

Läänemere avamere tuulepargi MP2 mõjuhinnang õhu- ja mereseirele radarite abil

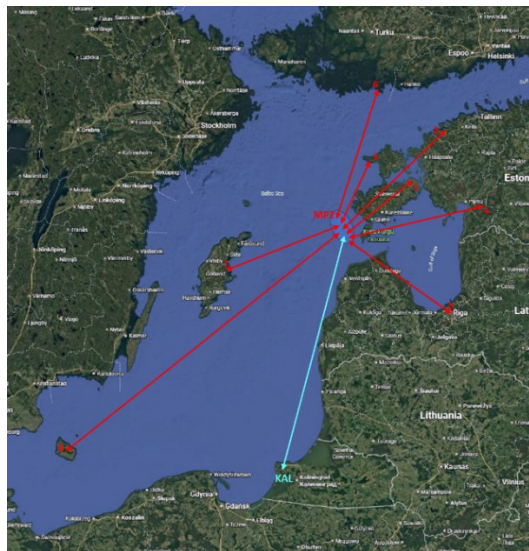
1. Geomeetriline paigutus ja distantid

Läänemerega piirnevate tähtsamate positsioonide paiknemine ning ligikaudsed vahemaad:

Kaliningrad → Liivi laht: ~300 km

Liivi laht → Tallinn: ~180 km

Kokku: ~480 km



Merekaardil Läänemeres meretuulepargi MP2 paiknemisala ning VF Kaliningradi oblastiga piirnevad tähtsamad positsioonid.

Kaliningrad → Liivi laht → Tallinn

(sihtmärk: madallennul tiibrakett või droon)

Analüüs samm-sammult koos ajaskaala ja radarituvastuse modelleerimise tulemustega.

Kiirus (tiibrakett):

250–300 m/s (≈ 900 – 1100 km/h)

Kasutame: $v = 270$ m/s

2. Lennuprofiil

Tüüpiline rünnak:

kõrgus: 10–30 m (sea-skimming)

trajektoor: mööda rannikut / üle vee

eesmärk: vältida radarhorisonti

3. Ajaskaala (ilma tuulepargita)

Kogu lennuaeg:

Vahemaa: 480 km

- Kiirus: 270 m/s
- Lennuaeg: $480\,000\text{ m} / 270\text{ m/s} = 1778\text{ s} \approx 29,6\text{ min}$
- 40 km eelhoiatus: $40\,000\text{ m} / 270\text{ m/s} = 148\text{ s} \approx 2,5\text{ min}$
- 15 km: 56 s
- 10 km: 37 s

~30 min Kaliningradist Tallinnani

Radar avastab (ilma tuulepargita)

Eeldus:

- avastuskaugus: **40 km**

$$t = 40000 / 270 \approx 148 \text{ s} = \frac{40000}{270} \approx 148 \text{ s} = 270 / 40000 \approx 148 \text{ s}$$

~2.5 min eelhoiatusaeg

Arvutuses kasutatakse konservatiivse näitena 40 km efektiivset madallennu avastuskaugust. Tegelik väärtus sõltub radari antenni kõrgusest, sagedusalast, mereoludest, sihtmärgi RCS-ist, ilmastikust ja signaalitöötlustest.

4. Tuulepargi asukoht (Saaremaa läänerrannik ja Liivi laht)

Eeldus:

paikneb trajektooriga

laius: ~20 km (koos mõjualaga)

5. Stsenarium MP2 TUULEPARGIGA

5.1 Lähimine tuulepargist

Aeg tuulepargis:

$$t = 20000 / 270 \approx 74 \text{ s} = \frac{20000}{270} \approx 74 \text{ s} = 270 / 20000 \approx 74 \text{ s}$$

