g je gravitační zrychlení.

Tah Q může být zajištěn:

- turbínami na palubě v režimu vrtule (označeno Q_{turb}), nebo
- samostatnými vrtulemi určenými pouze pro vzlet a přistání (Q_{prop}).

Rychlost stoupání V_ξ lze odvodit ze vzlaku:

$$V_\xi = \sqrt{\frac{2mg \cos(\alpha_{TO})}{\rho_{air} A C_L}} \quad [m/s] \quad (5.73)$$

První rovnice udává výraz pro potřebný tah Q . V extrémním případě vertikálního vzletu (Obr. 5.8) druhá rovnice ztrácí smysl, protože tahová síla může být nastavena jako násobek gravitační síly.

Tah potřebný ke vzletu Q může být zajištěn turbínami na palubě Q_{turb} , používanými jako vrtule, a zároveň pomocnými vrtulemi Q_{prop} , používanými pouze během fáze stoupání. Aby bylo možné určit výkon a dodatečnou hmotnost potřebnou pro vzlet, je prvním krokem návrh plochy turbín potřebné během výrobní fáze. Turbíny by měly být navrženy tak, aby poskytovaly tahovou sílu rovnou D_{turb} (rovnice (5.64)) během výrobní fáze.

V extrémním případě vertikálního vzletu (Obr. 5.8b) druhá rovnice ztrácí smysl a tah lze nastavit jako násobek tíhy:

$$Q \geq mg \quad [N] \quad (5.74)$$

Prvním krokem je návrh plochy turbín potřebné během produkční fáze. Turbíny by měly poskytovat tah odpovídající odporu D_{turb} , jak je dáno rovnicí (5.64):

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_a^2 4a(1-a) A_{turb} \quad [N] \quad (5.75)$$

kde V_a je tečná rychlost draka, a je indukční faktor, A_{turb} je plocha turbín. Formulace pravé strany vychází z *disc theory* větrných turbín:

$$V_a^2 = V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + Ge^2) \quad [m/s] \quad (5.76)$$

Předpokládá se, že turbíny jsou natočené ve směru relativní rychlosti. S ohledem na minimální účinnost podle *disc theory* η_{dmin} , výkon na rotoru je:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_a^3 4a(1-a)^2 A_{turb} = \eta_d^{min} P_{ob} \quad [W] \quad (5.77)$$

Kde P_{ob} (rovnice (5.66)) je výkon, který by byl získán bez ztrát podle *disc theory*. Rovnice (5.75), s využitím rovnice (5.64), se přepíše jako:

$$\begin{aligned} 4a(1-a) A_{turb} &= \frac{\frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + Ge^2)}{\frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + Ge^2)} \\ &= A \gamma_t C_d \end{aligned} \quad (5.78)$$

Analogicky lze přepsat výkonovou rovnici (5.77), vzhledem k rovnici (5.64):

$$\begin{aligned} 4a(1-a)^2 A_{turb} &= \eta_d^{min} \frac{\frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^3 \gamma_t \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 ((1 + \gamma_t)^2 + Ge^2)^{3/2}}{\frac{1}{2} \rho_{air} V_w^3 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 ((1 + \gamma_t)^2 + Ge^2)^{3/2}} \\ &= \eta_d^{min} A \gamma_t C_d \end{aligned} \quad (5.79)$$

Z rovnice (5.78) lze vyjádřit plochu turbín A_{turb} :

$$A_{turb} = \max \left(\frac{A \gamma_t C_d}{4a(1)(1-a(1))} \right) \quad [m^2] \quad (5.80)$$

kde $\gamma_t(V_w)$ a $C_d(V_w)$ jsou funkce rychlosti větru. Hodnota $a(1)$ se najde vydělením rovnice (5.79) rovnicí (5.78)

$$a(1) = 1 - \eta_d^{min} \quad [1] \quad (5.81)$$

Indukční faktor a pro různé rychlosti větru lze spočítat:

$$4a(1-a) = \frac{A\gamma_t C_d}{A_{turb}} \quad (5.82)$$

Odtud:

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{A\gamma_t C_d}{A_{turb}}\right)}}{2} \quad [1] \quad (5.83)$$

Jakmile je známa plocha turbín, lze spočítat výkon $P_{t,pr}$ nutný pro vyvinutí tahu Q_{turb} . Z *disc theory* dostáváme horní mez účinnosti vrtulí použitých jako pohon:

$$\eta_{turb,prop,disc} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{Q_{turb}}{\frac{1}{2}\rho_{air}A_{turb}V_{\xi}^2}}} \quad [1] \quad (5.84)$$

Abychom získali realistickou hodnotu tahu, je třeba vzít v úvahu, že turbína je pravděpodobně optimalizována pro fázi výroby energie, a ne pro pohon. Proto je nutné uvažovat další účinnost $\eta_{t,pr}$.

Výkon potřebný k vytvoření tahové síly je:

$$P_{t,pr} = \frac{Q_{turb}V_{\xi}}{\eta_{t,pr}\eta_{turb,pr,disc}} \quad [W] \quad (5.85)$$

Zbýlý tah $Q_{prop} = Q - Q_{turb}$ může být dodán palubními vrtulemi, což vyžaduje dodatečnou hmotnost. Výkon požadovaný těmito vrtulemi P_{prop} lze odhadnout obdobným způsobem, a to za předpokladu, že plocha vrtule je úměrná průměrné délce křídel.

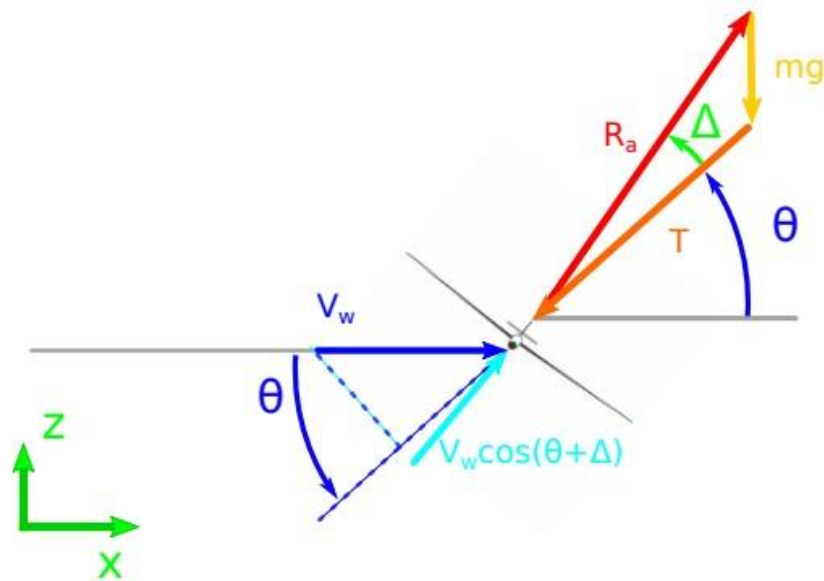
Dodatečná hmotnost potřebná pro vzlet m_{TO} může být určena pomocí energetické hustoty baterií a specifického výkonu motorů:

$$m_{TO} = P_{prop} \left(\frac{h}{V_z E_{batt}} + \frac{1}{E_{motors}} \right) \quad [kg] \quad (5.86)$$

[4].

5.11 Vliv hmotnosti draka na výrobu energie

Jakmile je odhadnuta hmotnost létající části, je nutné do modelu výroby výkonu zahrnout ztráty způsobené hmotností, aby byly penalizovány návrhy s vysokou hmotností. S odkazem na Obr. 5.9 značí úhel θ sklon lana v místě připojení ke draku. Tah v laně T leží v tomto směru. Celková aerodynamická síla R_a má větší sklon, aby kompenzovala tíhu, která působí ve svislém směru.



Obr. 5.9 : Balance sil a relativní rychlosti větru s ohledem na hmotnost [4].

Rovnováha sil ve směru os x a z:

$$\begin{aligned} T \cos(\theta) &= R_a \cos(\theta + \Delta) \\ T \sin(\theta) + mg &= R_a \sin(\theta + \Delta) \end{aligned} \quad (5.87)$$

Pro malé Δ : (Taylorova řada)

$$\begin{aligned} \cos(\theta + \Delta) &\approx \cos(\theta) - \Delta(\cos(\theta) + \sin(\theta)) \\ \sin(\theta + \Delta) &\approx \sin(\theta) - \Delta(\sin(\theta) - \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (5.88)$$

Po dosazení do rovnice (5.87) dostaneme tah v laně:

$$\begin{aligned} T &= R_a(1 - \Delta - \Delta \tan(\theta)) \quad [\text{N}] \\ T &= R_a(1 - \Delta + \Delta \tan(\theta)) - \frac{mg}{\sin(\theta)} \quad [\text{N}] \end{aligned} \quad (5.89)$$

Úhel Δ lze odvodit odečtením obou předchozích rovnic:

$$\Delta = \frac{mg}{R_a \cos(\theta) (\tan^2(\theta) + 1)} \quad [^\circ] \quad (5.90)$$

Síla R_a je funkcí úhlu Δ – rovnice (5.62) modifikovaná do:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta + \Delta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 [(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2]^{3/2} \quad [\text{N}] \quad (5.91)$$

Pro přehlednost definujeme:

$$Q^* = \frac{1}{2} \frac{\rho_{air} A C_d V_w^2 [(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2]^{3/2}}{(1 + \gamma_t)^2} \quad [\text{N}] \quad (5.92)$$

$$M^* = \frac{mg}{\cos(\theta)(\tan^2(\theta) + 1)} \quad [\text{N}] \quad (5.93)$$

Přepsaná rovnice (5.90):

$$\Delta(\cos(\theta + \Delta) - \gamma_{out})^2 = \frac{M^*}{Q^*} \quad (5.94)$$

S ohledem na aproximaci Taylorovou řadou (rovnice (5.88)) je úhel potřebný ke kompenzaci gravitace nakonec vyjádřen jako:

$$\Delta^3(\sin \theta + \cos \theta)^2 - 2\Delta^2(\sin \theta + \cos \theta)(\cos \theta - \gamma_{out}) + \Delta(\cos \theta - \gamma_{out})^2 - \frac{M^*}{Q^*} = 0 \quad (5.95)$$

[4].

5.11.1 Faktor využití výkonu ζ

Je zajímavé porovnat užitečný výkon P , který dané křídlo o ploše A získává z větrného pole, s výkonem větru P_{area} , který proudí přes průřezovou plochu o stejné velikosti. Tento výkon je dán vztahem:

$$P_{area} = \frac{1}{2} V_w^3 A \rho \quad [\text{W}] \quad (5.96)$$

Definujme jejich poměr jako tzv. faktor využití výkonu ζ (*Power Harvesting Factor*):

$$\zeta = \frac{P}{P_{area}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v_w^3} \quad [1] \quad (5.97)$$

Horní mez využitelného výkonu. Na základě o maximálním výkonu získatelném z větru již známe teoretickou horní mez faktoru ζ :

$$\zeta \leq \zeta_{max} = \frac{4}{27} C_R \left(\frac{C_R}{C_D} \right)^2 \quad [1] \quad (5.98)$$

Je zajímavé porovnat faktor ζ s Betzovým limitem, který udává maximální výkon, který lze získat z dané průřezové plochy větru konvenční větrnou turbínou:

$$\text{Betzův limit} = \frac{16}{27}$$

Z toho plyne, že $\frac{27}{16} \zeta$ je poměr, o kolik více energie může získat AWE systém o ploše A , v porovnání s větrnou turbínou o průřezu A .

Pro upoutané křídlo se součinitelem vztlaku $C_L=1$ a součinitelem odporu $C_D=0,07$ a bez dodatečného odporu platí, že $C_R \approx C_L$ maximální faktor sklizně energie je přibližně $\zeta_{max} \approx 30$. Této hodnoty zatím nebylo experimentálně dosaženo, ale mezi týmy vyvíjejícími systémy AWE s pevným křídlem probíhá závod o dosažení co nejvyššího faktoru ζ . Doposud nejlepší

experimentálně dosažený faktor sklizně je $\zeta=8$, jak uvádí firma Makani Power. Moderní větrné turbíny dosahují faktoru ζ přibližně 5,5.

U flexibilních křídel je *glide ratio* typicky mnohem nižší, a tedy i faktory využití energie bývají nižší. Flexibilní křídla však mohou tento nízký faktor ζ kompenzovat nižší cenou za čtvereční metr plochy křídla.

Například při faktoru sklizně $\zeta=30$ pro velmi efektivní křídlo to znamená, že křídlo o ploše A může získat stejné množství energie jako větrná turbína s rotorem o ploše $\frac{27}{16}\zeta A \approx 51A$. Aby takové křídlo dosáhlo stejného výkonu jako největší existující větrná turbína Enercon E-126 s průměrem rotoru 126 m a plochou rotoru 12 468 m², musí mít křídlo plochu přibližně $A = \frac{12\,468}{51} \approx 250 \text{ m}^2$, tedy například pevné křídlo o rozměrech 5 m × 50 m [58].

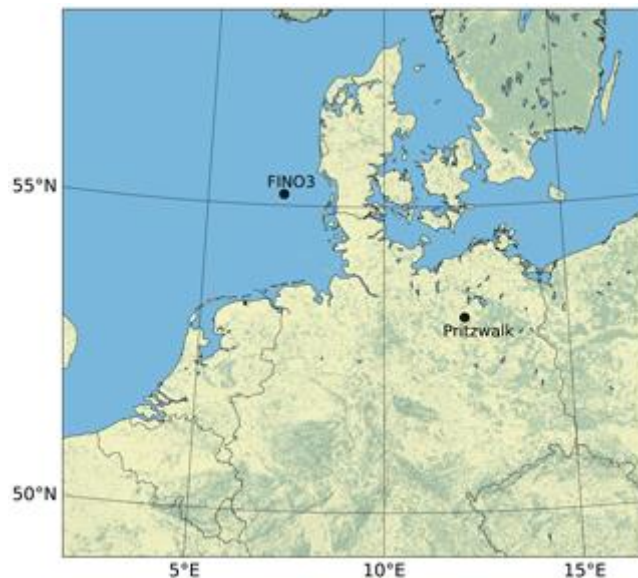
5.12 Výpočet

Tento výpočet vychází z údajů uvedených ve člancích [59], [60], [4] a v kapitolách 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 a 5.11.

