

Anders Torheim  
Jakob Tjøland Randen  
Kristian Remøy-Bakke

# Enhanced Radar Positioning System som sekundært posisjoneringssystem

Bacheloroppgave i Nautikk  
Veileder: Arnt Myrheim-Holm  
Juni 2023



Anders Torheim  
Jakob Tjåland Randen  
Kristian Remøy-Bakke

# **Enhanced Radar Positioning System som sekundært posisjoneringsystem**

Bacheloroppgave i Nautikk  
Veileder: Arnt Myrheim-Holm  
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden



## **Forord**

Bacheloroppgaven er en avslutning og oppsummering av tre års utdanning på nautikk ved NTNU Ålesund. Oppgaven baserer seg på å undersøke ett nytt posisjoneringssystem, da dagens posisjonering foregår i hovedsak med GNSS. Satellittbasert posisjonering er sårbart med tanke på tilsiktede og utilsiktede forstyrrelser, samt den geopolitiske uroen i Europa.

Samarbeidet blant studentene har fungert veldig fint, og vi har jobbet godt gjennom hele perioden. Alle har sine styrker og svakheter, noe som ble arbeidet godt rundt og tilrettelagt for på en god måte. Arbeidsmengden har blitt fordelt likt innad og de som har hatt kapasitet eller kunnskap har bidratt ved behov. En stor takk til hverandre, for samarbeidet, minnene og for tiden sammen.

Studentene vil takke alle som har bidratt i oppgaven. Først og fremst vår veileder Arnt Myrheim-Holm. En stor takk til intervjuobjektene som har delt sin kunnskap, sine synspunkter og tanker, dere har gitt oppgaven en mangfoldig tyngde som ikke ville vært mulig uten dere. Takk til alle bedrifter og personer som også har bidratt til oppgaven i form av gode diskusjoner, deling av informasjon og tilrettelegging for feltstudier.

Sist, men ikke minst, en stor takk til de som har bidratt i hverdagen; klassekamerater, forelesere på nautikk, samboere og bekjente. Dere har vært daglige sparringspartnere og støttespillere gjennom oppgaven, tusen takk.

## Sammendrag

Oppgavens problemstilling er å utrede; om «Enhanced Radar Positioning System» kan fungere som sekundært posisjoneringssystem. ERPS er et nytt posisjoneringssystem som er i undersøkingsfasen, der det har vært gjennomført to tester av systemet, en i England og en i Singapore. Behovet for et system til posisjonering utenom GNSS begrunnes i rapporter fra IMO og IALA, samt den geopolitiske uroen som oppleves nå. For å utrede om ERPS kunne fungert som et sekundært posisjoneringssystem ble det arbeidet ut ifra fire forskningsspørsmål;

- Hvordan fungerer systemet?
- Hvor mange e-racon trengs langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim?
- Hvor langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim er det særlig behov for ERPS?
- Hva er nytten av systemet?

For å besvare forskningsspørsmålene ble det innhentet informasjon fra forskjellige databaser, gjennomført feltundersøkelser og forsøk på navigasjonslab, samt flere semistrukturerte intervjuer.

Ut ifra arbeidet ble behovet for et sekundært posisjoneringssystem bekreftet. Strekningen i oppgaven, Ålesund – Trondheim, kunne bli dekket av ERPS med 28 installasjoner, der Hustadvika ble utpekt som et område der det var særlig behov for et sekundært posisjoneringssystem.

Oppgaven konkluderer med at ERPS kan fungere som et sekundært posisjoneringssystem. Dette fordi det gir en omtrentlig posisjon. Det kan likevel ikke erstatte GNSS, da ERPS ikke oppfyller IMO sine krav til PNT.

## **Abstract**

The topic question in this bachelor's thesis is to investigate "Enhanced Radar Positioning System" as a secondary positioning system. ERPS is a relatively new positioning system which is currently under development and testing. Results from two tests in England and Singapore partially forms the foundation for the work in this thesis. The need for a back-up positioning system, that does not share the same failure modes of GNSS, is argued for in reports from both IMO and IALA.

Four research questions have been formulated to assess the usage of ERPS as a positioning system along the Norwegian coast:

- How does the system work?
- How many e-racons is needed to cover the fairway from Ålesund to Trondheim?
- Where along the fairway from Ålesund to Trondheim is there a particular need for ERPS?
- What is the utility value of the system?

Research methods like theory study from scientific databases, field studies, experiment in navigation-lab, and semi-structured interviews has been applied to answer these research questions.

The work resulted in a confirmation of the need for a secondary positioning system. This thesis also describes the working principle of ERPS. It is estimated that 28 e-racons are necessary to cover the fairway from Ålesund to Trondheim. Hustadvika is identified as an area with a particular need for such a system.

As a conclusion, this thesis states that ERPS can be used as a secondary positioning system. That is because it provides positioning information with a certain degree of accuracy. However, ERPS does not meet the IMO requirements to PNT systems, and therefore it cannot provide redundant positioning service to GNSS.

## **Terminologi**

<b>AIS</b>	Automatisk Identifikasjonssystem
<b>AtoN</b>	Aids to Navigation
<b>BeiDou</b>	Kinesisk satellittnavigasjonssystem
<b>CHIRP radar</b>	Compressed, High-Resolution Pulse
<b>Datum</b>	Et koordinatsystem med utgangspunkt i en bestemt referanse
<b>DOP</b>	Dilution of Precision, sier noe om geometrien til satellittene, og et mål på geometrisk nøyaktighet.
<b>DSC</b>	Digital Selective Calling
<b>ECDIS</b>	Electronic Chart Display and Information System. Et geografisk informasjonssystem og elektronisk sjøkartsystem.
<b>ERPS</b>	Enhanced Radar Positioning System
<b>FMCW radar</b>	Frequency Modulated Carrier Wave radar.
<b>FSK modulasjon</b>	Frequenzy- Shift Keying
<b>Galileo</b>	Europeisk satellittnavigasjonssystem
<b>GLA</b>	General Lighthouse Authorities of the UK
<b>GLONASS</b>	Russisk satellittnavigasjonssystem
<b>GMDSS</b>	Global Maritime Distress Safety System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System, USA
<b>HDOP</b>	Horizontal Dilution of Precision
<b>IALA</b>	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities



<b>IMO</b>	International Maritime Organization
<b>MSI</b>	Maritim Sikkerhetsinformasjon
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association. Standardisert kommunikasjonsformat mellom system om bord.
<b>NT-Radar</b>	En maritim radar som ikke bruker magnetron.
<b>PNT</b>	Position Navigation Timing
<b>PPD</b>	Personal Privacy Device
<b>PRF</b>	Puls-repetisjonsfrekvens
<b>Redundant</b>	Er noe man oppnår når det er to eller flere uavhengige systemer som utfører samme oppgave dersom et system faller ut, kan et annet ta over og sikre at oppgaven blir utført.
<b>Resilient</b>	I denne oppgaven, et tilleggssystem som skal gi samme resultat om GNSS skulle svikte
<b>SART</b>	Search and Rescue Radar Transponder
<b>Solid State-radar</b>	Radar som bruker transistorisert svingekrets i senderen. Her kan pulskompresjon anvendes.
<b>TR-rør</b>	Transmitter/receiver cell
<b>UTC</b>	Coordinated Universal Time
<b>VTS</b>	Sjøtrafikksentraltjenesten
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 84, et globalt datum.

## **Innhold**

<b>Forord</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Terminologi</b> .....	<b>IV</b>
<b>Innhold</b> .....	<b>VI</b>
<b>Figurliste</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabelliste</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Innledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling .....	2
1.3 Begrensninger på oppgaven .....	2
<b>2 Teori</b> .....	<b>3</b>
2.1 E-navigasjon .....	3
2.2 Posisjonering, navigering & tidsbestemmelse.....	4
2.3 Global Navigation Satellite System .....	7
2.4 Systemer avhengig av posisjon .....	11
2.5 Radar .....	12
2.6 Racon.....	25
2.7 Enhanced Radar Positioning System.....	30
<b>3 Metode</b> .....	<b>41</b>
3.1 Datainnsamling til teoretisk grunnlag .....	41
3.2 Intervju .....	42
3.3 Case Ålesund til Trondheim.....	44
3.4 Styrker og svakheter .....	46
<b>4 Resultater</b> .....	<b>48</b>
4.1 Intervjuer .....	48
4.2 Case Ålesund – Trondheim .....	50
4.3 Presentasjon av resultat etter ekspedisjon mellom Ålesund og Trondheim.....	55
<b>5 Drøfting</b> .....	<b>59</b>
5.1 Hvordan fungerer ERPS .....	59
5.2 Hvor mange e-racon trengs langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim.....	62
5.3 Hvor langs hovedleden er det særlig behov for ERPS .....	63
5.4 Hva er nytten av systemet .....	64
<b>6 Konklusjon</b> .....	<b>69</b>
<b>7 Forslag til videre arbeid</b> .....	<b>70</b>
<b>Referanseliste</b> .....	<b>i</b>

## Figurliste

Figur 1 Oversikt over enheter som er avhengig av GPS (Bransby og Williams, 2016) .....	12
Figur 2 Virkemåte og oppbygning for puls-basert radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-4) .....	15
Figur 3 Signalgang ved pulsgenerering i senderenheten i magnetronbasert radar. Egen figur .....	18
Figur 4 Pulsgenerering i magnetronbasert maritim radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-29).....	19
Figur 5 Prinsipp for frekvensmodulert og fasemodulert puls. Egen figur til venstre. Figur til høyre hentet fra (Wolff, u.å.) .....	22
Figur 6 Virkemåte FMCW radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-58).....	23
Figur 7 Eksempel på racon og merking i sjøkart (Kjerstad, 2022b) .....	25
Figur 8 Eksempel på radarbilde med og uten racon (Kjerstad, 2022c).....	25
Figur 9 Forventet racon rekkevidde ved varierende høyde over havet (IALA, 2004).....	30
Figur 10 ERPS systemet. Figur fra (IALA, 2022) med egen tekst .....	31
Figur 11 ERPS posisjons bestemmelse en e-racon løsning (IALA, 2022) .....	32
Figur 12 ERPS posisjonsbestemmelse ved hjelp av to e-racon (IALA, 2022) .....	33
Figur 13 Uthenting av posisjon ved mer enn to e-racon tilgjengelig (IALA, 2022).....	34
Figur 14 E-radar oppbygning. Blå bakgrunn indikerer tilleggskomponenter til vanlig radar. Egen figur med data fra (Ward et al., 2014) .....	35
Figur 15 E-racon oppbygning. Blå bakgrunn indikerer tilleggskomponent til vanlig racon. Egen figur med data fra (Ward et al., 2014) .....	36
Figur 16 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no .....	52
Figur 17 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 1. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no .....	53
Figur 18 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 2. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no .....	53
Figur 19 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 3. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no .....	54
Figur 20 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 4. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no .....	54
Figur 21 Seilas nord: Radar bilde start på Hustadvika S-band radar, ingen racon synlig....	57
Figur 22 Seilas nord: Radar bilde midt i Hustadvika, X-band radar. ingen racon er synlige. ....	57
Figur 23 Seilas sør: Radar bilde starten av Hustadvika fra Trondheim, X-band radar, synlige racon. ....	58
Figur 24 Seilas sør: Radar bilde noe midt i Hustadvika, X-band radar, synlige racon. ....	58
Figur 25 Plassering av e-racon langs hovedledet mellom Ålesund og Trondheim. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no.....	63
Figur 26 Skjær på Hustadvika.....	64
Figur 27 Skjær på Hustadvika.....	64

## Tabelliste

Tabell 1 Krav til navigasjon i åpent hav (IMO, 2011).....	5
Tabell 2 Krav til navigasjon langs kyst og havn (IMO, 2011) .....	6
Tabell 3 Signalforstyrrelser til GNSS og påvirkningen av disse (Zidan et al., 2021).....	8
Tabell 4 Subjektiv risikoanalyse av forstyrrelser knyttet til GNSS (IALA, 2012).....	9
Tabell 5 Minimum deteksjonsavstand (operative krav) (Kjerstad, 2019).....	24
Tabell 6 Tekniske parameter til racon (IALA, 2004) .....	27
Tabell 7 Spesifikasjon på radar og racon brukt i ERPS test utenfor England (Ward et al., 2014) .....	39
Tabell 8 Testresultat fra ERPS test i Singapore, 2017, (IALA, 2022).....	40
Tabell 9 Testresultat fra ERPS test i England, 2014, (Ward et al., 2014).....	40
Tabell 10 Antall treff per søkeord i vitenskapelige databaser.....	41
Tabell 11 Krav for utplassering av e-racon.....	50
Tabell 12 Tabellisert plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim.....	51
Tabell 13 Racon observert på seilas.....	56

# 1 Innledning

I dette kapitlet begrunnes bakgrunnen for oppgaven og hvilken problemstilling den skal besvare. Det belyses også hvilke begrensinger som påvirker oppgaven og medfølgende resultat.