~1.2 min eelhoiatusaeg

5.2 Meretuulepargi töötamisel mõju mereseire ja õhuseire radarile:

- **tugev Doppler clutter**
(selgitus: tähistab radarisüsteemides soovimatuid peegeldusi (kaja), mis on tingitud keskkonnast (maapind, merepind, sademed) ja mis sisaldavad Doppleri nihet. See nihe tekib siis, kui peegeldav objekt liigub radari suhtes (nt lained, tuules õõtsuvad puud, tiivikud) või kui radar ise.)
- **varjutamine**
(varjutamine - (radar shadowing/masking), kus sihtmärk jääb radari vaateväljast välja, kuna tema ja radari. Fresnel'i tsoonis, vahel on mõni muu objekt.)
- **multipath**
peegelpilt ehk "Kummitussihtmärk" (Ghost Targets), radar võib kuvada ühe lennuki asemel kahte. Üks on otsene peegeldus, teine on signaal, mis põrkas lennukilt maapinnale ja siis radarisse. Kuna see tee on pikem, arvab radar, et sihtmärk asub tegelikult kaugemal või madalamal (maa all).
Signaali hääbumine (Fading): see on kõige kriitilisem mõju. Otsene kiir ja peegeldunud kiir kohtuvad vastuvõtjas.
Konstruktiiivne interferents: Lained on samas faasis ja tugevdavad üksteist (sihtmärk paistab eredam).
Destruktiivne interferents: Lained on vastandfaasis ja tühistavad üksteise. Sihtmärk võib radari ekraanilt täielikult kaduda, kuigi ta on otse vaateväljas.
Nurga määramise vead: radaril on raske määrata sihtmärgi täpset kõrgust (elevatsiooni), sest maapinnalt põrkuv peegeldus "määrib" signaali ja tõmbab radari kiirtevihi fookuse maapinna poole.

- **sihtmärk ei ole usaldusväärselt nähtav**

Kokkuvõtvalt: tuulepark võib ilma sobivate leevendusmeetmeteta halvendada madallennu sihtmärkide avastamist, jälgimist ja klassifitseerimist.

Täpsem selgitus:

Kuidas tuulikud seda "148 sekundit" mõjutavad? Tuuleparkide puhul ei ole probleemiks ainult see, et droon on kaugel, vaid see, et tuulikud lühendavad seda efektiivset reageerimise aega märgatavalt:

Avastuskauguse vähenemine: hoolimata radari tehnilisest võimekusest avastada 40 km kaugusel, siis tuulikute tekitatud varjes ja clutteri tõttu võib tegelik avastamine toimuda alles siis, kui tiibrakett või droon väljub tuulepargi "mürafoonist". Kui see juhtub näiteks 10 km peal, jääb tiibraketi lennukiirusest sõltuvalt 148 sekundi asemel reageerimiseks vaid 37 sekundit.

Tracki stabiilsus: eelnevalt mainitu on arvatud eeldusel, et jälgimine on pidev. Kui tuulikute vahel toimub korduv „track loss” (jälje katkemine), peab süsteem iga kord uuesti sihtmärgi tuvastama ja kinnitama. See "sööb" väärtuslikke sekundeid reageerimisajast, kuna operaator või automaatika ei saa kinnitust sihtmärgi kohta.

Kõrguse faktor: lendav objekt liigub tõenäoliselt madalal, eeldatud sea skimming, et vältida avastamist. Tuulikud (kõrgusega 150–250 m) loovad füüsilise barjääri, mis sunnib radarit filtreerima välja kõik maapinna lähedal asuva, kaotades sellega võime näha sihtmärki distantsilt, kus see on veel tuulikute "taga" varjus.

Sellisel juhul on aega palju, kuid tuulikute vahel peituv tiibrakett või turboreaktiivne droon võib jääda märkamatuks kuni viimase hetkeni, muutes 40 km teoreetilise avastuskauguse praktikas tõenäoliselt saavutamatuks.

6. Sihtmärgi avastamise nihkumine

Ilma tuulepargita:

tuvastus: 40 km

Tuulepargiga:

tuvastus nihkub:

võib teatud geomeetria ja ilmastiku korral vähendada usaldusväärse track'i tekkimise kaugust vähendada **10–15 km vahemikku**.

7. Uus reaktsiooniaeg

Kaugus 15 km:

$$t = 15000 / 270 \approx 56 \text{ s} = \frac{15000}{270} \approx 56 \text{ s}$$

Kaugus 10 km:

$$t = 10000 / 270 \approx 37 \text{ s} = \frac{10000}{270} \approx 37 \text{ s}$$

8. Täielik ajajoon

ILMA tuulepargita

T = –30 min: start Kaliningradist

T = –2.5 min: radar tuvastab

T = 0: tabamus

TUULEPARGIGA

T = -30 min: start
T = -3 min: siseneb Tuulepargi alale
T = -2 min: siseneb tuuleparki → radar kaotab sihtmärgi
T = -1 min: väljub tuulepargist
T = -40 s: esimene kindel tuvastus
T = 0: tabamus