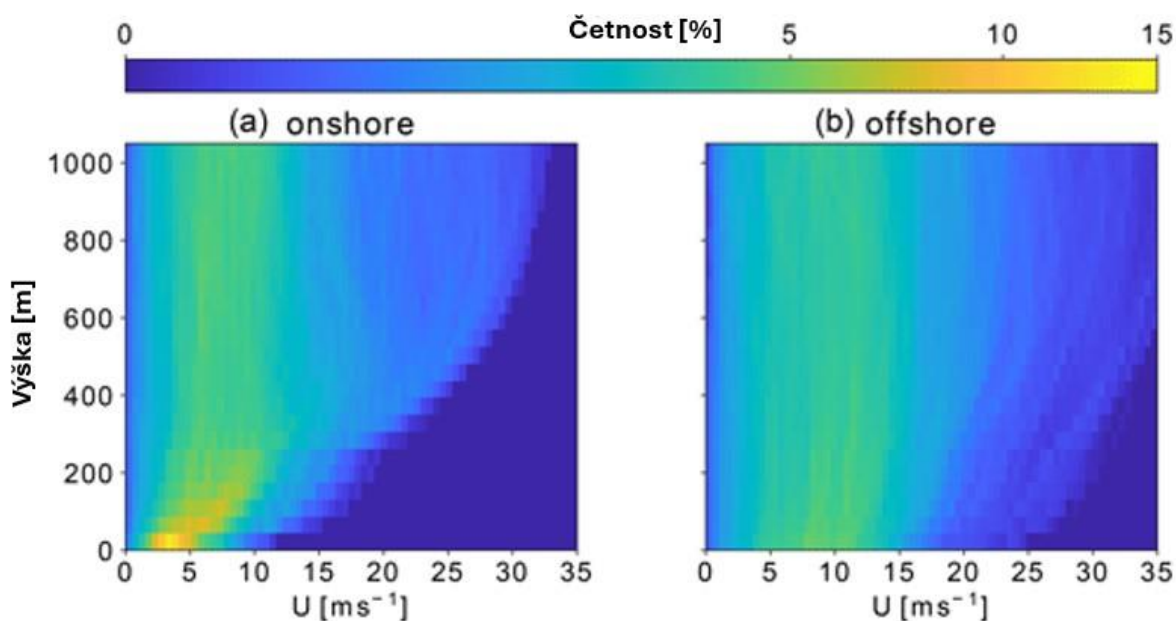
5.12.1 Lokalita

Pro přesné predikce výkonu je důležité vědět, jak se rychlost větru mění s výškou. Běžně používaný předpoklad pro konvenční aplikace větrné energetiky je logaritmický profil rychlosti větru. Tento profil je obecně vhodný až do výšky 200 m. Jak ale systémy AWE pracují ve vyšších výškách, logaritmický profil už není platný. Proto bylo zvoleno použít referenční místa s měřeným profilem větru, které bude reprezentovat změnu s výškou během všech simulací prezentovaných v tomto odstavci [60].

Bylo vycházeno z článku [59], který se zaměřuje na dvě oblasti onshore a offshore. Tento článek zobrazuje rychlosti větru a jeho četnost ve výšce od 0 do 1000 m. Onshore lokalita se nachází v severním Německu na letišti Pritzwalk Sommersberg (53°10'47.00" N, 12°11'20.98" E). Offshore lokalita je výzkumná platforma FINO3 (55°11.7' N, 7°9.5' E) v Severním moři [59].



Obr. 5.10 Ukázka dvou lokalit na mapě [59].

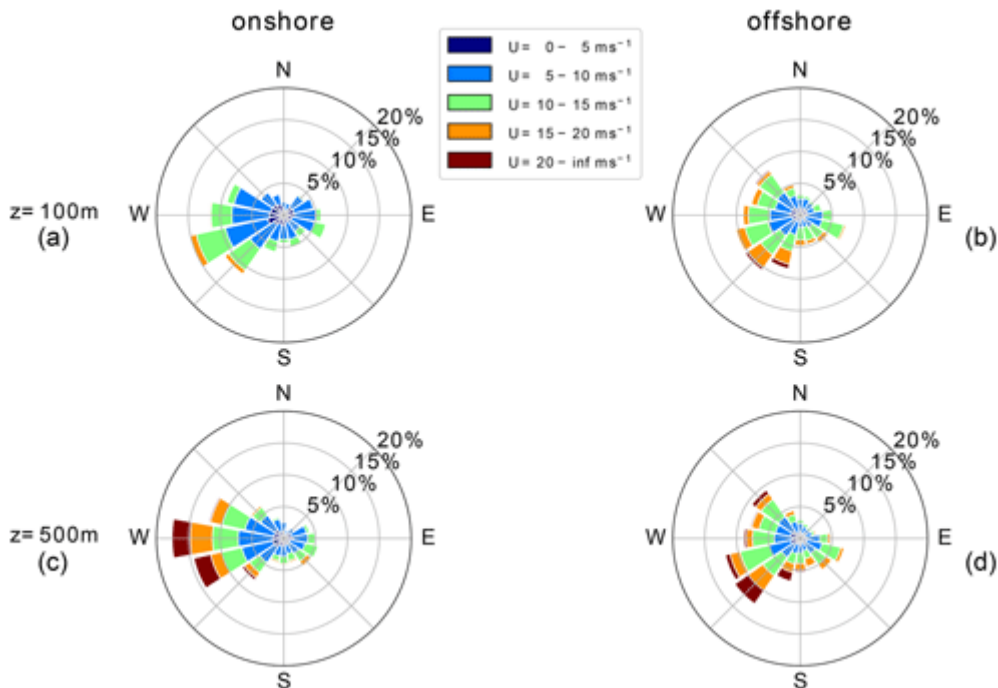


Obr. 5.11 Porovnání pravděpodobnostních rozdělení roční rychlosti větru U simulované modelem WRF v jednotlivých výškových úrovních mezi pevninou (a) a mořem (b) do výšky 1000 m. Nelineární barevná škála znázorňuje vysokou pravděpodobnost výskytu nízkých nadmořských výšek, zejména na pevnině, a zároveň rozlišuje nižší, široce rozptýlené četnosti ve vyšších výškách ([59], upraveno).

Obr. 5.11 ukazuje roční pravděpodobnostní rozdělení horizontální rychlosti větru U na jednotlivých výškových úrovních pro obě lokality. Tato rozdělení poskytují přehled o větrných statistikách v konkrétních výškách, ale ne o statistikách tvarů větrných profilů. Nelineární barevná škála umožňuje zobrazení celého rozsahu relativní pravděpodobnosti. Na pevnině (Obr. 5.11a) jsou rychlosti větru U relativně nízké a mají poměrně úzkou odchylku pod 300 m kvůli dominantním povrchovým efektům. Nad touto výškou se distribuce rozšiřuje, ale vysoká pravděpodobnost nízkých rychlostí větru zůstává pro celý rozsah výšek. Distribuce vykazuje bimodální charakteristiky způsobené různou atmosférickou stratifikací. Nízké rychlosti větru jsou běžně spojeny s nestabilními podmínkami a vysoké rychlosti s neutrálními nebo stabilními atmosférickými podmínkami.

Taková multimodální rozdělení na vyšších výškách jsou lépe popsána součtem dvou nebo více pravděpodobnostních rozdělení, protože standardní Weibullova nebo Rayleighova rozdělení tento jev nedokážou zachytit. Rychlosti větru U na moři (Obr. 5.11b) vykazují širší distribuci ve všech výškách, protože jsou méně ovlivněny povrchovými efekty. Podobně jako na pevnině i na moři frekvenční distribuce vykazuje vysokou pravděpodobnost nižších rychlostí větru (mezi 5–10 m/s) ve všech výškách. Vyšší rychlosti větru v nižších výškách přispívají k výhodám pro konvenční větrné turbíny a oslabují argumenty pro offshore AWE systémy, protože jedním z jejich přínosů by bylo využívání energie ze silnějších větrů ve vyšších výškách. Nicméně jiné důvody pro umístění AWE systémů na moři zahrnují bezpečnostní a územní regulace a potenciální nákladové výhody menší podpůrné struktury.

AWE usilují o získávání silnějšího a méně turbulentního větru ve středních výškách, které jsou zde definovány jako výšky mezi 100 a 1000 m, což je pravděpodobně více, než je možné dosáhnout pomocí běžných větrných turbín.



Obr. 5.12 Větrné růžice ročních statistik směru a rychlosti větru v Pritzwalk (na pevnině) a FINO3 (na moři) pro výšky 100 a 500 m během simulovaných let [59].

Obr. 5.12 zobrazuje větrné růže pro roční větrné podmínky ve výškách 100 m (Obr. 5.12a a Obr. 5.12b) a 500 m (Obr. 5.12c a Obr. 5.12d) nad pevninou (vlevo) a na moři (vpravo). Dominantní směr větru na obou lokalitách je jihozápadní, který se při zvyšující se výšce otáčí ve směru hodinových ručiček. S rostoucí výškou se zmenšuje směrová variabilita a rychlost větru U , což je velikost větrného vektoru U , se zvyšuje, což odpovídá očekávaným trendům na severní polokouli. Průměrný směr větru nad pevninou se mezi 100 m a 500 m otáčí přibližně o 14° , zatímco průměrný směr větru na moři se změní pouze o přibližně 5° . Směr větru na moři se nad 500 m otáčí ještě o přibližně 10° navíc, což vede k téměř stejnému západnímu směru větru kolem 1000 m. Kvůli převládajícím nestabilním podmínkám na moři, doprovázeným silným vertikálním mícháním, jsou zkoumané výšky méně ovlivněny změnou směru než na pevnině [59].

Obukhovova délka L je fyzikální veličina, která říká, jak silně se atmosféra vertikálně míchá vlivem vztlaku (teplotních rozdílů) oproti mechanickému tření (např. způsobenému větrem o povrch). Obukhovova délka L , která obvykle charakterizuje atmosférickou stabilitu v blízkosti povrchu, výrazně ovlivňuje tvar profilu rychlosti větru U , což je velikost větrného vektoru. Tento koncept rozšiřujeme na střední výšky mezi 100 a 1000 m. Obukhovova délka je funkcí simulované třecí rychlosti u^* , virtuálního potenciálního teploty θ_v , potenciální teploty θ , kinematického virtuálního povrchového tepelného toku Q_s , kinematického virtuálního latentního tepelného toku Q_L , von Karmánovy konstanty k a gravitačního zrychlení g .

Neutrální stratifikace nastává přibližně 20 % času na obou lokalitách. Nižší tepelná kapacita povrchu země vede k rychlejší přenosu tepla a rychlejšímu ochlazení povrchu, což podporuje vznik stabilní stratifikace (přibližně 17 % na pevnině vs. 6 % na moři). Mořská lokalita má vyšší pravděpodobnost nestabilních podmínek, což je pravděpodobně způsobeno teplejším oceánským povrchem ve srovnání se vzduchem nad ním.

$$L = - \frac{u_*^3 \cdot \theta_v}{kg \left(\frac{Q_s}{\theta} + 0.61Q_L \right)} \quad [m] \quad (5.99)$$

Tab. 5.1 Třídy stability na základě Obuchovovy délky L [59].

Třída stability	L [m]	Onshore	Offshore
Nestabilní (U)	$-200 \leq L \leq -100$	7.27 %	13.66 %
Téměř nestabilní (NU)	$-500 \leq L \leq -200$	7.09 %	16.34 %
Neutrální (N)	$ L > 500$	20.71 %	22.82 %
Téměř stabilní (NS)	$200 \leq L \leq 500$	12.56 %	5.15 %
Stabilní (S)	$50 \leq L \leq 200$	17.24 %	6.20 %
Velmi stabilní (VS)	$10 < L < 50$	10.04 %	2.96 %
Jiné	$-100 \leq L \leq 10$	25.09 %	32.87 %

Tab. 5.2 Jak interpretovat hodnoty L ? [61]

Kategorie	Hodnota L	Co to znamená
Nestabilní	$L < 0$	Povrch je teplejší než vzduch \rightarrow vzniká vztlak a turbulence (např. přes den na pevnině)
Neutrální	$L \rightarrow \infty$	Atmosféra se nemíchá ani vztlakem, ani stabilitou
Stabilní	$L > 0$	Povrch je chladnější než vzduch \rightarrow omezené míchání, stabilní vrstvy (např. v noci)

5.12.2 Výběr profilu křídla

Je velmi složité provést výběr profilu křídla, protože to zahrnuje velké zkušenosti a odbornost. Proto byl vybrán profil dle článku [60].

Z tohoto článku vyplývá, že vhodným profilem křídla bude NACA 0012, který byl vybrán pro vodorovnou ocasní plochu/výškové kormidlo a svislou ocasní plochu/směrové kormidlo draka.

Důvodem pro použití profilu NACA 0012 pro tyto plochy bylo, že aerodynamické vlastnosti výškového a směrového kormidla byly určeny pomocí předpočítaných koeficientů. Tyto koeficienty byly získány pomocí nástroje Rfoil a korigovány pro trojrozměrné efekty pomocí poměru stran a indukovaného odporu. Odhady pomocí Rfoil byly provedeny pro profil NACA 0012 při rychlosti 60 m/s a Reynoldsově čísle 6×10^6 [60].

Dalším vhodným profilem by mohl být profil NACA 0015, který vychází z článku [62] nebo také profil NACA 0018, který byl zkoumán na demonstračním křídle v článku [63].

5.12.3 Zadání hodnot

Zadané hodnoty vychází z literatury [4]. Tyto hodnoty budou uvažovány pro celý výpočet aerodynamiky draků.