## 1.1 Bakgrunn

I dagens posisjonering- og navigasjonssystemer brukes Global Navigation Satellite System (GNSS) som den primære kilden til posisjonering for sjøfarende (Ward *et al.*, 2014). De svake signalene fra GNSS satellittene er meget sårbare for interferens og forstyrrelser. Det være tilsiktede eller utilsiktede forstyrrelser. Derfor er det anbefalt at det utvikles og brukes flere uavhengige kilder til posisjonering slik at det oppnås redundans innen posisjonering (IALA, 2018).

International Maritime Organisation (IMO) har utviklet «e-navigasjon» som et fremtidig konsept som skal anvendes innen maritim navigasjon (Bransby og Williams, 2016). Et av hovedformålene ved konseptet er å øke navigasjonssikkerheten og bidra til økt beskyttelse av det marine miljø. For å oppnå dette peker IMO på at e-navigasjon skal være resilient, robust og pålitelig.

Enhanced Radar Positioning Systems (ERPS) pekes på blant flere kilder som et uavhengig posisjoneringssystem som kan komplementere GNSS systemet (Ward *et al.*, 2014; Bransby og Williams, 2016; IALA, 2022). Dette er et lokalt og radarbasert system som ikke deler de samme feilkildene som GNSS. ERPS har derfor potensialet til å tilby ønsket resiliens og redundans til posisjonering.

Det overnevnte danner grunnlaget for hvorfor denne oppgaven handler om ERPS. Oppgaven skal blant annet beskrive systemet, utforske nytten av systemet, og vurdere i hvilken grad det kan brukes til å oppnå ønsket redundans innen posisjonering til navigasjon.

## **1.2 Problemstilling**

Problemstillingen for denne oppgaven er; om «Enhanced Radar Positioning System» kan fungere som sekundært posisjoneringssystem. Dette skal utredes gjennom følgende forskningsspørsmål:

- Hvordan fungerer systemet?
- Hvor mange e-racoon trengs langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim?
- Hvor langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim er det særlig behov for ERPS?
- Hva er nytten av systemet?

## **1.3 Begrensninger på oppgaven**

Denne oppgaven er begrenset til å se på behovet for et sekundært navigasjonssystem, og videre om ERPS vil være et system som kan dekke dette behovet. Det vil si at oppgaven tar for seg svakheter knyttet til dagens navigasjonssystem; satellitt, radar, Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) og visuelt. I tillegg vil det bli gått i detalj på ERPS systemet som et posisjoneringssystem. Oppgaven tar ikke for seg regelverk knyttet til hvordan et slikt system skal tas i bruk. Den er så vidt inne med noen økonomiske tall, men det er ikke tatt hensyn til kostnader knyttet til implementering på fartøy og monteringen som måtte følge med dette systemet. Da med hensyn til montering om bord på fartøy, men også infrastrukturen på land. Oppgaven er også begrenset til ett område, som da er hovedleden fra Ålesund til Trondheim. Dette vil si at resultatene i oppgaven kun gir et bilde av hvordan det kan se ut på den gitte strekningen, og at det kan være andre hensyn ved andre områder.

## 2 Teori

Teoridelen tar for seg grunnlaget fra e-navigasjon, svakheter ved GNSS, samt teori om radar og racon. Dette for å gi studentene og leseren et grunnlag for å kunne beskrive og forstå ERPS. De nevnte temaene kan også brukes til å argumentere for nødvendigheten av et backup system som ERPS. Til slutt i teoridelen beskrives ERPS som system.

### 2.1 E-navigasjon

#### 2.1.1 Generell forklaring

E-navigasjon er en fellesbetegnelse for systemer og teknologi som skal gjøre seilassen tryggere og mer effektiv. Norvald Kjerstad definerer e-navigasjon som:

E-navigasjon er definert som elektronisk og harmonisert innsamling, integrering, utveksling, presentasjon og analyse av maritim informasjon på skip og land, for å styrke havn til havn navigasjon og relaterte tjenester for å bedre trygghet og sikkerhet til sjøs, samt vern av det marine miljø. 'e' i e-navigasjon står for enhanced (forsterket nytteverdi, kvalitet og brukervennlighet) og/eller electronic (elektronisk) (Kjerstad, 2015, s. 1-192).

Det skal oppnås gjennom forenkling av arbeidsprosesser ombord, lette på arbeidsmengden til navigatørene og bistå i en bedre kommunikasjonsflyt mellom skip-skip og skip-land.

#### 2.1.2 IMOs implementeringsstrategi

Det er FNs maritime organ, IMO, som står for hovedansvaret rundt strategi og implementering av e-navigasjon for hele verden. I Norge er det Sjøfartsdirektoratet og Kystverket som skal utføre implementeringen av IMOs strategi. I 2014 godkjente IMO en implementeringsplan på fem punkt som skulle bli implementert i perioden 2016 – 2019, under oppsyn av de statlige myndighetene til hvert land (Kystverket, u.å.);

- Bedre brodesign
- Automatisert skipsrapportering
- Integritet og kvalitet for informasjon og broutstyr
- Presentasjon av informasjon i ulike display om bord på fartøy og på land, inkludert kartverktøy og andre display

- Digitalisering og utvikling av en rekke informasjonstjenester som tradisjonelt er analoge og fragmenterte.

### **2.1.3 Behov for en implementeringsstrategi**

Mennesket har alltid brukt de hjelpemidler som er tilgjengelige for å bedre deres situasjon og arbeidsmengde. I navigasjonen var de første hjelpemidlene solen, vinden og dyreliv (fugler osv.), der de kunne tolke generelle retninger til land og hvor man forholdt seg i forhold til soloppgang og solnedgang. Rundt 1300-tallet ble leidarstein tatt i bruk. Det er en magnetjernstein som flyter på en trebit i en skål med vann. Ved hjelp av jordens magnetiske felt viser den magnetisk nord, med andre ord; det første kompasset. For å seile etter gitte retninger og kurser ble det derfor tatt i bruk både leidarsteinen og himmellegemer (stjerner osv.) (Kjerstad, 2022a). Utover 1900-tallet tok utviklingen en mer elektronisk og digital tilnærming når radar ble introdusert rundt 1930, deretter ECDIS og GPS rundt 1990. Da det ble innført ny teknologi på relativt kort tid, ble problemstillingen om implementeringen foregikk raskere enn det som var trygt. Det ble dermed et behov for en implementeringsstrategi til hvordan skipsfarten skulle innføre teknologien i en trygg og sikker hastighet.

## **2.2 Posisjonering, navigering & tidsbestemmelse**

I denne oppgaven vil forholdet til posisjonering, navigering og tidsbestemmelse (PNT) omhandle sjøfarten. PNT-systemer er tidligere omtalt som radionavigasjonssystemer. Det er et system som skal bidra til informasjon om ett objekts faktiske posisjon og tidspunkt, f.eks. et fartøy. Tradisjonelt sett innen sjøfart kan PNT beskrives som bestikkregning ved hjelp av kart, kompass, fart og avdrift. Utviklingen har gått videre til å være bakkebaserte og til slutt satellittbaserte stasjoner, for å kunne gi en posisjonsbestemmelse (Samferdselsdepartementet, 2018).

Måten PNT fungerer på kan beskrives på mange måter, men ved å se på hver enkelt bokstav kan det forklares slik; P står for posisjonering, og dette er informasjon om ett punkt i et koordinatsystem. Når en posisjon er kjent kan det bestemmes en ny destinasjon, og dette gir muligheten til å navigere (N). Kart blir brukt for å bestemme mest hensiktsmessig rute og lengde for å komme til det nye punktet i koordinatsystemet. På et fartøy er det også input på hastighet, og dersom en vet avstand, kan man også vite tid (T). Systemet vet hva tiden er i det punktet fartøyet befinner seg i, og med hensyn til fart og avstand kan systemet gi



nøyaktig tid til ankomst av nytt punkt. Nøyaktigheten til systemet avhenger av hvilket datum som blir brukt i kartmaskinen, samt hvilken tidsbestemmelse som brukes. Eksempel på dette kan være World Geodetic System 84 (WGS84), som er et globalt datum og tidsbestemmelse i Coordinated Universal Time (UTC) (Samferdselsdepartementet, 2018).

### 2.2.1 PNT – ytelseskrav

For at et PNT system skal være globalt så stilles det først og fremst krav til at systemet skal tåle å bli brukt av et ubegrenset antall brukere. Videre stilles det flere krav både for navigering i åpent hav og langs kysten. Her er det spesielt viktig med integriteten til den gitte nøyaktigheten, altså systemets evne til å si ifra om det ikke klarer å levere nøyaktigheten som kreves (IMO, 2011).

#### Navigering i åpent hav

Tabell 1 Krav til navigasjon i åpent hav (IMO, 2011)

Beskrivelse	Krav
Posisjonsbestemmelse i maks tillatt avvik (m) og sannsynlighet av ant. målinger (%)	<100 m & >95 %
Kan brukes til generell navigasjon for fartøy som ferdes i internasjonalt farvann	Ja
Med hensyn til radiofrekvenser, skal systemet fortsatt kunne gi posisjon	Ja
Oppdateringsrate av posisjon	<2 s
Tilgjengelighet av signal	>99,8 %
Varsel knyttet til systemets integritet	Ja, via Maritime Safety Information (MSI)

Ut ifra kravene i Tabell 1 kan en se at posisjonen til et fartøy kan avvike opp til 100 m fra faktisk posisjon, og at sannsynligheten for den gitte posisjonen er 95 % sikker eller mer. Oppdateringsraten sier noe om hvor ofte en skal få input på posisjon, og dette skal da være minimum hvert andre sekund. Tilgjengelighet forklarer hvor mye av tiden en skal ha input av signal som fører til posisjon. Dette vil si at hvis f.eks. en satellitt skulle feile skal det 99,8 % av tiden bli sendt signal fra andre satellitter som gir posisjon. Integritet går ut på systemets evne til å oppdage feil, og ved slike situasjoner skal det bli sendt ut varsel via Maritim Sikkerhetsinformasjon (MSI) (IMO, 2011).