9. Visuaalne kokkuvõte

Kaliningrad -----> Liivi laht (TUULEPARK) -----> Tallinn
[normaalne jälgimine]
↓
[RADAR CLUTTER / SHADOW]
↓
[**hiline avastamine**]

10. Operatiivne mõju õhutõrjele

- Avatud allikatele tuginedes on relvastusse hangitud ja hankimisel õhutõrjesüsteemid, mille tõrjeefektiivsus lääne suunal väheneb sõltuvalt avamere tuulepargi töötamisel tuulesuunast, õhuniiskusest (sademed) ning labades tekkivatest kõrge potentsiaaliga elektrilaengutest (staatilisest elektrist/ESD efekt) :
- Tegevuskaugus sõltub õhutõrjeraketi tüübist: M39 25-165 km, M48 70-300 km. Keskmaa õhutõrjesüsteemid (*Surface Launched Medium-range **IRIS-T SLM**, Diehl Defence*) õhutõrjeradar Hensoldt TRML-4D, sihtmärgi avastus kaugus 120 m – 250 km kõrgusel kuni 30 km, laskekaugus kuni 40 km, kõrgusel kuni 20 km, IR-sihik.
- Lühimaa õhutõrjesüsteem (*MBDA, **Mistral 3 Short-Range Air Defence Systems***), õhutõrjeradar SAAB AMB 3D radar, avastuskaugus 10-300 km, kõrgusel 0-40 km.
- Lühimaa õhutõrjesüsteem **Piorun**, IR-sihik, laskekaugus 0,4-6,5 km, kõrgusel 10-4000 m.
- UAS'ide kasutamine - tuulikud piiravad füüsiliselt droonide kasutamist ja sensoorikat. Tuulikud on droonide ja radarite jaoks üks keerukamaid keskkondi, kuna nad ühendavad endas kõik varem mainitud probleemid: clutteri, varjutamise ja multipath-efekti.

Siin on ülevaade sellest, kuidas tuulikud füüsiliselt droonide tööd ja sensoorikat piiravad:

- Radarsensori "pimestamine" (Doppler Clutter) Tuuliku labad liiguvad väga kiiresti (otsakiirus võib ületada 300 km/h).
- Massiivne Doppler: pöörlevad labad tekitavad tohutu Doppleri nihke, mis sarnaneb liikuva lennuki või drooniga. See "ujutab" radari signaalitöötluse üle, muutes väikese drooni tuvastamise labade vahel peaaegu võimatuks.
- Dünaamiline vari: iga laba möödumine tekitab hetkelise varjatuse, mis tähendab, et drooni signaal "vilgub" – see katkestab stabiilse jälgimise (track loss).
- Staatiline, füüsiline varjatus ja multipath, tuuliku mast on massiivne metallist või betoonist takistus.
- Sidekatkestused: drooni lendamisel tuuliku taha, tekib radarivari ja sidevahendite (pult, GPS, FPV-video) signaali katkestus kuni droon väljub varjust.

- Signaali peegeldused (Multipath): tuuliku metallist pind peegeldab raadiolaineid. Drooni GPS-seade võib vastu võtta peegeldunud signaale, mis paneb drooni "hüppama" või kaotama täpset positsioneerimist, kuna arvutatud asukoht on vale.
- Turbulents ja füüsiline oht-lisaks sensorika piiramisele mõjutavad tuulikud drooni lennufüüsikat:
- Jäljeturbulents (või äratõukekeeris), (Wake Turbulence): tuuliku labade tekitatud enda labade tekitatud tugevad õhukeeriseid. Väikese drooni jaoks võib see tähendada kontrolli kaotust või allakukkumist, isegi kui droon labadega kokku ei põrka.
- Elektromagnetilised häired (EMI): tuuliku peas (gondlis) asuv generaator ja trafod tekitavad tugevaid magnetvälju, mis võivad häirida drooni kompassi ja inertsiaalsensoreid (IMU), vähemalt tuleks hinnata tuulikute elektrisüsteemide, välgukaitse ja võimalike impulsshäirete mõju raadiosageduslikule keskkonnale, juhul kui vastavad mõõteandmed seda kinnitavad.
- Ründemoona kasutamine (Loitering munition) – otsustuskoht, sest tuulikute olemas olu võib mõjutada ründemoona kasutamise otsustuse protsessi .