Tab. 5.3 Určené hodnoty z lit. [4] určené pro výpočet.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
C_d	0,15	–	Celkový součinitel odporu systému
G_e	10	–	Glide ratio
θ	20	$^\circ$	Úhel mezi drakem a úchytem lana
m	2000	kg	Hmotnost draka
A	100	m^2	Plocha draka
ρ_0	1,225	kg/m^3	Hustota vzduchu
GG			Ground generation
γ_t	0	–	
γ_{out}	0,33	–	

FG			Fly generation
γ_t	0,5	–	
γ_{out}	0		

Rychlost větru V_w byla určena z kapitoly 5.12.1. Vychází jako často vyskytovaná hodnota ve výšce 500 m, jak u offshore tak onshore uvažované lokality. Výška, ve které se bude drak pohybovat byla zvolena 500 m. Tato hodnota vychází z aktuálních možností, které draci mohou dosahovat.

Tab. 5.4 Doplnující parametry vycházející z článku [18].

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
P_{rated}	1000	kW	Výkon systému
S	110	m ²	Plocha draka
m	5857	kg	Hmotnost systému
d	32,4	mm	Průměr lana
AR	10	–	Štíhlost křídla (<i>aspect ratio</i>)

Parametry z Tab. 5.4 vychází z článku [18], který porovnává jednotlivé výkony různých AWE. Tyto parametry jako je AR a průměr lana budou nadále využity v následujících výpočtech.

Tab. 5.5 Hodnoty volené nebo jasně definované

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
V_w	10	m/s	Uvažovaná rychlost větru (5.12.1)
r	500	m	Délka lana/maximální výška, ve které se drak pohybuje
g	9,81	m/s ²	Gravitační konstanta
l	Proměnná	m	Podélná souřadnice podél lana
β	Proměnná 10–30	°	Úhel mezi lanem a zemí, úhel elevace

Tab. 5.6 : Rozsahy, rozdělení a popisy modelových parametrů [4].

Parametr	Min	Max	Jednotky	Popis
$SF_{\sigma \text{ lim}}$	1,1	2	–	Bezpečnostní faktor pevnosti lana
C_{d0}	0,01	0,1	–	Součinitel odporu při nulovém vztlaku
C_{dL}	0,4	1,2	–	Součinitel odporu lana
V	2	40	kV	Napětí vedení
ρ_{carb}	800	2000	kg/m ³	Hustota konstrukčního materiálu
η_{out}	0,75	0,9	–	Účinnost odvíjení
η_t	0,7	0,85	–	Účinnost palubní výroby energie
η_{in}	0,3	0,85	–	Účinnost navíjení
$\eta_{t \text{ pr}}$	0,5	0,7	–	Účinnost turbín v režimu vrtule
η_{pr}	0,7	0,9	–	Účinnost vrtulí
$C_{L \text{ max}}$	1	4	–	Maximální součinitel vztlaku
E_{gen}	2,5	16	kW/kg	Hustota výkonu motorů/generátorů
δ	1	10	%	Maximální průhyb jako % rozpětí

η_d^{min}	0,8	0,95	–	Minimální účinnost turbín (indukční faktor)
h_{min}	150	250	m	Minimální provozní výška
A_{kite}	15	100	m ²	Plocha křídla draka

5.12.4 Rychlosti větru

Ze začátku je proveden výpočet složek rychlostí větru:

$V_{w\parallel}$ horizontální složka skutečné rychlosti větru:

$$V_{w\parallel} = V_w \cos(\theta) \quad [m/s]$$

$$V_{w\parallel} = 10 \cdot \cos(0,35) = 9,4 \quad [m/s] \quad (5.100)$$

Rychlost odvíjení lana V_{out} :

$$V_{out} = \frac{V_{w\parallel}}{3} \quad [m/s]$$

$$V_{out} = \frac{9,4}{3} = 3,1 \quad [m/s] \quad (5.101)$$

Rychlost navíjení lana V_{in} :

$$V_{in} = \gamma_{in} V_w \quad [m/s]$$

$$V_{in} = 1,5 \cdot 10 = 15 \quad [m/s] \quad (5.102)$$

Složka rychlosti větru kolmá na křídlo V_r :

$$V_r = V_{w\parallel} - V_{out} \quad [m/s]$$

$$V_r = 9,4 - 3,1 = 6,3 \quad [m/s] \quad (5.103)$$

Tangenciální rychlost V_τ :

$$V_\tau = V_r \cdot \frac{C_L}{C_d} = (V_{w\parallel} - V_{out}) \cdot \frac{C_L}{C_d} \quad [m/s]$$

$$V_\tau = (9,4 - 3,1) \cdot \frac{1,5}{0,17} = 55,6 \quad [m/s] \quad (5.104)$$

5.13 Ground-gen AWE

V_a relativní rychlost větru na draku:

$$V_a = (V_{w\parallel} - V_{out}) \cdot G_e^2 + (V_{w\parallel} - V_{out})^2 = (V_{w\parallel} - V_{out})^2 \cdot (1 + G_e^2) \quad [m/s]$$

$$V_a = (9,4 - 3,1)^2 \cdot (1 + 10^2) = 63 \quad [m/s] \quad (5.105)$$

Aerodynamické síly vztlaku (L) a odporu (D):

$$\frac{L}{D} = \frac{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A C_L V_a^2}{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A C_d V_a^2} = \frac{C_L}{C_d} = \frac{V_\tau}{V_r} \quad [1]$$

$$\frac{L}{D} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 1,5 \cdot 63^2}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 63^2} = \frac{364173 \text{ [N]}}{41038,7 \text{ [N]}} = \frac{1,5}{0,17} = \frac{55,6 \text{ [m/s]}}{6,3 \text{ [m/s]}} \quad (5.106)$$

Síla v laně:

$$T = R_a = \sqrt{L^2 + D^2} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A C_d (V_{w\parallel} - V_{out})^2 (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [N]$$

$$T = R_a = \sqrt{364173^2 + 36417^2} = 365989 \text{ [N]} \quad (5.107)$$

Když je maximální výkon produkován ($V_{out} = \frac{V_{w\parallel}}{3}$), síla v laně:

$$T_{GG, \max} = \frac{2}{9} \rho_{\text{air}} A V_w^2 \cos^2 \theta C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [N]$$

$$\begin{aligned} T_{GG, \max} &= \frac{2}{9} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 10^2 \cdot \cos^2 0,35^2 \cdot 0,17 \cdot (1 + 10^2)^{3/2} \\ &= 463607 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (5.108)$$

Generovaný výkon:

$$P_{GG} = T V_{out} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A C_d (V_{w\parallel} - V_{out})^2 V_{out} (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W]$$

$$P_{GG} = 366478 \cdot 3,1 = 1,15 \text{ [MW]} \quad (5.109)$$

Výkonová hustota je:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_w^3 \quad [W/m^2]$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 10^3 = 612,5 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.110)$$

Maximální výkon je dosažen při $V_{out} = \frac{V_{w\parallel}}{3}$:

$$P_{GG, \max} = \frac{4}{27} P_w \cos^3(\theta) A C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W]$$

$$P_{GG,max} = \frac{4}{27} \cdot 612,5 \cdot \cos(0,35)^3 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot (1 + 10^2)^{3/2} = 1,56 \text{ [MW]} \quad (5.111)$$

Skutečný celkový výkon P_{wind} , který může letící křídlo získat z větrného pole při různém úhlu β :

$$P_{wind} = V_w R_a \cos(\beta) \text{ [W]}$$

$$P_{wind} = 10 \cdot 365989 \cdot \cos 0,35 = 3,44 \text{ [MW]} \quad (5.112)$$

Tab. 5.7 Průběh celkového výkonu, které může křídlo získat z větrného pole na úhlu β .

β [°]	P_{wind} [MW]
10	3,61
15	3,54
20	3,44
25	3,32
30	3,17

Oswaldova účinnost:

$$e = 1,78(1 - 0,045AR^{0,68}) - 0,64 \text{ [1]}$$

$$e = 1,78 \cdot (1 - 0,045 \cdot 10^{0,68}) - 0,64 = 0,76 \text{ [1]} \quad (5.113)$$

Glide ratio:

$$Ge = \frac{C_L}{C_d} \text{ [1]}$$

$$C_L = Ge \cdot C_d = 0,15 \cdot 10 = 1,5 \text{ [1]} \quad (5.114)$$

Indukovaný odporový součinitel:

$$C_{di} = \frac{C_L^2}{\pi AR e} \text{ [1]}$$

$$C_{di} = \frac{1,5^2}{\pi \cdot 10 \cdot 0,76} = 0,0947 \text{ [1]} \quad (5.115)$$

Dodatečný součinitel odporu způsobený lanem. C_{\perp} je součinitel odporu lana, tedy kruhového průměru, volený z Tab. 5.6:

$$C_{d,tether} = C_{\perp} \frac{dr}{4A} \text{ [1]}$$

$$C_{d,tether} = 0,47 \cdot \frac{0,0324 \cdot 500}{4 \cdot 100} = 0,019 \text{ [1]} \quad (5.116)$$

C_{d0} je součinitel odporu při nulovém vztlaku draka [65]:

$$C_{d0} = C_d - C_{di} \quad [1] \quad [65]$$

$$C_{d0} = 0,15 - 0,095 = 0,055 \quad [1] \quad (5.117)$$

Celkový součinitel odporu systému:

$$C_d = C_{d0} + \frac{C_L^2}{\pi A R e} + C_{\perp} \frac{d r}{4A} \quad [1]$$

$$C_d = 0,055 + \frac{1,5^2}{\pi \cdot 10 \cdot 0,76} + 0,47 \cdot \frac{0,0324 \cdot 500}{4 \cdot 100} = 0,17 \quad [1] \quad (5.118)$$

Účinnosti jednotlivých komponent systému jsou určeny z různých zdrojů. Účinnost baterie se uvažuje 90 %. Jedná se o lithium-iontové baterie, běžně využívané např. k fotovoltaickým elektrárnám. Mají vysokou životnost a zvládají opakovaná vybití a nabití [66].

Účinnost elektrického generátoru se pohybuje mezi 90–96 % [67].

Účinnost trajektorie bude záviset na podmínkách na letové dráze draka, proto volím hodnotu 70 %.

Účinnost motoru může být až 90 % [68].

Ztráty způsobené konverzí jsou vyjádřeny jako:

$$\eta_{out} = \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \quad [\%]$$

$$\eta_{out} = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 100 = 76 \quad [\%] \quad (5.119)$$

Ztráty způsobené motorem a bateriemi na zemi:

$$\eta_{in} = \eta_{mot} \cdot \eta_{batt} \quad [\%]$$

$$\eta_{in} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 100 = 81 \quad [\%] \quad (5.120)$$

5.13.1 Vliv fáze navíjení lana

Normálová síla působící na jednotkovou délku lana:

$$F_{tether} = \frac{1}{2} \rho_{air} d C_{\perp} \frac{V_{\tau}^2 r}{4} \quad [N]$$

$$F_{tether} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,0324 \cdot 0,47 \cdot \frac{62,6^2 \cdot 500}{4} = 4575,6 \quad [N] \quad (5.121)$$

Bezrozměrný součinitel odvíjení:

$$\gamma_{out} = \frac{V_{out}}{V_w} \quad [1]$$

$$\gamma_{out} = \frac{3,1}{10} = 0,31 \quad [1] \quad (5.122)$$

Součinitel navíjení γ_{in} je často volitelný parametr řízení, který se nastavuje (např. ve snaze minimalizovat ztráty). Typické hodnoty: 1,0–1,5 pro realistickou fázi navíjení (přiměřená rychlost). Vyšší hodnoty zvyšují síly, ale i ztráty.

$$\gamma_{in} = 1,5 \quad [1] \quad (5.123)$$

Výkon vynaložený během zotavení je:

$$P_r = P_w A C_{d0} \gamma_{in} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\beta)) \quad [W]$$

$$P_r = 612,5 \cdot 100 \cdot 0,055 \cdot 1,5 \cdot (1 + 1,5^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot \cos(0,35)) \quad [W] \quad (5.124)$$

Tab. 5.8 Závislost P_r na úhlu β .

β [°]	P_r [kW]
10	31,55
15	31,26
20	30,86
25	30,35
30	29,74

Rovnice výkonu ve fázi výroby:

$$P_{pr} = P_w A \gamma_{out} (\cos(\theta) - \gamma_{out})^2 C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \quad [W]$$

$$P_{pr} = 612,5 \cdot 100 \cdot 0,31 \cdot (\cos(0,35) - 0,31)^2 \cdot 0,17 \cdot (1 + 10^2)^{3/2} \quad (5.125) \\ = 1,15 \quad [MW]$$

Poměr doby fáze výroby τ_{out} a doby fáze zotavení τ_{in} je:

$$\tau_{out} = \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \quad [1], \quad \tau_{in} = \frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \quad [1]$$

$$\tau_{out} = \frac{1,5}{1,5 + 0,31} = 0,8273 \quad [1]; \quad \tau_{in} = \frac{0,31}{1,5 + 0,31} = 0,1727 \quad [1] \quad (5.126)$$

Průměrný výkon cyklu:

$$P_{cycle} = P_{pr} \tau_{out} - P_r \tau_{in} \\ = P_w A [(\cos(\theta) - \gamma_{out})^2 C_d (1 + G_e^2)^{3/2} \\ - C_{d0} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\beta))] \left(\frac{\gamma_{in} \gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \right) \quad [W]$$

$$P_{cycle} = 1146392 \cdot 0,8273 - 739537 \cdot 0,1727 = 388,7 \quad [kW] \quad (5.127)$$

Tab. 5.9 Závislost P_{cycle} na úhlu β .

β [°]	P_{cycle} [W]
10	922258
15	922497
20	922828
25	923249
30	923757

Relativní rychlost je:

$$V_a = \sqrt{V_w^2 + V_{in}^2 + 2V_w V_{in} \cos(\beta)} \quad [m/s] \quad (5.128)$$

$$V_a = \sqrt{10^2 + 15^2 + 2 \cdot 10 \cdot 15 \cdot \cos(0,35)} = 63,54 \quad [m/s] \quad (5.129)$$

Tab. 5.10 Závislost V_a na úhlu β .