## Navigering langs kyst og i havn

Tabell 2 Krav til navigasjon langs kyst og havn (IMO, 2011)

Beskrivelse	Krav
Posisjonsbestemmelse i maks tillatt avvik (m) og sannsynlighet av ant. målinger (%)	<10 m & >95 %
Med hensyn til radiofrekvenser, så skal systemet fortsatt kunne gi posisjon	Ja
Oppdateringsrate av posisjon	<2 s*
Tilgjengelighet av signal	>99,8 %
Kontinuitet av signal (%) og tidsperiode (min)	≥99,97 % & 15 min
Varsel knyttet til systemets integritet	Ja, innen 10 s
*Dette gjelder for posisjonen som er beregnet og vist for brukeren, og gjelder ikke for oppdateringshastigheten for korreksjonsdata. Korreksjonsdata kan være gyldig i over 30 sekunder.	

Navigering langs kyst og ankomst/avgang havn krever mer nøyaktig posisjon og stiller derav høyere krav til PNT- systemet. I denne type farvann er det flere objekter som må navigeres rundt, og dermed kreves det bedre nøyaktighet for å unngå ulykker. Tabell 2 viser til at maks tillatt avvik i posisjon langs kystseilas er på 10 m, noe som er vesentlig mindre enn ved seilas i åpent hav der kravet er 100 m. Tilgjengeligheten har samme krav som ved seilas på åpent hav, men det foreligger et ekstra punkt til dette kravet når en kommer til seilas i trangere farvann. Dette er kontinuitet og beskriver sannsynligheten for at systemet fortsatt leverer etter forventet ytelse. Sannsynligheten skal ut ifra Tabell 2 være 99,97 % innenfor en tidsperiode på minimum 15 minutter. Systemets evne til å oppdage og varsle feil skal skje innen 10 sekunder og dette skal da bli formidlet til brukerne, der systemet blir brukt for navigering (IMO, 2011).

## 2.3 Global Navigation Satellite System

GNSS er som navnet tilsier et globalt satellittsystem, og det er et system som går innenfor PNT- temaet. Videre kan en dele opp GNSS i tre hovedsegment; rom-, bakke- og brukerssegment. Romsegmentet består av GNSS satellittene. Bakkeselementet står for overvåkning av satellittene, altså tilstand, posisjon med korrigering og synkronisering av tid til UTC. I tillegg bidrar bakkestasjonene til at en kan korrigere for ionosfærefeil, altså forstyrrelser som påvirker frekvensen som blir sendt ut fra satellittene. Brukerssegmentet er som navnet tilsier, altså brukerne av satellittene og informasjonen disse gir. Det er i hovedsak to brukerssegment i GNSS sitt PNT system, der det skilles mellom sivilt og militært bruk. I hovedsak er forskjellen tilgangen på informasjon og nøyaktig informasjon. Den sivile tjenesten er åpen for alle så lenge en har utstyr til å motta signal, dette gjelder også for skipsfart, men der må det være godkjent utstyr. Den militære tjenesten derimot er noe myndigheter og det militære kun har tilgang til. GNSS systemet består av forskjellige leverandører av satellitter; GPS (amerikansk), GLONASS (russisk), BeiDou (kinesisk) og det europeiske systemet Galileo (Zidan *et al.*, 2021).

For å beskrive ytelsen til GNSS gjelder de samme betegnelse som ble nevnt i ytelseskravene til PNT; nøyaktighet, integritet, kontinuitet og tilgjengelighet. Nøyaktighet kan brukes i mange sammenhenger og det finnes mange typer av nøyaktighet. For å forklare det enkelt sier det noe om avviket mellom antatt posisjon og faktisk posisjon. Integritet kan beskrives som et systems evne til å oppdage egen feil ved ytelse og videre varsle brukerne om denne feilen. Kontinuitet er et sannsynlighetsbegrep som tar for seg ytelse innenfor et gitt tidsrom. Altså hvor sannsynlig det er at systemets ytelse ligger innenfor de grenser som er satt, f.eks. ved kystnavigasjon hvor avviket skal være under 10 m nøyaktighet. Her vil da tidsrommet være for hele seilasen, og dette setter krav til kontinuitet av ytelse. Tilgjengelighet er også et sannsynlighetsbegrep i denne settingen, og det sier noe om systemet klarer å levere i henhold til tidligere nevnte begrep og kravene som stilles til disse. Dersom et system ikke leverer kravene som stilles til nøyaktighet, vil ikke tjenesten være tilgjengelig. Derfor er tilgjengelighet i denne sammenheng et sannsynlighetsbegrep som forteller noe om sannsynligheten for at alle krav er oppfylt (Kjerstad, 2019).

### 2.3.1 Svakheter knyttet til GNSS

For å kunne forstå noen av problemene knyttet til sårbarheten av GNSS er det vesentlig å se på signalstyrken som sendes fra satellittene. Signalstyrken som går fra satellitten til jorda, varierer fra -163 dbW til -152 dbW. Disse tallene kan sammenlignes med å se en lyspære på 25 W fra 16 000 km avstand (Schmidt *et al.*, 2016). På grunn av en så svak signalstyrke vil det være utsatt for utilsiktede og tilsiktede forstyrrelser. Dette kan være alt fra solstormer og ionosfæreforstyrrelser til jamning og spoofing.

Tabell 3 Signalforstyrrelser til GNSS og påvirkningen av disse (Zidan *et al.*, 2021)

GNSS vulnerability	Accuracy	Integrity	Availability	Continuity
<b>A)- Physical degradation</b>				
• Ionospheric delays	Med	Med	Med	Med
• Clock errors	Low	Low	Low	Low
• Signal modulation faults	Low	Low	Low	Low
• Space weather	Low	Low	Low	Low
Multipath	High	High	High	Med
NLoS	High	Med	High	High
<b>B)- Unintentional &amp; intentional threats</b>				
ine Interference with other communication systems	Med	Med	Med	Med
Jamming	-	-	High	High
Spoofing	High	High	-	-

Ut ifra Tabell 3 kan en se ulike trusler og dermed hvilke svakheter GNSS har ovenfor forstyrrelser. Noe har lite påvirkning på hvor store avvik det gir i posisjon, mens andre har høyere påvirkning. Det er også delt inn i tidligere nevnte betegnelser for ytelse, altså nøyaktighet, integritet, tilgjengelighet og kontinuitet.

Det er også gjennomført en subjektiv risikoanalyse av hvor sannsynlig det er at disse svakhetene inntreffer GNSS systemet, og hvilken konsekvens det har for brukere og GNSS systemet.

Tabell 4 Subjektiv risikoanalyse av forstyrrelser knyttet til GNSS (IALA, 2012)

Type forstyrrelse	Sannsynlighet	Konsekvens	Vanskelighetsgrad knyttet til skadebegrensning
Tjenestefeil GNSS	Lav	Stor	Vanskelig
Svikt av strømforsyning	Middels	Stor	Enkelt
Feil på sender/mottaker	Middels	Stor	Enkelt
Forstyrrelser fra andre enheter ombord	Middels	Middels	Enkelt
Forstyrrelser fra omgivelsene	Lav	Stor	Moderat
Ionosfærefeil	Lav	Middels	Moderat
Jamming	Lav	Stor	Moderat
Spoofing/narring	Lav	Stor	Vanskelig
Defekt radar	Lav	Stor	Enkelt
<p><b>Sannsynlighet:</b> Sier noe om hvor ofte en kan forvente at dette skjer.</p> <p><b>Konsekvens:</b> Hvis forstyrrelsen skulle inntreffe, så gir dette en indikasjon på hvor kritisk det vil være.</p> <p><b>Vanskelighetsgrad knyttet til skadebegrensning:</b> Med dette menes hvor vanskelig det er å beskytte seg mot det, og hvor krevende det er å få gjennomført med tanke på kostnad og installasjon.</p>			

Tabell 4 viser at enkelte forstyrrelser kan forhindres av brukeren uten store problem. Når det kommer til tilsiktede og utilsiktede forstyrrelser utenfor selve fartøyet øker kompleksiteten. Det er vanskelig å gjøre korrigerende tiltak mot direkte planlagte angrep som jamming og spoofing. Ionosfærefeil og forstyrrelser knyttet til naturlige hendelser som f.eks. solstormer, er forstyrrelser som vil påvirke store områder. Forstyrrelser fra land og omgivelsene er et problem som i hovedsak oppstår ved kystseilas, og da innenfor synsrekkevidde (IALA, 2012).

GNSS svakhetene retter seg ikke kun mot brukerne av satellittposisjon, da det også er navigasjonshjelpemidler som kan være knyttet til GNSS. Dersom GNSS faller ut, vil det

påvirke hvordan en navigatør forholder seg til egne navigasjonsinstrument, men også påvirke de ytre hjelpemidlene som synkroniserte lykter (IALA, 2012).

### **2.3.2 Jamming og spoofing**

Jamming foregår på den måten at en liten enhet sender signal på tilnærmet lik frekvens som det satellittene sender på. Dette medfører at signalene som kommer fra satellittene blir blokkerte av signalene fra jammeren og dermed medfører at mottageren på et evt. fartøy ikke får posisjonsdata. Jamming skaper ikke bare problemer på enkeltsatellitter, men det vil slå ut alle GNSS systemer og andre satellittsystemer som er innenfor området som jammeren påvirker.

Jamming ses på som et tilstikket problem. Det vil være å inneha en jammer for å bevisst forstyrre signal. Forstyrrelse kan forekomme med utstyr spesielt laget for jamming, men også såkalte Personal Privacy Device (PPD) produkter. PPD blir brukt for å hindre sporing av egen posisjon, og kan ofte bli brukt i sammenheng med å unngå unødig forstyrrelse av mobiltelefoner i lokaler hvor dette er ønskelig eller for å unngå å bli belastet for bomplasseringer. Siden jammere kan ha en rekkevidde på mange kilometer, er det teoretisk mulig for en enkeltperson som kun er ute etter å ikke bli sporet, å slå ut navigasjonsinstrumenter i området rundt (Kjerstad, 2019).

Spoofing er også en metode som inngår i tilsiktet forstyrrelse av satellittsignaler. Spoofing fungerer litt annerledes enn jamming, da det ikke blokkerer signalet fra satellittene. Måten spoofing fungerer på er at stasjonen som er satt opp for denne hensikten oppfattes som en satellitt hos mottakeren. Spoofing krever avansert og dyrt utstyr, samt kompetanse til å utføre handlingen. Denne type utstyr kan f.eks. være GNSS simulatorer (Kjerstad, 2019). Konsekvensen av spoofing vil være at mottakeren av GNSS signaler viser feil i posisjon eller timing som forklart i beskrivelsen av PNT. Dette kan resultere i feil kurs og avstand til farer (Ioannides, Pany og Gibbons, 2016).