Õhutõrjesüsteemi efektiivsuse tagamiseks vajalik õhuseiresüsteemi koostöövõime::

Õhutõrjesüsteemi efektiivsuse tagamiseks vajalik:

- tuvastus
- track, selgitus: radaritehnoloogias ja droonide juhtimises tähendab "track" (sihtmärgi jälgimine) protsessi, kus radar või sensor ei tuvasta objekti lihtsalt ühekordselt, vaid loob selle liikumisest järjepideva ja prognoositava trajektoori. Tuulikute kontekstis on "tracki" hoidmine äärmiselt keeruline järgmistel põhjustel:
 - Jälje katkemine (Track Loss) Kui droon lendab tuuliku masti taha või pöörlevate labade vahele, tekib varjatus. Radar kaotab sihtmärgi hetkeks silmist. Kui süsteem ei suuda lühikese aja jooksul drooni uuesti tuvastada, "hukkub" jooksev track ja süsteem peab alustama uue otsinguga.
- jälje "hüppamine" („Track Seduction”)- See on olukord, kus radari jälgimisalgoritm läheb sihtmärgilt üle tuuliku labale. Kuna tuuliku laba liigub ja tekitab tugeva peegelduse, võib radari tarkvara arvata, et droon muutis järsult suunda või kiirust. Tulemuseks on see, et radari ekraanil liigub "sihtmärk" mööda tuuliku laba trajektoori, samas kui tegelik droon jääb märkamatuks.
- filtreerimine (Track Initialization) Et vältida **tuhandete valesignaali kuvamist, kasutavad radarid filtreid, mis algatavad tracki ainult siis, kui objekt liigub loogiliselt**. Tuulikute tekitatud Doppler clutter on nii intensiivne, et süsteem võib drooni signaali müra vältida. Drooni tracki ei tekitata (initialization fail), sest süsteem ei ole kindel, kas tegu on päris objekti või lihtsalt tuuliku laba tekitatud häirega.
- võimalikud probleemid ületused: Kalman filtreid. kus matemaatiline mudel, mis ennustab tiibraketi asukohta varjatuse ajal (kui viimane kaob sekundi murdosaks masti taha, eeldab filter, et ta jätkab samas suunas ja kiirusega) oluline- vajalik täiendav arvutusvõimsus ja kuluv aeg. TBD (Track-Before-Detect): algoritmid, mis koguvad nõrku signaale aja jooksul, enne kui kuulutavad selle sihtmärgiks, aidates eristada drooni juhuslikust peegeldusest, oluline nõrkade signaalide kogumise aeg ja arvutustele kuluv aeg. Mitme sensori soovitatavalt erinevate kasutamine (Sensor Fusion): kui radar kaotab tracki müra, võib optiline sensor (kaamera) või akustiline sensor jälgimist jätkata, oluline- erinevate sensori andmete liitmine- ajakulu multi-sensor süsteemi andmete ühildamisele arvutusprotsessis.
- Laskelahendus: vajalik aeg: 60–120 sekundit .

Tulemus:

Olukord	Tulemus
Ilma	intercept võimalik
tuulepargita	
Tuulepargiga	intercept sageli ebaõnnestub

Kokkuvõtvalt, efektiivne madallennu sihtmärkide (droonid, tiibraketid) avastamine ja tõrje eeldab kihelist, integreeritud ja koostöödeldavat õhuseire süsteemi, kus erinevad sensorid täidavad üksteist täiendavaid rolle.

Süsteem peab hõlmama järgmisi komponente:

- kõrge kaugseire radar kõrgemate sihtmärkide varajaseks avastamiseks
- madalkõrguse radarid madallennu sihtmärkide tuvastamiseks
- passiivsed RF-sensorid kiirgusallikate tuvastamiseks
- optilised ja infrapuna (IR) sensorid sihtmärkide visuaalseks kinnitamiseks
- akustilised sensorid lähialas madalal ja aeglaselt liikuvate objektide tuvastamiseks

Kõikide sensorite andmed tuleb:

- integreerida ühtsesse süsteemi (sensorite fusioon)
- töödelda automaatse klassifitseerimise algoritmidega
- koondada ühtseks operatiivpildiks (common operational picture)
- jagada reaajas erinevate üksuste ja relvasüsteemide vahel

Sellise süsteemi eesmärk on tagada:

- sihtmärgi usaldusväärne tuvastus (detect)
- pidev ja stabiilne jälgimine (track)
- korrektne klassifitseerimine (classify)
- õigeaegne otsustus (decide)
- piisav reaktsiooniaeg tõrjevahendite rakendamiseks (engage), kus kõik algab sisendandmetest.