β [°]	V_a [m/s]
10	63,56
15	63,55
20	63,54
25	63,52
30	63,50

Předpokládáme-li, že drak je v rovnováze během fáze navíjení, výsledná aerodynamická síla R_a leží podél směru lana a D je paralelní s V_a , úhel mezi V_a a lanem je stejný jako úhel mezi R_a a D :

$$\frac{L}{D} = \frac{V_w \sin(\beta)}{V_w \cos(\beta) + V_{in}} = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta) + \gamma_{in}} \quad [1] \quad (5.130)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{10 \cdot \sin(0,35)}{10 \cdot \cos(0,35) + 15} = \frac{2,59 [N]}{24,66 [N]} \quad [1] \quad (5.131)$$

Tab. 5.11 Závislost L na úhlu β .

β [°]	L [N]
10	24,85
15	24,66
20	24,40
25	24,06
30	23,66

Tab. 5.12 Závislost D na úhlu β .

β [°]	D [N]
10	1,74
15	2,59
20	3,42
25	4,23
30	5,00

Síla lana během fáze navíjení je pak:

$$T_r = \sqrt{D^2 + L^2} = D \sqrt{1 + \left(\frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta) + \gamma_{in}} \right)^2} \quad [N]$$

$$T_r = \sqrt{24,66^2 + 2,59^2} = 24,79 \quad [N] \quad (5.132)$$

Tab. 5.13 Závislost T_r na úhlu β .

β [°]	T_r [N]
10	24,91
15	24,79
20	24,64
25	24,43
30	24,18

5.14 Fly-gen AWE

Jako první se zvolí γ_t . Když $\gamma_t = 0$ turbíny jsou vypnuté (jen odpor těla), $\gamma_t = 1$ celý odpor tvoří turbíny (nerealistické). Optimální hodnota je $\gamma_t = 0,5$. Byla provedena volba $\gamma_t = 0,3$.

$C_{d,turb}$ je součinitel odporu turbíny:

$$C_{d,turb} = \gamma_t C_d \quad [1]$$

$$C_{d,turb} = 0,3 \cdot 0,17 = 0,051 \quad [1] \quad (5.133)$$

Relativní rychlost větru na draku je:

$$V_a^2 = V_{w\parallel}^2 + \left(\frac{D_{kite} + D_{turb}}{L} V_{w\parallel} \right)^2 = V_{w\parallel}^2 \left(1 + \left(\frac{1 + \gamma_t}{G_e} \right)^2 \right) \quad [m/s]$$

$$V_a = \sqrt{9,4 \cdot \left(1 + \left(\frac{1 + 0,3}{10} \right)^2 \right)} = 72,9 \quad [m/s] \quad (5.134)$$

D_{turb} je aerodynamický odpor turbín:

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_{d,turb} V_a^2 \quad [N]$$

$$D_{\text{turb}} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,085 \cdot 72,9^2 = 16503 \text{ [N]} \quad (5.135)$$

Maximální možný mechanický výkon FG-AWE je dán jako:

$$P_{\text{FG}} = D_{\text{turb}} V_a \text{ [W]}$$

$$P_{\text{FG}} = 20,774 \cdot 72,9 = 1,2 \text{ [MW]} \quad (5.136)$$

Síla D_{kite} :

$$D_{\text{kite}} = \frac{D_{\text{turb}}}{\gamma_t} \text{ [N]}$$

$$D_{\text{kite}} = \frac{20774}{0,5} = 41547 \text{ [N]}$$

Poměr:

$$\frac{L}{D_{\text{kite}} + D_{\text{turb}}} = \frac{\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A C_L V_a^2}{D_{\text{kite}} + D_{\text{turb}}} = \frac{V_\tau}{V_{\text{wll}}} \quad [1]$$

$$\frac{L}{D_{\text{kite}} + D_{\text{turb}}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 1,5 \cdot 63,4^2}{55010 + 16503} = \frac{488158 \text{ [N]}}{72514 \text{ [N]}} \quad (5.137)$$

Hustota větrného výkonu:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_w^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.138)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 10^3 = 612,5 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5.139)$$

Ideální výkon generovaný FG-AWE:

$$P_{\text{FG}} = P_w A \gamma_t C_d \cos(\theta^3) \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right)^{3/2} \text{ [W]}$$

$$P_{\text{FG}} = 612,5 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot \cos(0,35^3) \cdot \left(1 + \left(\frac{10}{1 + 0,3} \right)^2 \right)^{3/2} = 1,45 \text{ [MW]} \quad (5.140)$$

Pro vysoké hodnoty *glide ratio* je maximální výkon dosažen, když $D_{\text{turb}} = \frac{1}{2} D_{\text{kite}}$, tedy $\gamma_t = \frac{1}{2}$. Maximální výkon potom je:

$$D_{\text{turb}} = \frac{1}{2} D_{\text{kite}} \text{ [N]}$$

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \cdot 55011 = 27505 \text{ [N]} \quad (5.141)$$

$$P_{FG,max} \approx \frac{4}{27} P_w A \cos(\theta^3) C_L G_e^2 \text{ [W]}$$

$$P_{FG,max} \approx \frac{4}{27} \cdot 612,5 \cdot 100 \cdot \cos(0,35^3) \cdot 1,5 \cdot 10^2 = 1,4 \text{ [MW]} \quad (5.142)$$

Síla v laně:

$$T = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 A C_d (1 + \gamma_t) \cos(\theta^2) \left(1 + \left(\frac{G_e}{1 + \gamma_t} \right)^2 \right)^{3/2} \text{ [N]}$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 10^2 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot (1 + 0,3) \cdot \cos(0,35^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{1 + 0,3}{10} \right)^2 \right)^{3/2} = 623565 \text{ [N]} \quad (5.143)$$

Tato rovnice zahrnuje celkový aerodynamický odpor a vliv aerodynamiky křídla, včetně tvaru trajektorie.

Maximální síla v laně (pro $\gamma_t = \frac{1}{2}$ a vysoké G_e), to je síla, kterou turbíny aktivně vyvíjejí odporováním vzduchu kvůli výrobě elektřiny. Tato složka se přenáší do lana:

$$T_{FG,max} \approx \frac{2}{9} \rho_{air} A C_L G_e V_w^2 \cos(\theta^2) \text{ [N]}$$

$$T_{FG,max} \approx \frac{2}{9} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 10 \cdot 1,5 \cdot 10^2 \cdot \cos(0,35^2) = 40530 \text{ [N]} \quad (5.144)$$

Tato rovnice neuvažuje odpor systému jako celek, jen vztlakové využití pro generaci tahu z turbín.

V této fázi lze pro zohlednění účinnosti turbíny, ztrát vlivem hmotnosti, trajektorie a přenosu výkonu zavést celkovou účinnost η_t . η_t volíme z Tab. 5.6 $\eta_t = 0,8$. Maximální výkon, který může být získán při vysokém *glide ratio*, je potom:

$$P_{FG,max} = \frac{4}{27} \eta_t P_w A C_L G_e^2 \cos(\theta^3) \text{ [W]}$$

$$P_{FG,max} = \frac{4}{27} \cdot 0,8 \cdot 612,5 \cdot 100 \cdot 1,5 \cdot 10^2 \cdot \cos(0,35^3) = 1,1 \text{ [MW]} \quad (5.145)$$

5.15 Unifikovaný model

S ohledem na proporce mezi silami a rychlostmi může být relativní rychlost V_a vyjádřena jako:

$$V_a^2 = V_w^2 \left(\cos(\theta) - \frac{\gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 (1 + \gamma_t)^2 + G_e^2 \quad [m/s]$$

$$V_a = \sqrt{10^2 \cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^2 \cdot ((1 + 0,3)^2 + 10^2)} = 48,6 \quad [m/s] \quad (5.146)$$

Výraz pro aerodynamickou sílu:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} \quad [N] \quad (5.147)$$

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 10^2 \cdot \left(\cos(0,35) - \frac{0,31}{1 + 0,3} \right)^2 ((1 + 0,3)^2 + 10^2)^{\frac{3}{2}} = 246549 \quad [N] \quad (5.148)$$

Odporová síla způsobená turbínami D_{turb} je:

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2) \quad [N]$$

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,3 \cdot 0,17 \cdot 10^2 \cdot \left(\cos(0,35) - \frac{0,31}{1 + 0,3} \right)^2 \cdot (1 + 0,3)^2 + 10^2 = 6509 \quad [N] \quad (5.149)$$

Výkon v tomto modelu má dva příspěvky:

$$P = T V_{out} + D_{turb} V_a \quad [W]$$

$$P = 246549 \cdot 3,13 + 6509 \cdot 48,6 = 1,1 \quad [MW] \quad (5.150)$$

Výkon generovaný na zemi P_{gr} :

$$P_{gr} = \left[\frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{3/2} \right] [V_w \gamma_{out}]$$

$$= \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^3 \gamma_{out} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} \quad [W]$$

$$P_{gr} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 10^3 \cdot 0,31 \quad (5.151)$$

$$\cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^2 \cdot ((1 + 0,3)^2 + 10^2)^{\frac{3}{2}} = 772,3 [kW]$$

Výkon generovaný na palubě P_{ob} :

$$P_{ob} = \left[\frac{1}{2} \rho_{air} A \gamma_t C_d V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2) \right] \left[V_w \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right) \sqrt{(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2} \right]$$

$$= \frac{1}{2} \rho_{air} A C_d V_w^3 \gamma_t \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^3 ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{\frac{3}{2}} [W] \quad (5.152)$$

$$P_{ob} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 10^3 \cdot 0,3$$

$$\cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^2 \cdot ((1 + 0,3)^2 + 10^2)^{\frac{3}{2}} = 739,6 [kW]$$

Celkový výkon během fáze výroby je součtem P_{gr} a P_{ob} :

$$P_{out} = P_{gr} + P_{ob} = 1,51 [MW] \quad (5.153)$$

Průměrný výkon během cyklu je:

$$P_{cycle} = \frac{\gamma_{in}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \cdot P_{out}$$

$$- \frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in} + \gamma_{out}} \left(\frac{1}{2} \rho_{air} A V_w^3 \gamma_{in} C_{d0} (1 + \gamma_{in}^2 + 2\gamma_{in} \cos(\theta)) \right)$$

$$= 1,25 [MW] \quad (5.154)$$

$$P_{cycle} = \frac{1,5}{1,5 + 0,31} \cdot 1,51 - \frac{0,31}{1,5 + 0,31}$$

$$\cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 0,055 \right.$$

$$\left. \cdot (1 + 1,5^2 + 2 \cdot 1,5 \cdot \cos(0,35)) \right) = 1,25 [MW]$$

Jedná se o jednodušší model pro ztráty v návratové fázi.

Výkonová rovnice pro obecný systém s příčným větrem AWE napsána jako:

$$P_{\text{cycle}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} A V_w^3 \left[C_d ((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2)^{3/2} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{\text{out}}}{1 + \gamma_t} \right)^2 + \frac{\gamma_t}{\gamma_{\text{out}}} \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{\text{out}}}{1 + \gamma_t} \right)^3 \right] - C_{d0} (1 + \gamma_{\text{in}}^2 + 2\gamma_{\text{in}} \cos(\theta)) \cdot \frac{\gamma_{\text{in}} \gamma_{\text{out}}}{\gamma_{\text{in}} + \gamma_{\text{out}}} \quad [W] \quad (5.155)$$

$$P_{\text{cycle}} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot \left[0,17 \cdot ((1 + 0,3)^2 + 10^2)^{3/2} \cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^2 + \frac{0,3}{0,31} \cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^3 \right] - 0,055 \cdot (1 + 6,84^2 + 2 \cdot 1,5 \cos(0,35)) \cdot \frac{1,5 \cdot 0,31}{1,5 + 0,31} = 928,4 \quad [kW] \quad (5.156)$$

Výkon modelován od začátku až do konce aerodynamicky, včetně změny účinnosti s ohledem na geometrii, odpor i poměry tahů.

5.16 Model lineárního vzletu

Minimální účinnost turbín η_d^{min} se určí z Tab. 5.6 $\eta_d^{\text{min}} = 0,85$.

$$a(1) = 1 - \eta_d^{\text{min}} \quad [1]$$

$$a(1) = 1 - 0,85 = 0,15 \quad [1] \quad (5.157)$$

Plocha turbín A_{turb} :

$$A_{\text{turb}} = \max \left(\frac{A \gamma_t C_d}{4a(1)(1 - a(1))} \right) \quad [m^2]$$

$$A_{\text{turb}} = \max \left(\frac{100 \cdot 0,3 \cdot 0,17}{4 \cdot 0,15 \cdot (1 - 0,15)} \right) = 9,95 \quad [m^2] \quad (5.158)$$

Indukční faktor a :

$$a = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{A \gamma_t C_d}{A_{\text{turb}}} \right)} \quad [1]$$

$$a = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{100 \cdot 0,3 \cdot 0,17}{9,95} \right)} = 0,65 \quad [1] \quad (5.159)$$

V_a je tečná rychlost draka:

$$V_a^2 = V_w^2 \left(\frac{\cos(\theta) - \gamma_{out}}{1 + \gamma_t} \right)^2 \left((1 + \gamma_t)^2 + G_e^2 \right) \quad [m/s]$$

$$V_a = \sqrt{10^2 \cdot \left(\frac{\cos(0,35) - 0,31}{1 + 0,3} \right)^2 \cdot ((1 + 0,3)^2 + 10^2)} = 48,6 \quad [m/s] \quad (5.160)$$

Turbíny by měly poskytovat tah odpovídající odporu D_{turb} :

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_a^2 4a(1-a)A_{turb} \quad [N]$$

$$D_{turb} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 48,6^2 \cdot 4 \cdot 0,65 \cdot (1 - 0,65) \cdot 9,95 = 7335 \quad [N] \quad (5.161)$$

S ohledem na minimální účinnost podle diskové teorie η_{dmin} , výkon na rotoru je:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \rho_{air} V_a^3 4a(1-a)^2 A_{turb} = \eta_{d}^{min} P_{ob} \quad [W]$$

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 48,6^3 \cdot 4 \cdot 0,65 \cdot (1 - 0,65)^2 \cdot 9,95 = 318 \quad [kW] \quad (5.162)$$