### **2.3.3 Andre forstyrrelser**

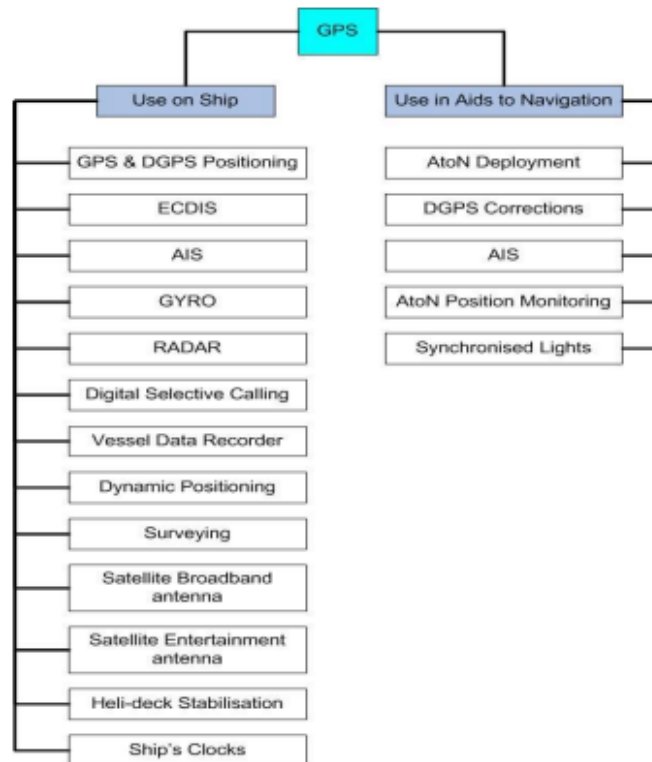
Jamming og spoofing er nevnte trusler mot GNSS systemet. Disse kategoriseres som tilsiktede trusler. GNSS er også sårbart mot utilsiktede forstyrrelser, men disse har ikke like store konsekvenser, og det er muligheter for å oppdage og korrigere dette. Utilsiktede forstyrrelser er klokkefeil, multipath, banefeil, dilution of precision (DOP), atmosfæriske forhold og interferens av signal.

Klokkefeil vil resultere i at avstandsmålingen fra satellitt til mottaker blir feil, og uten korreksjoner gir dette store posisjonsfeil. Multipath er et begrep som kan forveksles med spoofing da det innebærer at mottakeren mottar to like signal. Multipath innebærer at det opprinnelige signalet har blitt speilet i en overflate slik at mottakeren leser samme signal to ganger. Dette kan føre til at signalene ødelegger hverandre. Banefeil innebærer at satellittens faktiske posisjon avviker fra den bestemte banen den er satt til å følge, og i hvor stor grad posisjonen blir beregnet fra bakkeplan. DOP viser hvor god spredning det er på satellittenes posisjon. Er de plassert nær hverandre vil det medføre dårlige stedlinjer og store feilellipser, mens en god spredning i satellittenes posisjon vil gi gode stedlinjer med mindre feilellipse. Atmosfæriske forhold dreier seg mye om påvirkningen av satellittens signal gjennom troposfæren og ionosfæren. Dette er forstyrrelser som forsinker og «bøyer» signalet, og derav medfører en feil i posisjon uten korreksjon (Kjerstad, 2019).

Interferens er en type støy som skaper problemer for mottakeren. Denne støyen er til stede der det er mye radiosignaler, og kan komme av alt som sender på tilnærmet samme frekvensområde som GNSS satellittene. Det har vært registrerte tilfeller der mobilnettet rundt 4G har slått ut GNSS i et område på fem nautiske mil (Kjerstad, 2019).

## **2.4 Systemer avhengig av posisjon**

Antall enheter som er koblet opp mot GNSS avhenger av hvilken utrustning fartøyet har, som f.eks. om det er et fartøy knyttet til operasjoner med dynamisk posisjonering (DP) kontra et lastefartøy. Felles for alle er at de må følge kravene som er satt i forhold til blant annet; fartsområde, størrelse og bruksområde. I Figur 1 kommer det fram en oversikt over enheter som er avhengig av GPS input, men av ulik grad.



Figur 1 Oversikt over enheter som er avhengig av GPS (Bransby og Williams, 2016)

I Figur 1 kan en se at det er mange systemer om bord i et fartøy som er avhengig av GPS, samt enkelte installasjoner på land. Mange av disse systemene er knyttet direkte til navigasjon, og det vil være sårbart for utfall av GNSS. Høyre siden av tabellen omhandler landbaserte og flytende stasjoner. De vil gå innunder begrepet «aids to navigation» (AtoN) og er avhengig av GPS for å utgi nøyaktig og pålitelig informasjon.

## 2.5 Radar

### 2.5.1 Radar historikk

Radar er et kjent og mye brukt navigasjonsinstrument. Radar står for RAdio Detection And Ranging, men er også omtalt som RAdio Direction And Ranging. Navnet gjengir hva prinsippet til radar går utpå; sende radiobølger for å motta ekko og peile de.

Ideen om radar ble presentert allerede i 1864 da Maxwell la frem en teori der elektromagnetiske bølger kunne bli sendt ut og reflektert på lik linje med lys. Dette ville da muliggjøre observasjoner av avstand og retning til det reflekterende objektet. Selv om Maxwell var den første som dokumentert har kommet frem med ideen om en radar, var det



tyskeren Christian Hulsmeyer i 1902 som produserte den første radaren etter ideen fra Maxwell. Apparatet var primitivt og brukte kontinuerlig bølger, som fikk navnet telemobiloskop. Det ble påstått å kunne brukes til detektering av isfjell og skip der beregningene ble gjort gjennom triangulering av to antenner. Radaren ble ikke godt mottatt av skipsfarten på den tiden og salget gikk tregt. Det ble ikke sett noen nytte av et slikt system. Det var det franske passasjerskipet «*Normandie*» som i 1936 ble det første skipet til å montere en kontinuerlig bølge-radar, derimot ble radaren skiftet ut til en pulsbasert radar i 1939 (Kjerstad, 2015).

Det tyske firmaet GEMA startet i 1934 produksjonen av en kontinuerlig bølge-radar som ved hjelp av pulsmodulasjon kunne detektere skip på 12 km avstand. I 1939 hadde den teknologiske utviklingen av radaren gjort det mulig å detektere fly sin avstand, høyde og peiling, der de første modellene ble montert på blant annet de tyske skipene «*Blucher*», «*Scharnhorst*», «*Tiripz*» og «*Bismarck*». De nye radarene oppnådde en detekterings rekkevidde på 25 km og ble i stor grad brukt til avstandsmåling for skipenes artillerier. Progresjonen som utviklingen av radar og radarsystemer hadde hatt de siste årene ble derimot begrenset fremover. Hitler bestemte at all forskning og nyutvikling som kunne ta mer enn seks måneder skulle stoppes. Derimot kom GEMA ut med en ny type radar som kunne detektere fly på hele 75 km avstand, med navnet «*Freya*». Dette radarsystemet ble montert flere plasser langs norskekysten under okkupasjonen 1940 – 1945. «*Freya*» skapte problemer for de allierte da tyskerne oppdaget flyene deres lenge før de var nærme land. Storbritannia oppfant dermed en jammer mot tyskernes radarer, som skulle gjøre det mulig for de alliertes fly å entre Norge. Gleden var kortvarig da tyskerne svarte jammingen med frekvensmoduleringer, som gjorde de første jamme-forsøkene ubrukelige. Tyskerne var fornøyde med resultatene radarene deres gav og bestemte seg derfor om å gå videre med cm-bølge- radaren som de hadde forsket og utviklet frem. Den første 10-cm radaren (S-band) ble introdusert i 1945, og helt på slutten av krigen forsket tyskerne på radar med 3 og 1,5 cm bølgelengde (X-band) (Kjerstad, 2015).

Det var ikke bare Tyskland som utviklet og tok i bruk radarteknologi i perioden rundt 1930. England, USA og Canada hadde sine egne prosjekter rundt radarteknologi. England fikk sin første radar som kunne identifisere fly i 1935, der blant annet forskeren Robert Watson-Watt identifiserte fly på 40 britiske miles. Forskingen rundt radardeteksjon av fly ble prioritert når andre verdenskrig startet, da det var ønskelig for britene å kunne detektere fiendtlige fly på vei over sjøen mellom Frankrike og England. I 1937 lanserte britene deres «home chain»

radar teknologi. Denne ble tatt i bruk langs hele kysten av England og hadde bølgelengder opp mot 10 m. De største maritime gjennombruddene for Englands radarforskning var når det i 1940 ble montert en radar på HMS «*Kinge George V*» med 50 cm bølgelengde som kunne detektere skip på tilnærmet 17 km avstand. Samtidig utviklet University of Birmingham en radar med 10 cm bølgelengde som kunne detektere U-båter i overflaten av vannet. I USA og Canada ble den første operative radaren montert i 1939. Denne radaren kunne detektere skip opptil 15 nautiske mils avstand (Kjerstad, 2015).

Flere land under andre verdenskrig utviklet og praktiserte bruken av radar for å detektere fiendtlige skip, fly og ubåter. Englands bruk av radar og deres teknologi har fått noe av æren for utfallet av krigen. S-band radaren ble utviklet og tatt i bruk sent på 1930-tallet, mens X-band radaren ikke ble tatt i bruk før krigens slutt. Selv om radar var dyrt å montere for skipene, ble nytten bevist under krigen. Etter krigen ble det større etterspørsel for mer sivil teknologi som kunne bli solgt konvensjonelt. Radaren har siden den gang blitt bedre; med mer pålitelig og nøyaktig informasjon, samt mer robust teknologi.

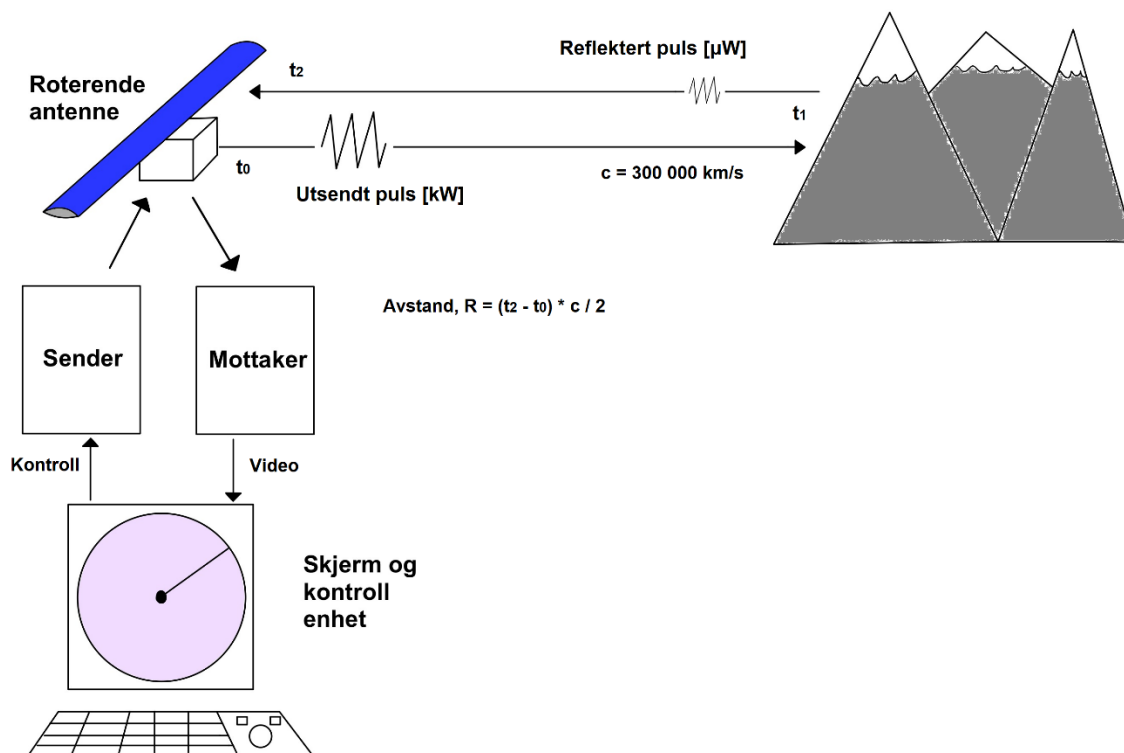
## 2.5.2 Radar begreper

### Avstandsmåling

Avstandsmålingen i en radar går ut på radiobølger som blir sendt ut og mottatt som et ekko. Det er det samme prinsippet som foregår når man roper mot en fjellvegg og får ekkoet tilbake. Da har lyd-/radiobølgen truffet et objekt som reflekterer signalet tilbake til utsender og dermed tilbakelagt dobbelte distansen (frem og tilbake). Figur 2 under illustrer radarprinsippet. For å kalkulere distansen til objektet deles summen på to, som vist i følgende formel:

$$Avstand = \frac{\text{lydhastighet} * \text{målt tid}}{2}$$

Her antas det at lydhastighet er tilnærmet lik 300 m/μs ved maritime kalkulasjoner, selv om det kan variere noe etter forholdene; temperatur, lufttrykk, fuktighet og frekvens brukt av radaren (Kjerstad, 2015).