11. Ekspert hinnang

Parameeter	Ilma	Tuulepark
Avastamise Pd	0.8–0.9	0.3–0.6
Intercepti tõenäosus	0.6–0.8	0.2–0.4

Märkus: mõju suurust ei saa kinnitada ilma radarispetsiifilise simulatsiooni ja välikatseteta, kuid mõju suund on tehniliselt põhjendatud.

12. Miks muutub eelhoiatusüsteemi töövõime aegkriitiliseks?

Probleem ei ole Kaliningradi oblastist või laevadelt startinud tiibraketi või drooni lennu algus, vaid eelhoiatus eelavastamise ajaakna vajaliku **viimane 1–2 minutit**, kui analüüsi tulemusel:

1. Langetatakse otsuseid
2. Tõstetakse kaitseväge häiretase ning aktiveeritakse kaitsesüsteemid

3. Antakse häiresignaalid ning hoiatusteated tsiviilelanikkonna kaitsmiseks.

13. Tähtsaim järeldus

Tuulepark selles trajektooris: eemaldab ~60–75% reaktsioonijast ja muudab: madallennu rünnaku praktiliselt palju raskemini tõrjutavaks.

NB! Kaliningradist lähtuv madallennu rünnak võib tuulepargi olemasolul jääda avastamata kuni viimase ~30–60 sekundini enne sihtmärki ning tagajärjeks õhutõrjesüsteem ei rakendu.

14. Kokkuvõte

1. Elektromagnetiline kiirgusvälja mõju

Läänemere ja Liivi lahe meretuulepargi MP2 tuulikud põhjustavad:

- Elektromagnetlaine levi sirgjoonelise liikumise hajumist;
- Elektromagnetlaine levi osalist sumbujust ning varjestust;
- Elektromagnetlaine levi mitmekordseid peegeldusi - multipath signaale;
- Elektromagnetlaine levi faasi ning sagedusmuutusi - Doppleri müra;

Ülaltoodud elektromagnetlaine levi raadiosageduslikul kiirgusväljal:

- ei tekita täielikku signaali kadu;
- ei katkesta sidevõrku tervikuna.

2. Operatiivne mõju kaitsevæele

Eelhoiatussüsteemide töövõime väheneb VF Kaliningradi oblasti suunal oluliselt, mis ei võimalda õhu- ja meretõrjesüsteemide õigeaegset aktiveerimist.

Eelhoiatussüsteemi reaktsiooniaeg pikeneb ning häiretaseme tõstmise aeg hilineb kriitiliselt.

Ilmastiku olude sõltuvus koos meretuulepargi MP2 töötamisega mõjutab oluliselt rohkem eelhoiatussüsteemi ning kaitsesüsteemide töövõimet.

3. Julgeolekumõju hinnang

Mõju tüüp:	Tase
Sidekvaliteet	Mereside HF-lainealas puudulik VHF- ja UHF rahuldav, Lennundusside madalatel kõrgustel puudulik, keskmistel kõrgustel rahuldav ning kõrgematel kui 7000 m hea;
Radarikatvus	Laevade AIS-tuvastus signaalide kvaliteet puudulik/rahuldav; Kaugseire radaritel madalatel kõrgustel puudulik, keskmistel rahuldav, kõrgematel hea; Lennundus IFF-signaalide tuvastus puudulik/rahuldav, SSR radaritel rahuldav;
Eelhoiatust	Eesti kaitsevæe eelhoiatuse töövõime on vähenenud, mis vähendab rahuaja riigikaitse võimet.
Süsteemi töövõime	Kaudselt: Rootsi Kuningriigi territoriaalvete alas eelhoiatuse töövõime osaline vähenemine, Kaudselt: Läti Vabariigi territoriaalvete alas eelhoiatuse töövõime osaline vähenemine.