Protože se jedná o vertikální vzlet, je zvoleno $\alpha_{TO} = 30^\circ$. Rychlost stoupání V_ξ :

$$V_\xi = \sqrt{\frac{2mg \cos(\alpha_{TO})}{\rho_{air} A C_L}} \quad [m/s]$$

$$V_\xi = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000 \cdot 9,81 \cdot \cos(0,53)}{1,225 \cdot 100 \cdot 1,5}} = 14 \quad [m/s] \quad (5.163)$$

Odpor draka:

$$D = \frac{1}{2} \rho_{air} V_a^2 4a(1-a)A \quad [N]$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 48,6^2 \cdot 4 \cdot 0,65 \cdot (1 - 0,65) \cdot 100 = 73766 \quad [N]$$

Bilance sil ve směru souřadného systému (ξ, ζ):

$$Q = D + mg \sin(\alpha_{TO}) \quad [N]$$

$$Q = 73766 + 2000 \cdot 9,81 \cdot \sin(0,53) = 83576 \text{ [N]} \quad (5.164)$$

$$L = mg \cos(\alpha_{T0}) \text{ [N]}$$

$$L = 2000 \cdot 9,81 \cdot \cos(0,53) = 16991 \text{ [N]} \quad (5.165)$$

$$Q_{turb} = D_{turb} + mg \sin(\alpha_{T0}) \text{ [N]}$$

$$Q_{turb} = 7335 + 2000 \cdot 9,81 \cdot \sin(0,53) = 17145 \text{ [N]} \quad (5.166)$$

Z disc theory dostáváme horní mez účinnosti vrtulí použitých jako pohon:

$$\eta_{turb,prop,disc} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{Q_{turb}}{\frac{1}{2} \rho_{air} A_{turb} V_{\xi}^2}}} \text{ [1]}$$

$$\eta_{turb,prop,disc} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{17145}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 9,95 \cdot 13,6^2}}} \cdot 100 = 40 \text{ [%]} \quad (5.167)$$

$\eta_{t,pr}$ volím z Tab. 5.6 mezi 0,5 až 0,7 jako $\eta_{t,pr} = 0,6$. Celkový požadovaný pohonný výkon:

$$P_{t,pr} = \frac{Q_{turb} V_{\xi}}{\eta_{t,pr} \eta_{turb,prop,disc}} \text{ [W]}$$

$$P_{t,pr} = \frac{17145 \cdot 13,6}{0,6 \cdot 0,4} = 155 \text{ [kW]} \quad (5.168)$$

Zbytek tah Q_{prop} :

$$Q_{prop} = Q - Q_{turb} \text{ [N]}$$

$$Q_{prop} = 83576 - 17145 = 66431 \text{ [N]} \quad (5.169)$$

Výkon potřebný pro vrtule P_{prop} :

$$P_{prop} = \frac{Q_{prop} V_{\xi}}{\eta_{t,pr} \eta_{turb,prop,disc}} \text{ [W]}$$

$$P_{prop} = \frac{66431 \cdot 13,6}{0,6 \cdot 0,4} = 1,3 \text{ [MW]} \quad (5.170)$$

Dodatečná hmotnost potřebná pro vzlet se pak odhadne pomocí energetické hustoty baterií E_{batt} a motorů E_{motors} , kde pro Li-ion baterie bývají hodnoty mezi 200–400 W/kg [69], volí se $E_{batt}=200$ W/kg. Pro Fly-gen turbíny bývá hustota výkonu kolem 2–6 kW/kg [70]. Volí se $E_{motors}=4000$ W/kg z Tab. 5.6:

$$V_z = V_\xi \sin(\alpha_{T0}) \quad [m/s]$$

$$V_z = 13,6 \cdot \sin(0,53) = 6,8 \quad [m/s] \quad (5.171)$$

Dodatečná hmotnost potřebná pro vzlet m_{TO} :

$$m_{TO} = P_{prop} \left(\frac{h}{V_z E_{batt}} + \frac{1}{E_{motors}} \right) \quad [kg]$$

$$m_{TO} = 1,3 \cdot \left(\frac{h}{6,8 \cdot 300} + \frac{1}{4000} \right) = 323 \quad [kg] \quad (5.172)$$

V extrémním případě vertikálního vzletu tah lze nastavit jako násobek tíhy:

$$Q \geq mg \quad [N]$$

$$Q \geq 2000 \cdot 9,81 = 19620 \quad [N] \quad (5.173)$$

5.17 Vliv hmotnosti draka na výrobu energie

5.17.1 GG-AWE

Pro GG-AWE je $\gamma_t = 0$ a $\gamma_{out} = 0,33$:

$$M^* = \frac{mg}{\cos(\theta) (\tan^2(\theta) + 1)} \quad [N]$$

$$M^* = \frac{2000 \cdot 9,81}{\cos(0,35) \cdot (\tan^2(0,35) + 1)} = 18437 \quad [N] \quad (5.174)$$

$$Q^* = \frac{1}{2} \frac{\rho_{air} A C_d V_w^2 [(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2]^{3/2}}{(1 + \gamma_t)^2} \quad [N]$$

$$Q^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0)^2 + 10^2]^{3/2}}{(1 + 0)^2} = 1050908 \quad [N] \quad (5.175)$$

Potom:

$$\frac{M^*}{Q^*} = 0,01754 \quad (5.176)$$

S ohledem na aproximaci Taylorovou řadou (rovnice (5.88)) je úhel potřebný ke kompenzaci gravitace nakonec vyjádřen jako:

$$\begin{aligned} \Delta^3(\sin \theta + \cos \theta)^2 - 2\Delta^2(\sin \theta + \cos \theta)(\cos \theta - \gamma_{out}) + \Delta(\cos \theta - \gamma_{out})^2 \\ - \frac{M^*}{Q^*} = 0 \\ 1,6438 \cdot \Delta^3 - 1,563 \cdot \Delta^2 + 0,372 \cdot \Delta - 0,01948 = 0 \end{aligned} \quad (5.177)$$

Řešením kubické rovnice získáváme tři výsledky, z nichž je pro dodatečný úhel $\Delta = 0,0749 \text{ rad} \approx 4,29^\circ$.

5.17.2 FG-AWE

Pro GG-AWE je $\gamma_t = 0,5$ a $\gamma_{out} = 0$:

$$\begin{aligned} M^* &= \frac{mg}{\cos(\theta)(\tan^2(\theta) + 1)} \quad [\text{N}] \\ M^* &= \frac{2000 \cdot 9,81}{\cos(0,35) \cdot (\tan^2(0,35) + 1)} = 18437 \quad [\text{N}] \end{aligned} \quad (5.178)$$

$$Q^* = \frac{1}{2} \frac{\rho_{air} A C_d V_w^2 [(1 + \gamma_t)^2 + G_e^2]^{3/2}}{(1 + \gamma_t)^2} \quad [\text{N}]$$

$$Q^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,225 \cdot 100 \cdot 0,17 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,5)^2 + 10^2]^{3/2}}{(1 + 0,5)^2} = 475768 \quad [\text{N}] \quad (5.179)$$

Potom:

$$\frac{M^*}{Q^*} = 0,0386 \quad (5.180)$$

S ohledem na aproximaci Taylorovou řadou (rovnice (5.88)) je úhel potřebný ke kompenzaci gravitace nakonec vyjádřen jako:

$$\begin{aligned} \Delta^3(\sin \theta + \cos \theta)^2 - 2\Delta^2(\sin \theta + \cos \theta)(\cos \theta - \gamma_{out}) + \Delta(\cos \theta - \gamma_{out})^2 \\ - \frac{M^*}{Q^*} = 0 \\ 1,6438 \cdot \Delta^3 - 2,407 \cdot \Delta^2 + 0,883 \cdot \Delta - 0,0875 = 0 \end{aligned} \quad (5.181)$$

Řešením kubické rovnice získáváme tři výsledky, z nichž je pro dodatečný úhel $\Delta = 0,0583 \text{ rad} \approx 3,34^\circ$.

Je zajímavé, že při stejné geometrii a hmotnosti má případ GG větší dodatečný náklon způsobený hmotností než případ FG. Nicméně samotné Δ neurčuje velikost ztrát výkonu.

5.18 Faktor využití výkonu ζ

$$P_{area} = \frac{1}{2} V_w^3 A \rho \quad [W]$$

$$P_{area} = \frac{1}{2} \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 1,225 = 61250 \quad [W] \quad (5.182)$$

- Pro Ground-gen AWE

Definujme jejich poměr jako tzv. faktor využití výkonu ζ (*Power Harvesting Factor*):

$$\zeta_{GG} = \frac{P_{GG}}{P_{area}} \quad [1]$$

$$\zeta_{GG} = \frac{1203}{61,25} = 19,6 \quad [1] \quad (5.183)$$

Horní mez faktoru ζ :

$$\zeta_{GG} \leq \zeta_{max} = \frac{4}{27} C_R \left(\frac{C_R}{C_D} \right)^2 \quad [1]$$

$$19,6 \leq 22,6 = \frac{4}{27} \cdot 1,52 \cdot \left(\frac{1,51}{0,15} \right)^2 \quad [1] \quad (5.184)$$

Betzův limit:

$$\frac{27}{16} \zeta = 31,6$$

- Pro Fly-gen AWE

Definujme jejich poměr jako tzv. faktor využití výkonu ζ (*Power Harvesting Factor*):

$$\zeta_{GG} = \frac{P_{FG}}{P_{area}} \quad [1]$$

$$\zeta_{GG} = \frac{1148}{61,25} = 18,7 \quad [1] \quad (5.185)$$

Horní mez faktoru ζ :

$$\zeta_{GG} \leq \zeta_{max} = \frac{4}{27} C_R \left(\frac{C_R}{C_D} \right)^2 \quad [1]$$

$$18,7 \leq 23 = \frac{4}{27} \cdot 1,52 \cdot \left(\frac{1,52}{0,15} \right)^2 \quad [1] \quad (5.186)$$

Betzův limit:

$$\frac{27}{16}\zeta = 31,1$$

- Pro unifikovaný model AWE

Definujme jejich poměr jako tzv. faktor využití výkonu ζ (*Power Harvesting Factor*):

$$\zeta_{GG} = \frac{P_{FG}}{P_{area}} \quad [1]$$

$$\zeta_{GG} = \frac{1089}{61,25} = 18,7 \quad [1] \quad (5.187)$$

Horní mez faktoru ζ :

$$\zeta_{GG} \leq \zeta_{max} = \frac{4}{27} C_R \left(\frac{C_R}{C_D} \right)^2 \quad [1]$$

$$19,6 \leq 23 = \frac{4}{27} \cdot 1,52 \cdot \left(\frac{1,52}{0,15} \right)^2 \quad [1] \quad (5.188)$$

Betzův limit:

$$\frac{27}{16}\zeta = 33,1$$

6 Základní rozměry rotorů létající větrné elektrárny

Pro tento výpočet byl využit *Fly generation* drak Makani z kapitoly 4.1.1. Jedná se o draka s osmi větrnými turbínami. Jeho maximální výkon dosahoval 600 kW.

$$P_{max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad [kW] \quad (6.1)$$

Z toho vyjádřeno:

$$D = \sqrt{\frac{8P}{\pi C_p \rho V_w^3}} \quad [m] \quad (6.2)$$

kde $16/27$ je Betzův limit (ideální účinnost), V_w rychlost větru, P_{max} maximální výkon ve větru, C_p je účinnost přeměny větru na mechanický výkon 0,45–0,5 pro realistickou účinnost (Betz = 0,593 maximum).

$$P_{1,turb} = \frac{P_{celk}}{8} \quad [kW] \quad (6.3)$$

kde 8 je počet turbín na draku.

Délka jednoho listu turbíny je přibližně:

$$R = \frac{D}{2} \quad [m] \quad (6.4)$$

Plocha rotoru turbíny je pak:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [m^2] \quad (6.5)$$

6.1 Výpočet

Pro demonstrativní výpočet byl použit drak Makani (Obr. 4.1) s osmi turbínami na palubě. V následujícím výpočty bylo provedeno šest odhadů rozměrů turbín větrného draka podle výkonu až do 1 MW.

Výkon na jednu turbínu z osmi:

$$P_{1,turb} = \frac{P_{celk}}{8} \quad [kW]$$

$$P_{1,turb} = \frac{10}{8} = 1,25 \quad [kW] \quad (6.6)$$

Tab. 6.1 Vypočtené hodnoty $P_{1,turb}$ pro různé výkony draka.

P_{celk} [kW]	$P_{1,turb}$ [kW]
10	1,25
50	6,25
100	12,5

300	37,5
500	62,5
1000	125

Průměr rotoru turbíny:

$$D = \sqrt{\frac{8P_{10}}{\pi C_p \rho V_w^3}} \quad [m]$$

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot 1250}{\pi \cdot 0,45 \cdot 1,225 \cdot 10^3}} = 2,4 \quad [m] \quad (6.7)$$

Tab. 6.2 Vypočtené hodnoty D pro různé výkony draka.

$P_{1,turb}$ [kW]	D [m]
10	2,4
50	5,4
100	7,6
300	13,2
500	17
1000	24

C_p bylo voleno mezi 0,45–0,5 pro realistickou účinnost (Betz = 0,593 maximum).
Délka jednoho listu turbíny je přibližně:

$$R = \frac{D}{2} \quad [m]$$

$$R = \frac{2,4}{2} = 1,2 \quad [m] \quad (6.8)$$

Tab. 6.3 Vypočtené hodnoty R pro různé výkony draka.

$P_{1,turb}$ [kW]	R [m]
10	1,2
50	2,7
100	3,8
300	6,6
500	8,5
1000	12

Plocha rotoru turbíny je pak:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [m^2]$$

$$A = \frac{\pi \cdot 2,4^2}{4} = 4,5 \quad [m^2] \quad (6.9)$$

Tab. 6.4 Vypočtené hodnoty A pro různé výkony draka.

$P_{1,turb}$ [kW]	A [m ²]
10	4,5
50	22,7
100	45,4
300	136,1
500	226,8
1000	453,5

ZÁVĚR

Systémy AWE zejména ty využívající příčný vítr, jsou považovány za budoucí technologii obnovitelné energie. Díky využití větrů ve vyšších nadmořských výškách se očekává, že sehrají důležitou roli v budoucnosti udržitelné výroby elektrické energie. Přestože bylo prozkoumáno mnoho konceptů a vyvinuto mnoho prototypů, na trhu jsou zatím pouze méně technologicky vyspělé zařízení a je jich velmi málo. Z tohoto důvodu je mimořádně důležité jasně identifikovat klíčové faktory ovlivňující návrh AWE systému, aby bylo možné lépe posoudit vhodnost konkrétního systému na určité lokalitě.