Figur 2 Virkemåte og oppbygning for puls-basert radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-4)

## Pulslengde

Radarens pulslengde er den tiden radaren aktivt sender ut signaler. Lange pulslengder sendes over lengre distanser enn korte pulslengder, men korte pulslengder er bedre for å detektere mindre objekter på kortere avstander. Det stilles derfor krav til radarens pulslengder der de ikke skal være for lange, da det kan gjøre det umulig for radaren å detektere mindre gjenstander på kortere distanser, som for eksempel små skjær og staker (Kjerstad, 2015).

## Skilleevne

Skilleevnen er hvordan radaren klarer å skille mellom forskjellige objekter som kommer innenfor radarens utsendte pulser. Radarens skilleevne regnes ut med formelen:

$$\text{Skilleevne} = \frac{\text{lydhastighet} * \text{pulslengde}}{2}$$

Her får radaren dårligere skilleevne med lenger pulselengde og bedre skilleevne med kortere pulslengde (Kjerstad, 2015).

## **Dopplereffekt**

Dopplereffekten er hvordan lyd-, lys- eller radiobølge oppfattes forskjellig utfra hvordan kildene til signalene oppfører seg i forhold til hverandre. Prinsippet kan enklest forklares ved et eksempel; dersom en politibil kjører mot deg med sirene på, mottar du flere svingninger per sekund fra signalet, som gjør at signalet oppleves mer høyfrekvent. Dersom politibilen reiser bort fra mottaker, vil mottaker motta færre svingninger per sekund fra signalet og dermed vil signalet oppleves mer lavfrekvent (Holtebekk, 2022).

## **Pulsrepetisjonsfrekvens**

Pulsrepetisjonsfrekvensen (PRF) sier noe om hvor hyppig radaren sender nye pulser etter å ha sendt en puls. PRF er gitt av formelen:

$$\text{Pulsrepetisjonsfrekvens} = \frac{1}{\text{repetisjonsperioden}}$$

Er PRF for høy kan radaren sende ut nye frekvenser før ekkoene er kommet tilbake, noe som kan føre til at signaler ikke blir mottatt eller feiltolket. Med færre og lengre sendinger kan radiobølgene oppnå en lengre sendeeffekt. Det er derimot ikke ønskelig at radaren skal vente for lenge med å sende nye pulser, da radaren kan vente på ekko som ikke kommer.

## **Pulseffekt**

Pulseffekt er hvor mye effekt som brukes for å sende en puls fra radaren. Radaren mottar ekko fra sine pulser og gjennom det kan regne ut avstand og peiling til objektet som gav ekkoet. Dersom radaren skal motta et ekko er den avhengig av en sterk nok puls som blir sendt fra seg selv først. En vanlig pulsstyrke på maritime radarer er mellom 2 kW–75 kW (Kjerstad, 2015).

## **Ytelsesforhold**

«Forteller om forholdet mellom pulslengden og repetisjonsperioden. Begrepet er dimensjonsløst og kan være nyttig i beregningen av forskjellige begreper» (Kjerstad, 2015, s. 2-7).

Ytelsesforholdet regnes ut ved formelen:

$$\text{Ytelsesforhold} = \frac{\text{Pulslengden}}{\text{Repetisjonsperioden}}$$

## **S-band & X-band**

De typene radar som er mest brukt i dagens maritime næring er S- og X-band, der de begge har sine styrker og svakheter. Da det stilles krav til montering på de fleste skip av en X-band radar, stilles det ikke krav til montering av S-band radar, men de fleste skip har en av hver. X-band radaren operer med en 3 cm antenne, bølgelengde på 3,75–2,42 cm og en frekvens på 8000–12400 MHz, derimot operer S-band radaren med en 10 cm antenne, bølgelengde på 15,0–7,5 cm og en frekvens på 2000–4000 MHz. Fordelene med å bruke en S-band radar er at den fungerer bedre i regn og snøbyger. Dermed kan den være effektiv på seilaser langs kysten eller trafikkerte farvann når det er mye nedbør. S-band fungerer godt til å detektere objekter på lengre avstander, men ikke like godt til å skille mellom objekter på kortere avstander. X-band har kortere rekkevidde, som gjør at den ikke fungerer like godt til å detektere objekter på lengre avstander. Den blir også i større grad påvirket av meteorologiske forhold. Derimot har X-band radaren med sin høyere frekvens en bedre deteksjonsevne på objekter som er nærmere. Dette viser at der X-band har svakheter, har S-band styrker, og motsatt, som betyr at radarene utfyller hverandre. Ved å installere en av hver oppnår man det som kan bli sett på som den «optimale» radar-konfigurasjonen (Kjerstad, 2015).

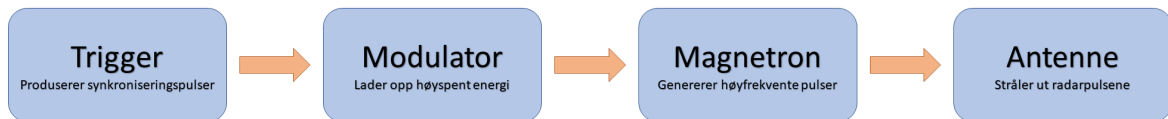
### **2.5.3 Dagens radar som posisjonering alene og svakheter**

Posisjonering med dagens teknologi foregår i stor del utfra GNSS posisjon. Faller GNSS posisjonering ut, har skipene bare radar som elektroniske navigasjonshjelpemiddel og blir dermed avhengige av informasjonen som radar kan gi. Når radar er det eneste backup-systemet ombord er konsekvensene av utfall eller feil med det systemet store, vist i Tabell 4. Derimot er sannsynligheten lav for feil og mangler med systemet, men det er ikke umulig. Feil som kan føre til misvisende informasjon fra radaren er blant annet; strømforsyninger, multipath, feil clutter innstillinger, mangelfull detektering og dårlig radarland (IALA, 2012). Radarposisjoner med dagens teknologi går ut ifra å peile (kurs og distanse) til kjente objekter, for å sette inn posisjonen i ECDIS, og derfra bruke dead reckoning til videre seilaser frem til neste peiling er tatt. Ved bruk av kun radar som posisjonskilde kan de nevnte feilene føre til feilaktig informasjon og dermed resultere i ulykker. På bakgrunn av de forskjellige feilkildene til dagens radar som posisjoneringssystem konkluderte International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA) med: «Radar can provide a limited backup to GNSS but does not meet all the PNT requirements» (IALA, 2012, s. 13).

## 2.5.4 Konvensjonell maritim radar

En konvensjonell maritim radar er en pulsbasert radar. Figur 2 illustrerer oppbygning og prinsipp for avstandsmåling med maritim pulsbasert radar. Denne består av en sender og mottaker, antenne, skjerm og kontrollpanel. Senderen genererer radarpulsene før disse blir utstrålt fra antennen. I konvensjonell maritim radar brukes magnetron til å generere radarpulsene. Det reflekterte ekkoet fra radarens omgivelser blir så mottatt av antennen før mottakeren forsterker og prosesserer signalene. Det ferdige prosesserte signalet blir deretter gjort om til informasjon som kan vises på skjermen. På kontrollpanelet finnes menyer og funksjoner som kan betjenes av navigatøren.

Senderenheten i en konvensjonell maritim pulsbasert radar består av en triggerkrets, modulator og magnetron (Kjerstad, 2019). Signalgangen under pulsgenerering ved senderenheten i radaren er illustrert under i Figur 3. Oppgaven til triggeren er å styre sendeoperasjonen ved å produsere regelmessige synkroniseringspulser. Frekvensen til disse synkroniseringspulserne vil være radarens PRF. Triggerkretsen sørger også for at tidsmåling fra utsendt til mottatt radarpuls startes på riktig tidspunkt på mottakersiden.

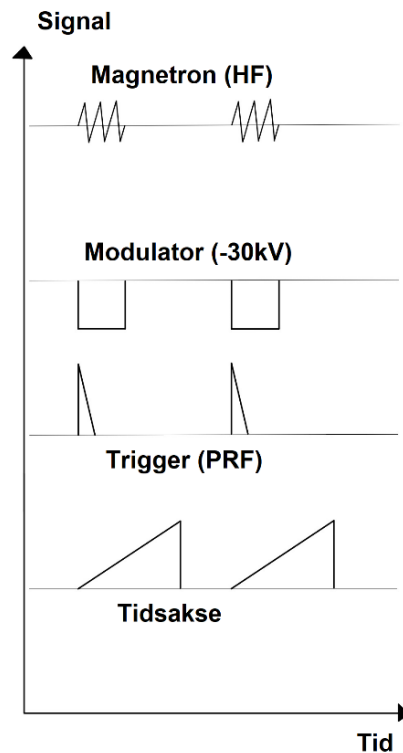


Figur 3 Signalgang ved pulsgenerering i senderenheten i magnetronbasert radar. Egen figur

Modulatoren sin oppgave er å lade opp energi med høy negativ spenning som skal forsynes til magnetronen. Energien vil lades ut over magnetronen når triggerpulsen utløses. Perioden som modulatorkretsen utlader seg over, vil bestemme pulslengden til radarpulsen. Utladningspulsens form styres også av modulatoren. Disse egenskapene ved radarpulsen styres av spesielle egenskaper ved modulatoren. Pulslengdene som genereres ligger i området  $0,08\text{-}1,00\ \mu\text{s}$  (Kjerstad, 2019). Dette vil tilsvare en utstrekning på omtrent 24–300 m. Figur 4 under viser hvordan triggerens PRF, modulatorens spenning og utladning, og magnetronens ferdig-genererte puls henger sammen.