Za tímto účelem tato práce poskytlá přehled systémů nejen typu s příčným větrem, ale i dalších variant jako je válec využívající Magnusův efekt či velkého draka naplněného heliem s turbínou podobnou té konvenční. Detailně popisuje a shrnuje informace o dvou režimech výroby energie (Fly-gen a Ground-gen) a jejich variantách, o jejich principu fungování a hlavních komponentech, o existujících alternativách pro start a přistání draka a o integraci těchto systémů do obydlených oblastí a celkově do přírody. Díky tomu bylo možné provést vyhodnocení a porovnání systémů z hlediska: onshore a offshore, technických konstrukčních faktorů, mezi které patří aerodynamická výkonnost křídla i lana, odolnost a schopnost přežít nepříznivé podmínky; provozních faktorů, které se týkají kontinuity výroby energie, ovladatelnosti letící části i celého systému a možnosti startu/přistání; výrobních a logistických faktorů; a faktorů společenského přijetí, konkrétně ekologického dopadu systému a jeho bezpečnosti. Také bylo provedeno porovnání mezi AWE a konvenčními větrnými turbínami, kde se ukazuje že v budoucnu AWE systémy mohou hrát mnohem zásadnější roli, než doposud hrají běžné větrné elektrárny. AWE také výrazně překonávají tradiční pozemní větrné turbíny díky vyšší dostupnosti větrného zdroje a také z hlediska financí, kdy AWE mohou být až několikrát levnější v příštích letech.

Ve výpočtové části práce při odvozování rovnic je po celou dobu předpokládán ustálený let, což umožňuje odvodit analytické rovnice, které lze propojit s nástroji pro návrh systému. Hlavním výstupem této práce je rovnice (5.70), která modeluje výrobu energie obecného AWES se zemním i palubním generováním a zohledňuje ztráty způsobené gravitační silou. Je ukázáno, že výstupní výkon Ground-gen systémů je citlivější na gravitační síly než u systémů Fly-Gen.

Předpoklad stacionárního letu vede k zanedbání trajektorie a tím i s ní souvisejících ztrát. Rovněž jsou zanedbány účinky prověšení lana ve směru rychlosti draka (prověšení vlivem aerodynamických sil). Tyto ztráty jsou v současném modelu zohledněny pomocí účinností, místo toho, aby byly funkcí trajektorie. Model navíjení lana je také pouze přibližný ve srovnání s realitou. Konkrétně zanedbává přechodovou fázi mezi fází navíjení a generace. Model vzletu popisuje fázi stoupaní jen přibližně. Hlavní fyzikální principy jsou zohledněny. Plocha palubních větrných turbín je zde modelována pomocí *disc theory*. Nakonec je vypočítán faktor využití výkonu, který slouží jako hlavní ukazatel pro výkonnost systému AWE. V tomto případě jsou hodnoty nereálné, protože jsme počítali pouze s modelovým příkladem.

V poslední sekci jsou vypočteny základní rozměry rotorů pro Fly-gen AWE. Zde se jako demonstrativní příklad uvažuje drak Makani s osmi turbínami s výkonem od několika desítek kW až po jednu MW.

Létající větrné elektrárny mají do budoucna určitý potenciál. Otázkou však zůstává, zda-li tento potenciál využijí a prorazí jako moderní, ekologický, výkonný a velmi rentabilně výhodný způsob výroby energie a vhodně doplní již zavedené konvenční větrné elektrárny. Lze tedy konstatovat, že ačkoliv AWE technologie zatím nedosáhla plné komerční zralosti, její potenciál pro budoucí rozvoj udržitelné energetiky je značný. Další výzkum by se měl zaměřit na zvyšování účinnosti, zjednodušení konstrukcí, dlouhodobou spolehlivost a integraci do

energetických sítí. Experimentální ověření teoretických modelů a pokročilá simulace řízení letu budou klíčové pro posun této technologie směrem k praktickému nasazení

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BLANCH, Mike; MAKRIS, Alexi a VALPY, Bruce. Getting airborne – the need to realise the benefits of airborne wind energy for net zero. Online. 2022, s. 1-44. Dostupné z: Interreg North-West Europe, <https://vb.nweurope.eu/media/20517/bvga-getting-airborne-white-paper-220929.pdf>. [cit. 2025-02-21].
- [2] YASHANK, Gupta. *Magnus Based Airborne Wind Energy Systems*. Doktorská práce. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2019.
- [3] *George Pocock (inventor)*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/George_Pocock_\(inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/George_Pocock_(inventor)). [cit. 2025-01-29].
- [4] TREVISI, Filippo. *Configuration Optimisation of Kite-Based Wind Turbines*. Master degree. Padova: University of Padova, 2019.
- [5] FAGIANO, Lorenzo; QUACK, Manfred; BAUER, Florian; CARNEL, Lode a OLAND, Espen. Autonomous Airborne Wind Energy systems: accomplishments and challenges. Online. *Annual Reviews*. 2022, article 5, s. 1-30. Dostupné z: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-042820-124658>. [cit. 2025-04-01].
- [6] SCHMEHL, Roland. *Airborne Wind Energy*. Online. AWESCO. 2019. Dostupné z: <https://awesco.eu/awe-explained/>. [cit. 2025-01-29].
- [7] WEBER, Jochem; MARQUIS, Melinda; DRAXL, Caroline; COOPERMAN, Aubryn; LEMKE, Aleksandra et al. Airborne Wind Energy. Online. In: . National Renewable Energy Laboratory, 2021. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79992.pdf>. [cit. 2025-03-02].
- [8] *Airborne Wind Energy systems*. Online. Airborne Wind Europe. Dostupné z: <https://airbornewindeurope.org/awe-systems>. [cit. 2025-02-04].
- [9] THIMM, Lavinia. *Wind Resource Parametrisation and Power Harvesting Estimation using AWERA - the Airborne Wind Energy Resource Analysis tool*. Magisterská práce. Bonn: Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2022.
- [14] LEMAP. *Project overview*. Online. LEMAP. Omnidea. Dostupné z: <https://omnidea.net/lemap.omnidea.net/index.php/project-overview>. [cit. 2025-02-06].
- [15] *AIRBORNE WIND ENERGY FOR ISLANDS*. Online. Airborne Wind Europe. 2025. Dostupné z: https://airbornewindeurope.org/wp-content/uploads/2025/01/Airborne-Wind-Europe_AWE-for-islands_2025-01.pdf. [cit. 2025-02-21].
- [16] CHERUBINI, Antonello; MORETTI, Giacomo a FONTANA, Marco. Dynamic Modeling of Floating Offshore Airborne Wind Energy Converters. Online. *Green Energy and Technology*. © 2018, article Chapter 7, s. 137-163. Dostupné z: Airborne Wind Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_7. [cit. 2025-04-26].
- [18] JOSHI, Rishikesh; TERZI, Dominic von a SCHMEHL, Roland. System design and scaling trends in airborne wind energy demonstrated for a ground-generation concept. Online. *Wind Energ. Sci*. 2025, article 10, s. 695-718. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-10-695-2025>. [cit. 2025-04-26].
- [19] BENHAÏEM, Pierre a SCHMEHL, Roland. Airborne Wind Energy Conversion Using a Rotating Reel System. Online. *Green Energy and Technology*. 2018, article Chapter 22, s. 539-577. Dostupné z: Airborne Wind Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_22. [cit. 2025-04-26].

- [20] YE*, Zhihui; CHAER, Issa; HARTUNGI, Rusdy a ROSS, Marcus. Theoretical analysis of the power generation of pumping cycle kite power systems compared to traditional wind turbines in Aberdeen. Online. *Frontiers*. 2023, s. 1-8. Dostupné z: ResearchGate, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1091068>. [cit. 2025-02-04].
- [23] SCHMEHL, Roland a FAGGIANI, Pietro. Design and Economics of a Pumping Kite Wind Park. Online. *Green Energy and Technology*. 2018, article Chapter 16, s. 1-23. Dostupné z: ResearchGate, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_16. [cit. 2025-02-06].
- [33] UPPAL, Ali Arshad; FERNANDES, Manuel C. R. M.; VINHA, Sérgio a FONTES, Fernando A. C. C. Cascade Control of the Ground Station Module of an Airborne Wind Energy System. Online. *Energies*. 2021, č. 14, article 8337, s. 1-25. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14248337>. [cit. 2025-04-01].
- [34] *Airborne wind energy: Wind made AWESome*. Online. Interreg North-West Europe MegaAWE, 2022.
- [34] AHRENS, Uwe; SCHMEHL, Roland a DIEHL, Moritz. *Airbone Wind Energy*. Springer, 2013. ISBN 978-3-642-39964-0.
- [35] ROGA, Sukanta; BARDHAN, Shawli; KUMAR, Yogesh a K. DUBEY, Sudhir. Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. Online. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022, article 52. ISSN 2213-1388. Dostupné z: ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102239>. [cit. 2025-05-19].
- [36] BAUER, Florian; M.HACKL, Christoph; SMEDLEY, Keyue a M. KENNEL, Ralph. Crosswind Kite Power with Tower. Online. *Green Energy and Technology*. © 2018, article Chapter 18, s. 441-462. Dostupné z: Airborne Wind Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_18. [cit. 2025-04-26].
- [36] VOS, Hidde. *A Whole-Energy System Perspective to Floating Wind Turbines and Airborne Wind Energy in the North Sea Region*. MSc degree. Delft: Delft University of Technology, 2023.
- [37] CHERUBINI, Antonello; PAPINI, Andrea; VERTECHY, Rocco a FONTANA, Marco. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies,. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, roč. 51, s. 1461-1476. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.053>. [cit. 2025-02-07].
- [38] F. C. PEREIRA, André a M. M. SOUSA, João. A Review on Crosswind Airborne Wind Energy Systems: Key Factors for a Design Choice. Online. *Energies*. 2023, vol. 16, article 351, s. 1-40. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16010351>. [cit. 2025-03-24].
- [38] SALMA, Volkan; RUITERKAMP, Richard; KRUIJFF, Michiel; VAN PAASSEN, M. M. (René) a SCHMEHL, Roland. Current and Expected Airspace Regulations for Airborne Wind Energy Systems. Online. *Airborne Wind Energy*. 2018, article 29, s. 703-719. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_29. [cit. 2025-03-30].
- [39] BRUINZEEL, Leo; KLOP, Erik; BRENNINKMEIJER, Allix a BOSCH, Jaap. Ecological Impact of Airborne Wind Energy Technology: Current State of Knowledge and Future Research Agenda. Online. *Green Energy and Technology*. 2018, article Chapter 28, s. 679-701. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_28. [cit. 2025-04-25].

- [40] BECHTLE, Philip; SCHELBERGEN, Mark; SCHMEHL, Roland; ZILLMANN, Udo a WATSON, Simon. Airborne wind energy resource analysis. Online. *Renewable Energy*. 2019, article 141, s. 1103-1116. ISSN 0960-1481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.118>. [cit. 2025-03-02].
- [40] *Makani's first offshore energy kite flight*. Online. In: MAKANI. Youtube. 2019. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=F6NW0QeKLZA&t=5s>. [cit. 2025-03-03].
- [40] CHERUBINI, Antonello. *Advances in Airborne Wind Energy and Wind Drones*. PhD Thesis. Italy: Scuola Superiore Sant'Anna, Tecip Institute.
- [41] *Kite power: towards affordable, clean energy*. Online. TU Delft. © 2025. Dostupné z: <https://www.tudelft.nl/en/ae/current/research-stories/kite-power-towards-affordable-clean-energy>. [cit. 2025-05-19].
- [41] LOBNER, Peter. Altaeros Energies, Inc. – Buoyant Airborne Turbine (BAT). Online. 2024, s. 1-31. Dostupné z: https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Altaeros-Energies_BAT.pdf. [cit. 2025-03-03].
- [41] WINGS, Weird. *Ampyx Power AP-3, Airborne Wind Energy System*. Online. In: Reddit. 2022. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/WeirdWings/comments/u2pix3/ampyx_power_ap3_airborne_wind_energy_system/. [cit. 2025-03-10].
- [42] *The solution in depth*. Online. Kitemill. © 2025. Dostupné z: <https://www.kitemill.com/the-solution>. [cit. 2025-03-10].
- [43] *The Future of Energy is Airborne*. Online. Windlift. © 2024. Dostupné z: <https://windlift.com/>. [cit. 2025-05-20].
- [43] *Renewable energy: The 'kite' that pulls energy out of the sky*. Online. BBC. 14 August 2022. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/av/science-environment-62513387>. [cit. 2025-03-10].
- [44] SALARI, Mahdi Ebrahimi. *Direct Interconnection Technique Applied to Marine Renewable Generators, Specifically Airborne Wind Energy*. Doctoral thesis. Ireland: University of Limerick, 2018.
- [44] *Technology*. Online. KiteKraft. © 2025. Dostupné z: <https://www.kitekraft.de/technology>. [cit. 2025-03-10].
- [45] *Startup Kitekraft generates wind energy using kites*. Online. Tum. 2023. Dostupné z: <https://www.ed.tum.de/en/ed/news-single-view-start/article/startup-kitekraft-generates-wind-energy-using-kites/>. [cit. 2025-03-10].
- [45] *Periodic Reporting for period 2 - AWESCO (Airborne Wind Energy System Modelling, Control and Optimisation)*. Online. European Commission. 26 June 2019. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/642682/reporting>. [cit. 2025-03-10].
- [46] *Green Energy from High Altitudes*. Online. Enerkite. © 2025. Dostupné z: <https://enerkite.de/en/#produkte>. [cit. 2025-03-17].
- [47] KITEPOWER. *The Kitepower Hawk 30kW*. Online. © KITEPOWER AIRBORNE WIND ENERGY. Kitepower. © 2025. Dostupné z: <https://thekitepower.com/resources/product/New%20Powerful%20Ways%20-%20The%20Kitepower%20Hawk%2030kW.pdf>. [cit. 2025-03-03].
- [48] IEEE SPECTRUM. *Flying Kites Deliver Container-Size Power Generation Automated wind-energy system brings portable renewables off-grid*. Online. IEEE