Magnetronen er den delen av senderenheten som til slutt genererer de høyfrekvente radarpulsene. En magnetron er et «elektronrør for generering av elektromagnetiske svingninger med svært høy frekvens» (Lied, 2017, avsnitt 1). Effekten på pulsene ligger i området 2-50 kW. For at radaren skal kunne sende ut pulser med den høye effekten som

kreves i maritime radarer brukes en magnetron (Kjerstad, 2019). Frekvensen til de ferdig genererte radarpulsene vil ligge på omtrent 9 GHz eller 3 GHz avhengig av om det er en X-band eller S-band radar.



Figur 4 Pulsgenerering i magnetronbasert maritim radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-29)

Antenneenheten er den delen av radaren som sender ut radarpulsene og som mottar ekkot fra skipets omgivelser. Antennen bør plasseres så høyt som mulig for å oppnå best rekkevidde, samt ha en plassering som unngår skyggesoner fra for eksempel mast og andre konstruksjoner. Polarisasjonen til antennen betegner hvordan det elektriske feltet brer seg ut fra antennen. Noen radarer bruker horisontal polarisasjon, mens andre bruker vertikal polarisasjon. Det er likevel horisontal polarisasjon som er mest vanlig fra en maritim radarantenne (Kjerstad, 2019).

Radarens mottaker skal detektere, forsterke og prosessere de reflekterte pulsene fra skipets omgivelser. Mottakerenheten i radaren består av flere deler. Disse er Transmitter/Receiver-cell (TR-rør), lokal oscillator, frekvensmikser, mellomforsterker og videoforsterker (Kjerstad, 2019). Disse delene nevnes her da det gir en ide om den signalforsterkningen og signalprosesseringen som skjer i mottakeren, men de beskrives ikke ytterligere.

For at ekkoet som reflekteres fra skipets omgivelser skal være registrerbart når det kommer tilbake til radarantennen, må effekten på pulsene som radaren sender ut være stor. Typisk har maritime magnetron radarer en pulseffekt på mellom 2–75 kW. Når ekkoene kommer tilbake vil energien i de reflekterte signalene være mye lavere, gjerne ned i størrelsesorden  $10^{-12}$  W (Kjerstad, 2019). Det mottatte signalet vil altså være ekstremt svakt.

Radarpulsen må også være kort. Det er spesielt for å sikre at radaren kan fungere på korte avstander, samt at radarens skilleevne er gitt av halve pulslengden (Kjerstad, 2019). For at radaren skal kunne måle avstand til mål ved hjelp av ekko må det være et tydelig skille mellom utsendt og reflektert signal. Ved korte avstander kreves det derfor at pulslengden er kort. For at radaren skal være i stand til å skille mellom ekko som ligger nær hverandre kreves det også at pulslengden er kort.

For pulsbaserte maritime radarer kreves det altså at pulslengden er kort, samtidig som at den er sterk nok slik at radaren kan registrere det svake ekkoet. Radaren må derfor sende ut sterke høyfrekvente korte pulser. Det finnes flere typer svingekretser som kan generere høyfrekvente radarpulser, men for at pulsene skal være tilført nok energi som kreves i en maritim radar er magnetronen den mest brukte (Kjerstad, 2019).

### **2.5.5 «New Technology»-Radar**

Den konvensjonelle magnetronbaserte radaren er den radartypen som i hovedsak brukes om bord på skip. Teknologien som disse radarene baserer seg på er i prinsippet lite forandret siden 2. verdenskrig. Det finnes imidlertid andre typer radarer som baserer seg på annen teknologi enn magnetron til å generere radarpulsene. Slike radarer går gjerne under navnet «new technology» (NT) radar. Det er to typer NT-radarer som skiller seg ut. Disse er Solid State-radar og Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar.

Det har lenge vært etterspurt en innføring av nyere radarteknologi med de fordelene det medfører. Et rigid regelverk fra IMO basert på konvensjonell teknologi har likevel forhindret en overgang til NT-radarer (Kjerstad, 2019). Et sentralt argument her er at NT radarer ikke har vært i stand til å trigge racon. Hovedsakelig fordi den utstrålte effekten er for lav, eller at signalet fra radaren har en modulasjon som ikke er kompatibel med racon.

I 2004 godkjente IMO nye ytelsesstandarder til radarer i Resolution MSC.192(79) som fra 1. juli 2008 fjernet kravet for at S-band radarer skal trigge racon (IALA, 2011). Dette var



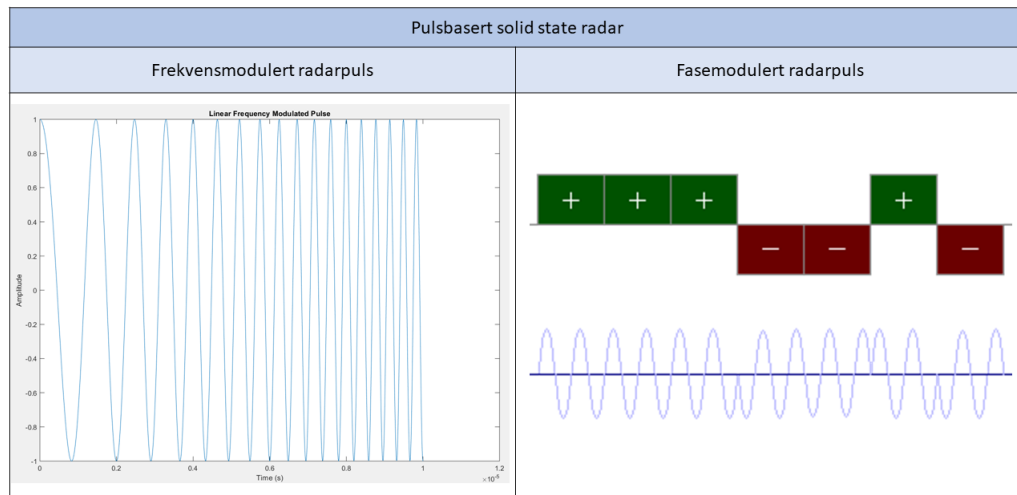
for å kunne dra nytte av fordelene med pulskompresjon og signalprosessering som solid state-teknologien muliggjør. Dette gir radaren bedre ytelse, mindre støy fra regn og bølger og følgelig et tydeligere radarbilde.

### **Solid State-radar**

Solid state-radaren er en nyere type radar som ikke bruker en magnetronbasert svingekrets til å generere radarpulsene. Istedenfor brukes en transistorisert svingekrets i senderen (Kjerstad, 2019). Dette er den fundamentale forskjellen mellom den konvensjonelle magnetronbaserte radaren og solid state-radaren. En transistor er innenfor elektronikken en type halvleder uten bevegelige deler. Denne typen utstyr omtales derfor som «solid state» (HowStuffWorks.com, 2001).

Fordelene med solid state er at senderen kan kontrolleres til å sende ut modifiserte radarpulser, ikke bare korte pulser med fast frekvens som i den magnetronbaserte senderen. Solid state-teknologien åpner også opp for avansert signalbehandling på mottakersiden (Kjerstad, 2019). Dette gir et mer detaljert og støyfritt radarbilde.

Pulsene fra solid state senderen kan modifiseres ved avansert pulskompresjon og ved variasjon av pulslengdene. En av metodene for pulskompresjon er å generere en frekvensmodulert radarpuls. Det vil si en puls der frekvensen i pulsen varierer med tiden. Denne frekvensvariasjonen kan enten være lineær eller ikke-lineær. En annen metode for pulskompresjon er å bruke en fasemodulert puls. Disse teknikkene er illustrert under i Figur 5. Slike pulsmodulasjonsteknikker gjør det mulig å lokalisere det reflekterte objektet innad i pulsen, selv ved lange pulslengder (Wolff, u.å.). Radarer som bruker disse teknikkene kalles gjerne for Compressed, High-Resolution Pulse (CHIRP) radar.



Figur 5 Prinsipp for frekvensmodulert og fasemodulert puls. Egen figur til venstre. Figur til høyre hentet fra (Wolff, u.å.)

Variasjon med pulslengdene gjøres også med fordel i solid state-radarer. En teknikk kan være å først sende ut en kort umodulert puls for å dekke nærområdet, for deretter å sende ut en lengre frekvensmodulert puls for å dekke et høyere avstandsområde (Kjerstad, 2019). I begge tilfellene vil skilleevnen være god. Den korte pulsen kan typisk ha lengde på  $0,07 \mu\text{s}$ , tilsvarende 10,5 m. Den lange pulsen vil også gi god skilleevne fordi den er frekvensmodulert slik at ekko kan lokaliseres innad i pulsen.

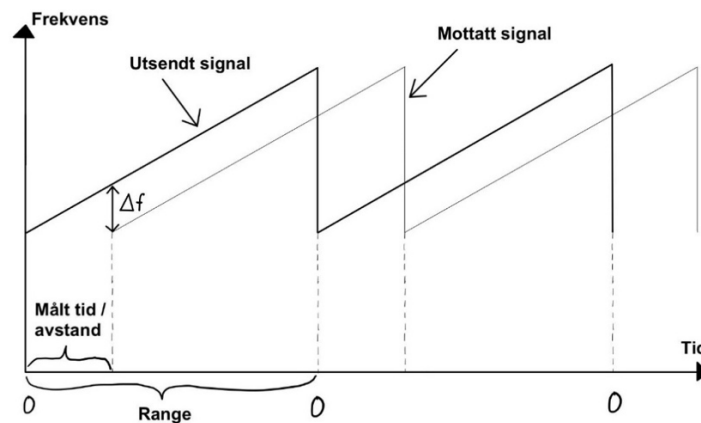
Pulsens peak-effekt til solid state-radarer er betraktelig lavere enn for magnetron radarer. Typisk for solid state S-band radarer er en pulseffekt på 170–250 W (Kjerstad, 2019). Furuno oppgir på sin nettside at de nå også har IMO-godkjent X-band radar med pulseffekt på 600 W. Til sammenligning har magnetronbaserte radarer en pulseffekt på 2–75 kW. Denne vesentlig lavere pulseffekten gir betraktelig mindre støy fra regn og bølger. For magnetron radarer må pulsene være korte og pulseffekten være høy for at radaren skal ha god skilleevne og for at omgivelsene skal bli bestrålt med nok energi til å gi et registrerbart ekko. Puls-kompresjon og frekvensmodulering på radarpulsene i solid state-radarer gjør at pulsene kan være lenger. Jo lengre pulsen er jo mer energi vil den inneholde. På denne måten bruker solid state-radarer puls-kompresjon til å dra nytte av energifordelene ved lengre pulser med lavere pulseffekt (Wolff, u.å.). Dette gir et mer detaljert og støyfritt radarbilde (Kjerstad, 2019).

Solid state-radarer har også mulighet til å bruke doppler prosessering i mottakeren. Dette kan gi økt deteksjonssannsynlighet på små bevegelige mål og bedre informasjon om målets

bevegelse og hastighet. Doppler-basert analyse kan imidlertid føre til avvik i presentasjon av racon (Kjerstad, 2019).

### FMCW radar

FMCW radar skiller seg fra de tidligere omtalte pulsbaserte radartypene. Ved FMCW radar sendes det kontinuerlig ut effekt, der frekvensen til det utsendte radarsignalet varierer med tiden som en trekant-funksjon eller som en sinus-funksjon. Avstanden til mål vil dermed kunne beregnes som en funksjon av frekvensforandringen mellom utsendt og mottatt signal (Kjerstad, 2019). Virkemåten til denne typen radar er illustrert i Figur 6 under. Siden det sendes ut kontinuerlig radiobølger kreves det langt mindre effekt enn ved en pulsbasert magnetron radar. Dette gjør at en solid state sender kan benyttes. FMCW radar er imidlertid ikke typegodkjent av IMO blant annet grunnet kravene til å trigge og detektere racon og Search and Rescue Radar Transponder (SART).