- Spectrum. 17 Jan 2024. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/micro-wind-power-kitepower>. [cit. 2025-03-03].
- [49] KITEPOWER. *We envision a world where Kitepower systems are deployed globally, delivering clean, affordable and sustainable energy to everyone*. Online. © KITEPOWER AIRBORNE WIND ENERGY. Kitepower. © 2025. Dostupné z: <https://thekitepower.com/about/>. [cit. 2025-03-03].
- [50] KITEPOWER. *The Kitepower Falcon 100kW*. Online. © KITEPOWER AIRBORNE WIND ENERGY. Kitepower. © 2025. Dostupné z: <https://thekitepower.com/resources/product/New%20Powerful%20Ways%20-%20The%20Kitepower%20Falcon%20100kW.pdf>. [cit. 2025-03-03].
- [51] AIRBORNE WIND ENERGY SYSTEMS. Online. SkySails Power. © 2025. Dostupné z: https://skysails-power.com/wp-content/uploads/sites/6/2022/09/SkySailsPower_Brochure_Airborne-Wind-Energy-Systems.pdf. [cit. 2025-03-10].
- [52] *Game changer for wind power*. Online. SkiSails Power. © 2025. Dostupné z: <https://skysails-power.com/media-material/>. [cit. 2025-03-21].
- [53] SKYSAILS POWER SYSTEMS SITE CHECKLIST. Online. SkySails Power. © 2025. Dostupné z: https://skysails-power.com/wp-content/uploads/sites/6/2023/03/SkySailsPower_Flyer_Site-requirements.pdf. [cit. 2025-03-10].
- [54] DIEHL, Moritz. Airborne Wind Energy: Basic Concepts and Physical Foundations. Online. *Green Energy and Technology*. © 2013, article Chapter 1. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-39965-7_1. [cit. 2025-04-22].
- [55] KHEIRI, Mojtaba; BOURGAULT, Frederic; NASRABAD, Vahid Saberi a VICTOR, Samson. On the aerodynamic performance of crosswind kite power systems. Online. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. © 2018, vol. 181, s. 1-13. ISSN 0167-6105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.006>. [cit. 2025-05-20].
- [56] TREVISI, Filippo; GAUNAA, Mac a MCWILLIAM, Michael. Unified engineering models for the performance and cost of GroundGen and Fly-Gen crosswind Airborne Wind Energy Systems. Online. *Renewable Energy*. © 2020, no. 162, s. 893-907. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.129>. [cit. 2025-05-17].
- [57] *Oswalds efficiency factor for trapezoidal wing*. Online. Aviation. 2023. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/98620/oswalds-efficiency-factor-for-trapezoidal-wing>. [cit. 2025-05-11].
- [58] SCHMEHL, Roland. *Airborne Wind Energy*. Online. PowerWeb webinar lecture, 2018.
- [59] SOMMERFELD, Markus; DÖRENKÄMPER, Martin; SCHUTTER, Jochem De a CRAWFORD, Curran. Impact of wind profiles on ground-generation airborne wind energy system performance. Online. *Wind Energ. Sci*. © 2023, article 8, s. 1153-1178. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-8-1153-2023>. [cit. 2025-04-18].
- [60] EIJKELHOF, Dylan a SCHMEHL, Roland. Six-degrees-of-freedom simulation model for future multi-megawatt airborne wind energy systems. Online. *Renewable Energy*. 2022, no. 196, s. 137-150. ISSN 0960-1481. Dostupné z: ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.094>. [cit. 2025-02-23].

- [61] *Vysvětli mi Obukhov length L.* Online. ChatGPT. © 2025. Dostupné z: <https://chatgpt.com/c/6800cec0-c36c-8001-bf0d-32f9520f2dd7>. [cit. 2025-04-19].
- [62] LI, Haocheng; OLINGER, David J. a DEMETRIOU, Michael A. Attitude Tracking Control of an Airborne Wind Energy System. Online. *Airborne Wind Energy*. 2018, article 10, s. 215-239. Dostupné z: Green Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-10-1947-0_10. [cit. 2025-05-21].
- [63] LOZANO JR, R.; ALAMIR, M.; DUMON, J. a HABLY, A. Control of a wind power system based on a tethered wing. Online. 2012, s. 1-6. [cit. 2025-05-21].
- [64] *Drag coefficient.* Online. Wikipedia. © 2025. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient. [cit. 2025-05-16].
- [65] *Zero-lift drag coefficient.* Online. Wikipedia. 2 October 2022. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Zero-lift_drag_coefficient. [cit. 2025-05-21].
- [66] *Jak nejlépe vybrat baterie pro fotovoltaiku.* Online. Schlieger. 2024. Dostupné z: <https://schlieger.cz/blog/jak-nejlepe-vybrat-baterie-pro-fotovoltaiku/>. [cit. 2025-05-16].
- [67] *Elektrický generátor.* Online. Svět energie. © 2025. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/energetika-ctive/jaderne-elektrarny/elektricky-generator-1>. [cit. 2025-05-16].
- [68] *Účinnost elektrického vs spalovacího motoru.* Online. SimpleLift. 2023. Dostupné z: <https://simplelift.cz/ucinnost-elektrickeho-vs-spalovaciho-motoru/>. [cit. 2025-05-16].
- [69] *Hustota výkonu lithium iontové baterie |Ket.* Online. KET BATTERY. 2023. Dostupné z: <https://www.lifepo4-battery-manufacturer.com/cz/blog/power-density-of-lithium-ion-battery-ket.html>. [cit. 2025-05-18].
- [70] *Jaká může být Emotor u AWE systému?* Online. ChatGPT. 2025. Dostupné z: <https://chatgpt.com/c/681e06c6-bb4c-8001-b6cb-788cd418dc71>. [cit. 2025-05-18].
- [71] *Der Traum vom Reichskraftturm.* Online. Histomich. Dostupné z: <https://www.histomich.de/tag/windkraft/>. [cit. 2025-02-05].
- [72] *LadderMill: The mechanical history of the laddermill mechanics would have the full story of Doug Selsam's 1970's notarized matters.* Online. In: Energy kite systems. 2000. Dostupné z: <http://www.energykitesystems.net/LadderMill/index.html>. [cit. 2025-02-05].

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ

Veličina	Jednotka	Popis veličiny
A	–	Plocha křídla
a	–	Indukční faktor – míra zpomalení proudu proudícího diskem
a(1)		Hodnota indukčního faktoru
a _{el}	–	Koeficient pro cenu generátoru
A _g	m ²	Potřebná plocha pro start a přistání
A _{kite}	m ²	Plocha křídla
α _{TO}	rad	Úhel stoupání při vzletu
A _{prop}	m ²	Plocha rotoru vrtule
AR	–	Štíhlostní poměr křídla
A _{turb}	m ²	Plocha rotoru turbíny na křídle
β	rad	Úhel elevace
C _d	–	Součinitel odporu
C _{d0}	–	Součinitel odporu při nulovém vztlaku
C _L	–	Součinitel vztlaku
C _l	–	Odporový součinitel lana
C _p	–	Výkonový koeficient
C _R	–	Výsledný aerodynamický koeficient
D	N	Aerodynamická odporová síla
D _{turb}	N	Odpor způsobený turbínami
d	m	Průměr lana
Δ	rad	Dodatečný náklon křídla způsobený hmotností
δ	%	Maximální dovolený průhyb konstrukce
δ _{in}	%	Průhyb ve středu křídla
δ _{out}	%	Průhyb na konci křídla
E _{gen}	W/kg	Měrný výkon generátoru
η _d ^{min}	–	Minimální účinnost dle teorie disku
η _{in}	–	Účinnost navíjecí fáze
η _{out}	–	Účinnost odvíjecí fáze včetně konverze
η _{pr}	–	Účinnost vrtulí vůči teorii disku
η _t	–	Účinnost palubní výroby energie
η _{t,pr}	–	Účinnost turbín použitých jako vrtule
η _{gen}		Účinnost elektrického generátoru
η _{tr}		Účinnost trajektorie
η _{mot}		Účinnost generátoru používaného jako motor
η _{batt}		Účinnost ukládání energie využívané během navíjení
E _{TO}	J	Energie spotřebovaná při vzletu
g	m/s ²	Gravitační konstanta
γ _{in}	–	Poměr rychlosti navíjení k rychlosti větru
γ _{out}	–	Poměr rychlosti odvíjení k rychlosti větru
γ _t	–	Poměr odporu turbín k aerodynamickému odporu
G _e	–	Glide ratio (doslovně klouzavý poměr)
h	M	Operační výška
h _{min}	M	Minimální operační výška
h _t	M	Výška věže
h _{t,max}	M	Maximální výška věže
L	N	Aerodynamická vztlaková síla
λ	–	Lagrangeův multiplikátor

λ_{CL}	–	Lagrangeův multiplikátor na horní mez CL
$\lambda_{\delta in}$	–	Multiplikátor průhybu ve středu křídla
$\lambda_{\delta out}$	–	Multiplikátor průhybu na konci křídla
λ_{hmin}	–	Multiplikátor na minimální výšku
λ_{ht}	–	Multiplikátor na horní mez výšky věže
λ_M	–	Multiplikátor pro pevnostní omezení materiálu
λ_{Prated}	–	Multiplikátor na jmenovitý výkon
λ_{te}	–	Multiplikátor na pevnost lana
m_{el}	kg	Hmotnost elektroniky na palubě
m_{gl}	kg	Konstrukční hmotnost
m_{te}	kg	Hmotnost lana
m_{TO}	kg	Vzletová hmotnost
m	kg	Celková hmotnost draka
n_y	roky	Počet let provozu
P_{cycle}	W	Průměrný výkon v pumping cycle
P_{FG}	W	Palubní výkon bez odvíjení
P_{GG}	W	Pozemní výkon bez palubní výroby
P_{gr}	W	Pozemní vyrobený výkon
P_{ob}	W	Palubní vyrobený výkon
P_w	W/m ²	Hustota výkonu větru
P_r	W	Výkon spotřebovaný během navíjení lana
P_{out}	W	Celkový výkon během fáze výroby
P_{prop}	W	Výkon požadovaný vrtulemi
$P_{t,pr}$	W	Výkon nutný pro vyvinutí tahu Q_{turb}
Q	N	Tah při vzletu
r	m	Délka lana
R_a	N	Aerodynamická výslednice
ρ_{air}	kg/m ³	Hustota vzduchu
ρ_{carb}	kg/m ³	Hustota konstrukčního materiálu
s	m	Rozpětí křídla
$S_{F\sigma lim}$	–	Bezpečnostní faktor lana
T	N	Síla v laně
$T_{GG,max}$	N	Maximální síla lana
$Tether$	–	Lano spojující draka se zemí
θ	rad	Úhel lana na spoji s drakem
V	V	Napětí přenosu elektřiny v laně
V_{in}	m/s	Spínací rychlost větru
V_{out}	m/s	Rychlost odvíjení lana
V_r	m/s	Složka rychlosti větru kolmá na křídlo
V_w	m/s	Rychlost větru
$V_{w }$	m/s	Složka rychlosti větru kolmá na plochu draka
V_a	m/s	Relativní rychlost větru na draku
V_τ	m/s	Tangenciální rychlost
V_z	m/s	vertikální složku rychlosti vzletu
V_k	m/s	Rychlost draka
$V_{w }$	m/s	Rychlost
V_ξ	m/s	Rychlost stoupání
f	–	Navíjecí faktor
λ	–	Rychlostní faktor

χ	°	Úhel kurzu
φ	°	Azimutový úhel
q	Pa	Dynamický větrný tlak
κ	–	Kinematický poměr
n_y	roky	Počet let provozu
i	–	Diskontní sazba
e	–	Oswaldova efektivita
l	m	Podélná souřadnice lana
τ_{out}	–	Poměr doby strávené v produkční fázi
τ_{in}	–	Poměr doby strávené v rekuperační fázi
F_{tether}	N	Výsledná síla, kterou působí drak na lano směrem k navijecímu bodu (generátoru)
ζ	–	Faktor využití výkonu

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam	Popis
AWE	Airborne Wind Energy	Létající větrné elektrárny
LCOE	Levelized Cost of Energy	Levelizované náklady na energii
GG-AWE	Ground Generation AWE	Systém s pozemní výrobou energie
FG-AWE	Fly Generation AWE	Systém s výrobou energie na draku
CKPS	Crosswind Kite Power System	Systém s drakem využívající příčný vítr
AWESCO	Airborne Wind Energy Consortium	Společnost sdružující výrobce a výzkumníky AWE
GE	General Electric	Firma
GS	Ground Station	Pozemní stanice
VTOL	Vertical Takeoff and Landing	Vertikální vzlet a přistání
PVTOL	Planar Vertical Takeoff and Landing	Plošný svislý vzlet a přistání
ABM	Airborne Module	Létající modul
CAPEX	Capital Expenditures	Kapitálové náklady
DEVEX	Development Expenditure	Výdaje na vývoj
DECEX	Developmental Capital Expenditure	Výdaje na dekomisi
OPEX	Operating Expenses	Provozní výdajů
NIMBY	Not In My Back-Yard	
RRP	Rotating Reel Parotor	Rotující naviják
KSU	Kite Steering Unit	Řídící jednotka draka
TU	Technische Universität	Technická univerzita
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine	Horizontální axiální větrná turbína
CIBSE	Chartered Institution of Building Services	
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Bezpilotní letecké systémy
OMC	Operation and Maintenance Cost	Náklady na provoz a údržbu
ICC	Initial Capital Cost	Počáteční investiční náklady
AEP	Annual Energy Production	Roční výroba elektřiny
CRF	Capital Recovery Factor	Faktor návratnosti kapitálu
AGL	Above Ground Level	Výška nad mořem
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
FAA	Federal Aviation Administration	Federální letecký úřad
WRF	Weather Research & Forecasting Model	Model pro výzkum a předpověď počasí
NREL	National Renewable Energy Laboratory -	Národní laboratoř pro obnovitelné zdroje energie ve Spojených státech.
LEI	Leading Edge Inflatable	Nafukovací zařízení s náběžnou hranou
SLE	Supported Leading Edge	Podporovaná náběžná hrana
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology	Švýcarské federální laboratoře pro vědu a technologii materiálů
UHMWPE	Ultra-High-Molecular Weight Polyethylene	Polyethylen s velmi vysokou molekulovou hmotností
IMU	Akcelerometry a gyroskopy	