Figur 6 Virkemåte FMCW radar. Egen figur med data fra (Kjerstad, 2019, s. 2-58)

### 2.5.6 Krav til dagens radar

Radaren er et av det mest brukte navigasjonshjelpemidlene som er i bruk på konvensjonelle skip. For å ivareta radarens operative standard har IMO og SOLAS stilt krav til radarene ombord på skip, blant annet deteksjonsavstanden som vist i Tabell 5. Fartøy som har en bruttotonnasje på mer enn 300 tonn stilles det krav til minst ett radaranlegg som sender på 9 GHz båndet. Fartøy over 10 000 tonn stilles det krav til minst to radaranlegg, der en av de skal sende på 9 GHz båndet, kravet gjelder for alle passasjerskip, uansett størrelse (Kjerstad, 2019). Det stilles også krav til manuell plotting på radarer for skip over 1600 tonn. Skip over 10 000 tonn skal radarene være utstyrt med Automatic Radar Plotting Aid (ARPA).

De tekniske kravene til radar er blant annet at de skal tåle en relativ vindhastighet på 100 knop og rotere med urviseren med minimum 12 rotasjoner per minutt (Kjerstad, 2019). Det stilles et internasjonalt krav til en peilenøyaktighet bedre enn 2,5 grader. I Norge er det et nasjonalt krav på 4 grader for skip under 20 m. Samt en minsteavstand og skilleevne bedre enn 50 meter på avstander nærmere enn 2 nautiske mil. For radarskjermene går kravene ut på skjermdiameter utfra skipets størrelse:

- < 500 BT skal ha en skjermdiameter på 180 mm
- < 10 000 BT skal ha en skjermdiameter på 250 mm
- > 10 000 BT skal ha en skjermdiameter på 320 mm

Det stilles særegne krav for skip i høy hastighet, gitt i «high speed craft code» (Kjerstad, 2019).

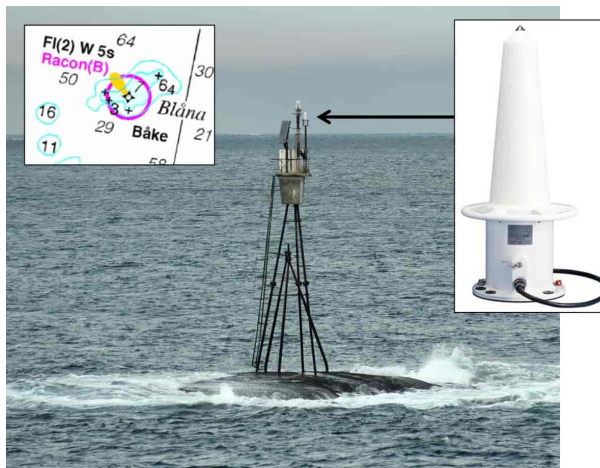
Tabell 5 Minimum deteksjonsavstand (operative krav) (Kjerstad, 2019)

Hva	Høyde/størrelse på objekt	Deteksjonsavstand X-Band	Deteksjonsavstand S-Band
Høy kystlinje	60 meter eller mer	20 nm	20 nm
Medium kystlinje	6 meter eller mer	8 nm	8 nm
Lav kystlinje	3 meter eller mer	6 nm	6 nm
Større skip (> 5000 BT)	10 meter	11 nm	11 nm
Mindre skip (> 500 BT)	5 meter	8 nm	8 nm
Mindre båt med radarreflektor	4 meter	5 nm	3,7 nm
Navigasjonsbøye med radarreflektor	3,5 meter	4,9 nm	3,6 nm
Typisk navigasjonsbøye	3,5 meter	4,6 nm	3,0 nm
Mindre skip med lengde 10 meter uten radarreflektor	2 meter	3,4 nm	3,0 nm

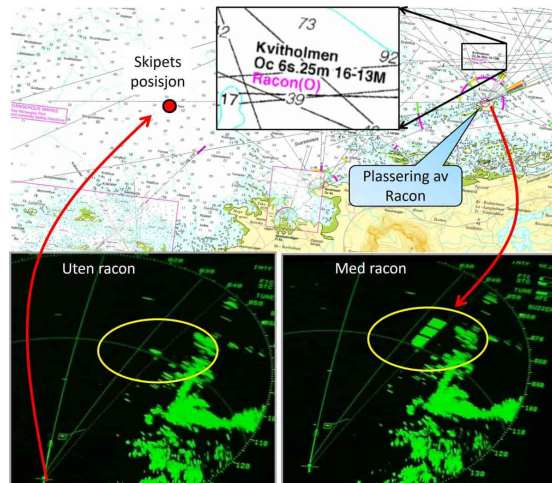
## 2.6 Racon

Racon er et radarbasert navigasjonshjelpemiddel. Ordet «racon» er en forkortelse for det engelske ordet «Radar Beacon». På norsk kan dette oversettes til «radarfyr». Slike radarfyr plasseres på strategisk valgte steder langs kysten slik at navigatører kan bruke disse som et hjelpemiddel til posisjonsbestemmelse.

Systemet fungerer ved at eget skips radar sender ut en radarpuls som treffer en racon. Raconen blir da aktivert og sender ut et svarsignal som blir fanget opp av skipets radar. Dette svarsignalet er bygd opp som en morsekode som muliggjør identifisering av hvert radarfyr. Racon vil vises på radarskjermen som en morsekode der den nærmeste enden av ekkoet vil være racon-senderens plassering. Retningen til signalet vil alltid være fra eget skip. Figur 7 og Figur 8 under viser eksempel på en racon-enhet montert på et sjømerke og radarbilde med ekko fra racon.



Figur 7 Eksempel på racon og merking i sjøkart (Kjerstad, 2022b)



Figur 8 Eksempel på radarbilde med og uten racon (Kjerstad, 2022c)

Racon er et godt hjelpemiddel under navigasjon fordi navigatøren får opp et tydelig ekko på radarskjermen som kan brukes til posisjonsbestemmelse basert på peiling og avstand til raconen. Racon brukes i hovedsak til å sikre seilas i leden langs kysten, eller til å identifisere sikker landkjenning ved innseiling til kysten (Kjerstad, 2022d).

### 2.6.1 Oppbygning og virkemåte

En racon består av en rundtstrålende antenne, en radarmottaker og en impulsmodellert sender (Kjerstad, 2022d). Når en radarpuls fra et skip treffer og aktiverer raconen vil den umiddelbart sende ut en eller flere svarpulser. Når disse svarpulsene fanges opp av skipets radarantenne vil de vises som en morsekode på radarskjermen.

IALA Recommendation R0101 Marine Radar Beacons (RACONS) gir en standard for tekniske parametere og veiledning til bruken av racon (IALA, 2004).

Del 1 i IALA R0101 gjengir tekniske parameter for racon i ITU-R M.824-2 Annex 1. Her er det gitt tekniske krav til raconens antenne, mottaker, sender og responssignal. Disse er presentert i Tabell 6 under med følgende merknader:

*Merknad 1:* Antenne gain, mottaker sensitivitet, utsendt effekt, lengde på svarsignal, racon på-periode/ av-periode, og side-lobe signalundertrykking skal bestemmes av administrasjonen.

*Merknad 2:* Racon som sender kontinuerlig ut på frekvensbåndet til mottatt signal er gammeldags og ikke anbefalt for nye installasjoner.

*Merknad 3:* Utsendt effekt er ikke spesifisert.

Tabell 6 Tekniske parameter til racon (IALA, 2004)

Del		Spesifikasjon
1 Antenne	Polarisering	I 9 GHz bånd: Kan respondere på radarer som bruker horisontal polarisasjon. I 3 GHz bånd: Kan respondere radarer som bruker horisontal polarisasjon og radarer som bruker vertikal polarisasjon.
2 Mottaker	Frekvens bånd	9 300 – 9 500 MHz og/eller 2 900 – 3 100 MHz.
	Blokkeringsperiode	$\leq 100 \mu\text{s}$ etter endt respons.
	Primær radarpuls lengde	$\geq 0,05 \mu\text{s}$ og $\leq 2 \mu\text{s}$
3 Sender	Frekvens	Sending av svarpuls skal skje enten: Ved mottak av radarpulser på under $0,2 \mu\text{s}$ : På frekvensen til mottatt radarsignal med en frekvenstoleranse på $\pm 3,5 \text{ MHz}$ , eller, Ved mottak av radarpulser på over $0,2 \mu\text{s}$ : På frekvensen til mottatt radarsignal med en frekvenstoleranse på $\pm 1,5 \text{ MHz}$ Eller Kontinuerlig sending på frekvensbåndet til mottatt signal der utsendt signal varierer gjennom hele frekvensbåndet. Utsending består av en rekke sveip over frekvensbåndet
4 Respons signal	Forsinkelse fra mottatt til utsendt signal	Normalt ikke mer enn $0,7 \mu\text{s}$ .
	Identifikasjon	Kodet som en morsebokstav. Kodingen skal normalt starte med en strek, og ikke en prikk. Morsebokstaven skal beskrives i nautiske publikasjoner.
	Lengde	Den minste av verdiene 20% av maks rekkevidde til racon, eller 5 nm.

Det viktigste fra denne tabellen er at racon kan operere enten i 9 GHz båndet (X-band), i 3 GHz båndet (S-band), eller i begge. Det finnes også to typer racon; «den pulsfølsomme typen som svarer på samme frekvens som skipets radarfrekvens» og «slow sweep racon som sender kontinuerlig ut et signal hvor frekvensen vil drive over radarbåndet...» (Kjerstad, 2019, s. 2-124). Merknad 2 forteller at sistnevnte er gammeldags og ikke anbefalt for nye installasjoner. Det spesifiseres også at responssignalet til racon skal være kodet som en morsebokstav. Merknad 1 forteller at sensitiviteten til mottakeren ikke er spesifisert. Det vil derfor variere hvor stor effekt det må være på mottatt radarsignal for at racon skal aktiveres.

Del 2 i IALA R0101 gir veiledning til bruken av racon. Denne spesifiserer blant annet:

- Racon skal tilfredsstillende kravene i del 1.
- Det skal normalt sett brukes racon som opererer i både 9 GHz og 3 GHz båndene.
- For å unngå unødvendig støy på radarskjermen fra racon, bør racon programmeres med en av-periode. For at radarens prosesseringskretser ikke skal forkaste racon signal, bør på-periodene ikke være kortere enn 15 sekunder. For å sikre en tilfredsstillende oppdateringsfrekvens på radarskjermen, bør det være minst en på-periode hvert 60 sekund.
- Racon skal være utrustet med sidelobe signalundertrykking.
- Effekten i utsendt signal er en del av racon designet og kan derfor ikke endres. I noen tilfeller kan antennekarakteristikk endres. Høyere gain på antennen kan brukes for å øke rekkevidden.