UWB	Ultrawideband		Ultraširokopásmový
PID			Proporcionální, integrační a derivační části
EIA	Environmental Assessment	Impact	Vyhodnocení vlivů na životní prostředí
BAT	Buoyant Airborne Turbine		Vztlaková vzdušná turbína
KCU	Kite control unit		Řídicí jednotka draka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 0.1 Předpokládaný vývoj instalace AWE od roku 2025 do konce roku 2035 ([1], upraveno).	10
Obr. 1.1 Větrná elektrárna s několika rotory podle německého inženýra Hermanna Honnefa [71].	11
Obr. 1.2 Koncept „Laddermill“ profesora Wubbo Ockelse ([72], upraveno).....	12
Obr. 1.3 Testování prototypu létajícího draka v Austrálii v květnu 1986 [54].	12
Obr. 1.4 Rozdělení technologie AWE podle letových operací draka a typu generování energie s jednotlivými výrobci ([7], upraveno).	13
Obr. 1.5 Princip pumping cycle	14
Obr. 1.6 Schéma Ground-gen s měkkými křídly systému s translačním pohybem po trajektorii připomínající osmičku a fází odvíjení a navíjení lana	15
Obr. 1.7 Základní model příčného větru s měkkým drakem Ground-gen AWE	15
Obr. 1.8 Schéma On-board generation systému s osmičkovým letem	16
Obr. 1.9 Základní model příčného větru Fly-gen AWE	17
Obr. 1.10 Schéma Rotary concept [8].	17
Obr. 1.11 Prototyp draka založeného na Magnusově efektu od firmy Omnidea Lda. [14].	18
Obr. 1.12 Schematický náčrt čtyř hlavních typů plovoucích plošin pro větrné elektrárny na moři	21
Obr. 1.13 Náčrt příčného letu draka při pohledu shora (a), s azimutálním úhlem $\varphi = 0$ (b), a při pohledu z boku s elevačním úhlem $\beta \neq 0$, zatímco $\varphi = 0$ (c)	22
Obr. 1.14 Létající rotor nazývaný RRP.....	23
Obr. 1.15 Schéma dvoufázové nespojitě výroby energie pro GG-AWE. (a) Fáze výroby energie probíhá během odvíjení lan, když letadlo provádí let s příčným větrem. (b) Fáze obnovy probíhá tak, aby se minimalizovala energie spotřebovaná na obnovu	24
Obr. 1.16 Souřadnice draka v prostoru. Definice relativní rychlosti větru: $V_a = V_w - V_k$. Rychlost draka V_k je rozložena na radiální a tečné složky, označené jako $V_{k,r}$ a $V_{k,\tau}$. Úhel kurzu χ je měřen v tečné rovině τ , zatímco sférické souřadnice (r, θ, φ) jsou definovány vzhledem k souřadnému systému větru x_w, y_w, z_w . Úhel elevace lana je definován jako $\beta = 90^\circ - \theta$ [23].	26
Obr. 1.17 Princip pumping cycle. Dvourozměrná trajektorie letu je vypočtena pomocí kvazistacionárního modelu. Radiální úsečka, kde β_0 zůstává konstantní, představuje fázi tahu, ale explicitně nezachycuje manévry při letu s příčným větrem. Místo toho je odvozen na základě zprůměrovaného stavu letu. Časová integrace začíná v t_0 , následuje přechodová fáze v t_A , trakční fáze v t_B a končí v t_C , což znamená konec cyklu ([23], upraveno).	27
Obr. 1.18 Reprezentativní manévr letu ve tvaru osmičky v rovině φ - β [23].	27
Obr. 1.19 Systém větrné energie bez reverzního pumping režimu ([44], upraveno).	29
Obr. 1.20 Přistávací plošina s rotačním systémem firmy Ampyx Power [38].	30
Obr. 1.21 Vertikální vzlet draka společnosti Makani (vlevo) a TwingTec (vpravo) ([38], upraveno).	30
Obr. 1.22 Výkonová křivka systému draka na rychlosti větru ([23], upraveno).	32
Obr. 1.23 Analogie mezi součástmi větrné turbíny s horizontální osou a AWE ([18], upraveno).	33
Obr. 1.24 Scénář kumulativní globální instalované kapacity AWE sleduje vývoj trhu se zavedenými větrnými turbínami, podobně jako tomu bylo u konvenčních větrných turbín (HAWT) v letech 1985 až 2010 ([34], upraveno).	33
Obr. 1.25 Porovnání výkonů větrného draka a konvenční větrné elektrárny v různých nadmořských výškách ([20], upraveno).	34
Obr. 1.26 Weibullovo a kumulativní rozdělení četností větru v lokalitě Aberdeen ve Skotsku ([20], upraveno).	35

Obr. 1.27 Srovnání měsíčních výkonů větrného draka a konvenční větrné elektrárny ([20], upraveno).....	36
Obr. 1.28 Levelizované náklady na energii jako funkce celkové plochy křídla na jednotku ([23], upraveno).....	37
Obr. 1.29 Trend průměrné LCOE pro AWE a technologii větrných turbín na pevnině ([1], upraveno).....	37
Obr. 1.30 Indikativní podíl celkových nákladů projektu pro reprezentativní systémy AWE a etablovanou větrnou technologii nainstalovanou v roce 2025 ([1], upraveno).....	38
Obr. 1.31 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2040 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).....	39
Obr. 1.32 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2040 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).....	40
Obr. 1.33 Globální LCOE pro reprezentativní systém AWE v porovnání s nejlevnější alternativou v roce 2050 pro 500 kW projekt ([1], upraveno).....	40
Obr. 2.1 3D vizualizace provozní oblasti systému AWE. V tomto případě je R délka lana (800 m) a je zohledněna bezpečnostní vzdálenost 50 m ([1], upraveno).....	43
Obr. 2.2 Uspořádání systému pro hustotu vyšší než $1/L^2$	43
Obr. 2.3 Schematické znázornění letové oblasti draka ([58], upraveno).	44
Obr. 2.4 Pohled na CFD modelování vírových efektů pro návrh větrné farmy AWE [36].	44
Obr. 2.5 20leté průměrné profily rychlosti větru z offshore WRF simulací NREL na třech hlavních lokalitách: Severozápadní Pacifik – levý graf, Havaj – pravý graf, Atlantik – spodní graf [7].	46
Obr. 3.1 Ukázka jednotlivých druhů křídel měkkých a pevných [5]	48
Obr. 3.2 Hybridní křídlo LEI C-draka vyvinutého na TU Delft [41].	49
Obr. 3.4 Různé typy letadel v systémech Ground-gen. (a) LEI SLE drak; (b) LEI C-drak; (c) Foil drak, design od Skysails; (d) větroň, konstrukce od společnosti Ampyx Power; (e) šípovité tuhé křídlo, konstrukce od společnosti Enerkite; (f) polotuhé křídlo, konstrukce od společnosti Kitegen ([37], upraveno).	50
Obr. 3.5 Řízení napětí řídicích lan (a) Řídicí lana jsou připevněna k náběžné a odtokové hraně draka LEI SLE. (b) Řídicí modul KSU lze použít k řízení trajektorie letu a úhlu náběhu ([37], upraveno).	51
Obr. 3.6 Různé typy letounů v systémech Fly-gen. (a) Letoun se čtyřmi turbínami, design od Makani Power. (b) Letoun složený z rámu křídel a turbín, design od Joby Energy. (c) Toroidní vztlakový aerostat s větrnou turbínou uprostřed, design od Altaeros Energies. (d) Staticky zavěšený kvadrotor v autorotaci, design od Sky WindPower ([37], upraveno).	51
Obr. 3.7 Schéma tří různých koncepcí GG–AWES s pohyblivou základnou.	52
Obr. 3.8 Vizualizace duálního letadlového systému se sníženým odporem lana [34].	53
Obr. 3.9 Vzlet duálního systému draků ([35], upraveno).	54
Obr. 3.10 Vyobrazení navržené ocelové rámové věže se závěsnými lany pro vlečného draka (a), vztlakového draka s pasivním startem a přistáním (b), vztlakového draka s katapultem (c) a vztlakového draka s otočným ramenem (d) ([36], upraveno).	55
Obr. 3.11 Věž s napjatými lany pro nasazení na moři [36].	56
Obr. 3.12 Uspořádání řízení GG-AWE s příčným větrem. (a) s palubními řídicími akčními turbínami; (b) s létajícím řídicím modulem; (c) řízení pomocí silových lan; (d) s přidavným	58
Obr. 3.13 Schéma řízení AWE systému ([5], upraveno).	59
Obr. 4.1 Drak Makani společnosti X/Google [40].	61
Obr. 4.2 Konstrukce draka Makani s popisem jeho částí ([5], upraveno).	62
Obr. 4.3 Vizualizace projektu Altaeros BAT [41].	63
Obr. 4.4 Prototyp AWE od společnosti WindLift [43].	64

Obr. 4.5 Vizualizace systému od společnosti KiteKraft [45].	65
Obr. 4.6 Vizualizace draka společnosti KiteKraft	66
Obr. 4.7 Větrný drak nizozemské společnosti OrangeAerospace AMPYX Power AP3 [41].	67
Obr. 4.8 Drak od společnosti Kitemill [43].	67
Obr. 4.9 Systém německé společnosti EnerKite [45].	68
Obr. 4.10 Schéma základové stanice ([46], upraveno).	68
Obr. 4.11 Schematické znázornění systému Hawk [47].	70
Obr. 4.12 Porovnání výkonu v závislosti na rychlosti větru systému Falcon a tradiční větrné elektrárny ([50], upraveno).	71
Obr. 4.13 Závislost výkonu draka Hawk na rychlosti větru ([47], upraveno).	71
Obr. 4.14 Závislost výkonu draka Falcon na rychlosti větru ([50], upraveno).	71
Obr. 4.15 Větrný drak od společnosti SkySails Power ([52], upraveno).	72
Obr. 4.16 Ukázka možnosti umístit vedle sebe více systémů od firmy SkySails a vytvořit tzv. AWE farmu ([53], upraveno).	73
Obr. 5.1 Graf rovnice (5.7) pro $\beta \in [-30^\circ, 90^\circ]$ [36].	77
Obr. 5.2 Výška úvazku a relativní rychlost větru z pohledu od draka [4].	79
Obr. 5.3 Rychlostní trojúhelník a aerodynamické síly při pohledu shora pro GG-AWE [4].	79
Obr. 5.4 Elevace lana β [°], rychlost větru a celková aerodynamická síla na draka letícího příčně vůči větru se zohledněním prověšení lana. θ [°] je sklon lana u připojení k drakovi [4].	83
Obr. 5.5 Rychlostní trojúhelník a aerodynamické síly během fáze navíjení. β [°] je elevace lana [4].	84
Obr. 5.6 Rychlostní trojúhelník a rovnováha sil pro systém Fly-gen AWE [4].	86
Obr. 5.7 Rychlostní trojúhelník a aerodynamické síly při pohledu shora pro obecný AWE s příčným větrem [4].	88
Obr. 5.8 Síly působící při lineárním (a) a vertikálním (b) vzletu [4].	91
Obr. 5.9 : Bilance sil a relativní rychlosti větru s ohledem na hmotnost [4].	94
Obr. 5.10 Ukázka dvou lokalit na mapě [59].	96
Obr. 5.11 Porovnání pravděpodobnostních rozdělení roční rychlosti větru U simulované modelem WRF v jednotlivých výškových úrovních mezi pevninou (a) a mořem (b) do výšky 1000 m. Nelineární barevná škála znázorňuje vysokou pravděpodobnost výskytu nízkých nadmořských výšek, zejména na pevnině, a zároveň rozlišuje nižší, široce rozptýlené četnosti ve vyšších výškách ([59], upraveno).	97
Obr. 5.12 Větrné růžice ročních statistik směru a rychlosti větru v Pritzwalk (na pevnině) a FINO3 (na moři) pro výšky 100 a 500 m během simulovaných let [59].	98

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Porovnání konvenční větrné elektrárny a větrného draka o stejném výkonu [20].	35
Tab. 4.1 Specifikace jednotlivých komponent draka Hawk [47].	70
Tab. 4.2 Jednotlivé parametry provozu draka Hawk [47]. ..	Chyba! Záložka není definována.
Tab. 4.3 Parametry draka SKS PN-14 [52].	73
Tab. 5.1 Třídy stability na základě Obuchovovy délky L [59].	99
Tab. 5.2 Jak interpretovat hodnoty L? [61]	99
Tab. 5.3 Určené hodnoty z lit. [4] určené pro výpočet.	99
Tab. 5.4 Doplnující parametry vycházející z článku [18].	100
Tab. 5.5 Hodnoty volené nebo jasně definované.....	100
Tab. 5.6 : Rozsahy, rozdělení a popisy modelových parametrů [4].	100
Tab. 5.7 Průběh celkového výkonu, které může křídlo získat z větrného pole na úhlu β	103
Tab. 5.8 Závislost Pr na úhlu β	105
Tab. 5.9 Závislost P_{cycle} na úhlu β	106
Tab. 5.10 Závislost Va na úhlu β	106
Tab. 5.11 Závislost L na úhlu β	106
Tab. 5.12 Závislost D na úhlu β	107
Tab. 5.13 Závislost Tr na úhlu β	107
Tab. 6.1 Vypočtené hodnoty $P_{1,turb}$ pro různé výkony draka.	119
Tab. 6.2 Vypočtené hodnoty D pro různé výkony draka.....	120
Tab. 6.3 Vypočtené hodnoty R pro různé výkony draka.	120
Tab. 6.4 Vypočtené hodnoty A pro různé výkony draka.....	121