Del 3 i IALA R0101 beskriver racon karakteristikk. Her diskuteres blant annet:

- Radarens deteksjonsrekkevidde av racon kan økes eller minkes ved å endre på raconens mottaker sensitivitet eller effektiv utsendt effekt. Høyere effektiv utsendt effekt øker sannsynligheten for deteksjon for radar med mye støy. Høyere antenne gain på raconen øker mottakerens sensitivitet for å bli aktivert. Høyere antenne gain øker også effektiv utsendt effekt.
- Interferens fra radarens sidelober kan filtreres bort ved at raconen identifiserer det sterkeste signalet som radarens hovedlobe og filtrerer bort resten.
- Raconens energiforbruk kan reduseres ved å minke på-perioden.
- Oppdateringsraten til raconens responssignal på radarskjermen avhenger av raconens på-periode/ av-periode forhold og rotasjonshastigheten til radarantennen.



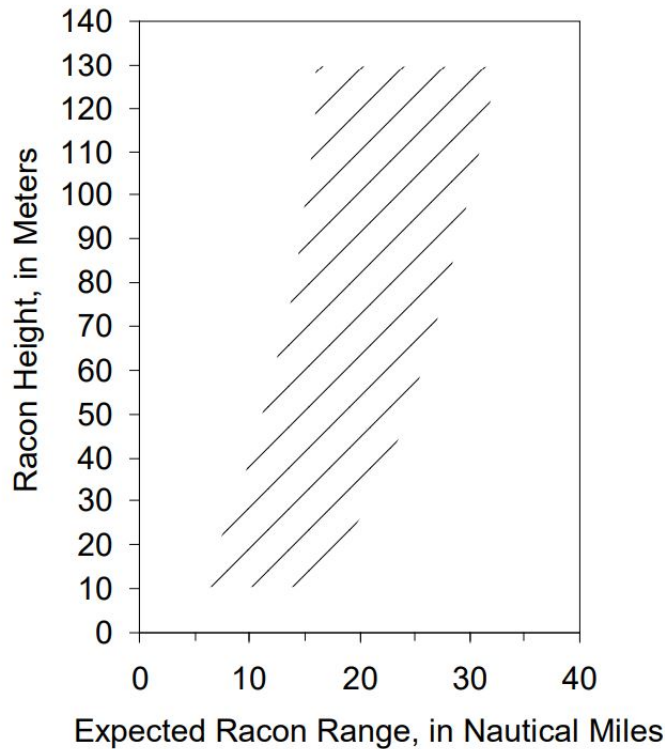
## 2.6.2 Racon rekkevidde

Del 4 i IALA R0101 omtaler rekkevidde til racon. Metoden som IALA anbefaler til å oppgi rekkevidde til racon er å anslå den lengste avstanden raconen kan oppdages av radaren på. Denne avstanden vil avhenge av monteringshøyden til raconen og radaren, samt utsendt effekt fra skipets radar (IALA, 2004).

I tillegg til utsendt effekt fra skipets radar og høyde til radar og racon vil også miljømessige faktorer påvirke rekkevidden. Blant disse er temperatur, fuktighet og nedbør. Påvirkningsgraden fra disse er vanskelig å måle og umulig å forutse. Dette gjør det vanskelig å anslå rekkevidden til racon (IALA, 2004).

En annen faktor som påvirker rekkevidden er multipath interferens (IALA, 2004). Dette oppstår ved at en del av signalet fra skipets radar reflekteres i havoverflaten før det treffer raconen, mens en annen del av signalet går direkte til raconen. Det vil da være en faseforskjell mellom signalene når de treffer raconen. Denne faseforskjellen kan føre til at signalene vil eliminere hverandre. Dette reduserer signalstyrken fra radaren ved raconen. Dersom signalstyrken er lavere enn det som skal til for å aktivere raconen vil den ikke sende svarsignalet sitt. Multipath interferens varierer med antennehøyden til radar og racon, og avstanden mellom radar og racon. Hvor multipath interferens oppstår vil derfor variere fra fartøy til fartøy. Dette er likevel ikke nødvendigvis et stort problem for fartøy i bevegelse da de fort vil bevege seg bort fra sonene med multipath interferens.

IALA har i R0101 publisert et diagram som kan brukes for å vurdere antatt rekkevidde for racon plassert ved forskjellige høyder over havet. Dette er presentert i Figur 9 under. Diagrammet ser bort ifra soner ved multipath interferens og bruker et verdensomspennende gjennomsnitt for signalets atmosfæriske utbredelse. Ved bruk av diagrammet må man likevel være klar over at soner med multipath interferens eksisterer innenfor rekkevidden til raconen.



Figur 9 Forventet racon rekkevidde ved varierende høyde over havet (IALA, 2004)

Den venstre vertikale kanten på det skraverte området representerer forventet rekkevidde for et lite fartøy med en 4 kW radar montert 3 meter over havoverflaten. Den høyre vertikale kanten beskriver forventet rekkevidde for et stort fartøy med en 25 kW radar montert 35 meter over havoverflaten.

## 2.7 Enhanced Radar Positioning System

Resilient og robust posisjonering er et fundamentalt krav for å lykkes med implementeringen av e-navigasjon (Ward *et al.*, 2014). GNSS vil fortsette å være primærmetoden for posisjonering, men det trengs et backup-system for å oppnå resiliens innen PNT. ERPS er et radarbasert absolutt posisjoneringssystem som pekes på som et mulig backup-system til GNSS (Bransby og Williams, 2016).

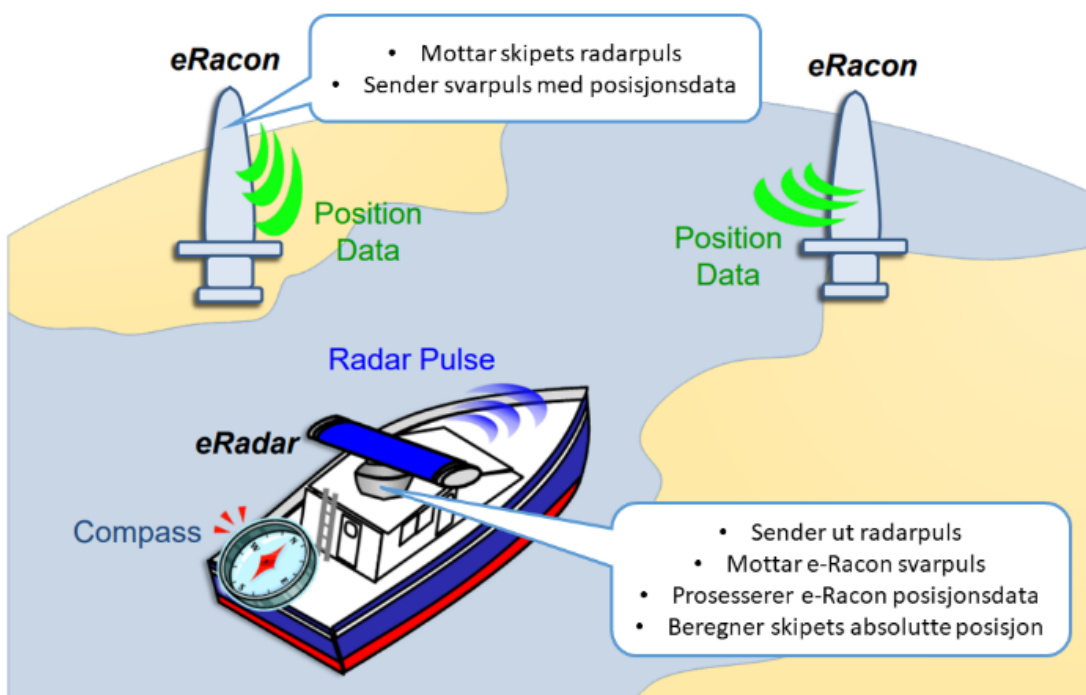
Tradisjonelt sett har radaren blitt brukt til relativ posisjonering. Samtidig kan navigatøren også bruke radaren til å finne en omtrentlig absolutt posisjon ved å ta peiling og avstand til kjente objekter, eksempelvis et nes eller et sjømerke. I ERPS systemet brukes modifiserte racon (e-racon) og modifisert radar (e-radar) til å automatisk beregne absolutt posisjon til skipet.

ERPS systemet fungerer ved at radarpulsen fra skipets e-radar trigger nærliggende e-racon. Svarsignalet fra e-racon inneholder informasjon om e-raconens absolutte posisjon. Skipets e-radar mottar og prosesserer dette svarsignalet, slik at skipets absolutte posisjon kan beregnes ved peiling og avstand til e-raconens kjente absolutte posisjon (IALA, 2022). Figur 10 under illustrerer systemets komponenter og dets virkemåte.

For at skipets e-radar skal være i stand til å beregne absolutt posisjon trenger den input-signal fra enten:

- En e-racon og skipets heading (styrt kurs); eller
- To eller flere e-racon.

Dersom flere e-racon er innenfor rekkevidde, vil dette være en fordel fordi det vil gi en mer nøyaktig posisjon. Beregnet posisjon blir kommunisert til andre navigasjonssystemer, som for eksempel ECDIS, via National Marine Electronics Association (NMEA) setninger. ERPS systemet bruker datumet WGS84 (IALA, 2022).



Figur 10 ERPS systemet. Figur fra (IALA, 2022) med egen tekst

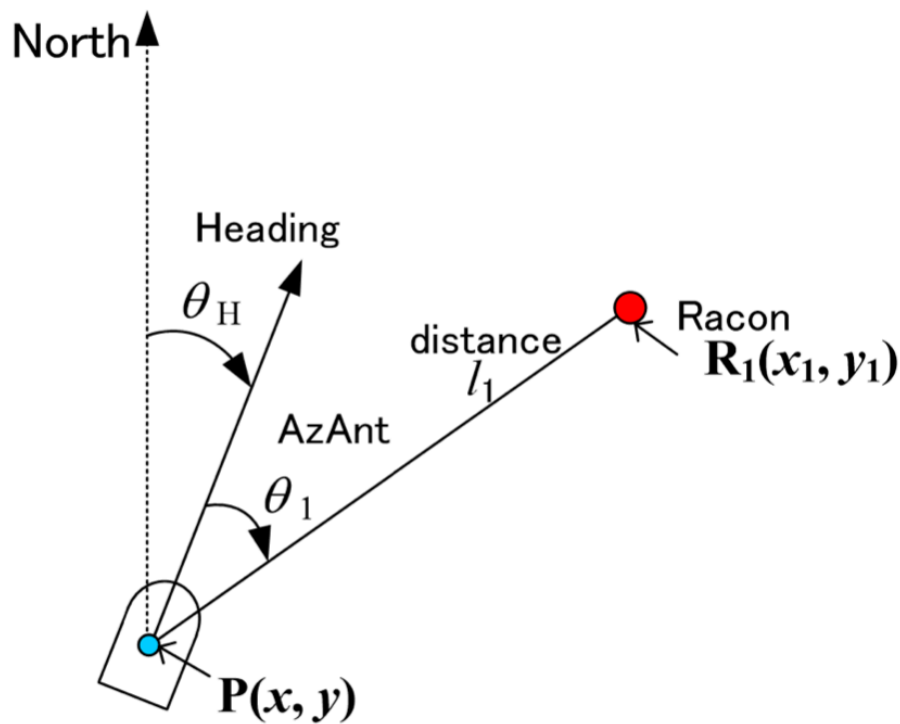
IALA definerer tre ulike kategorier av alternative PNT systemer (IALA, 2022). Disse er redundante systemer, backup-systemer og sikkerhets-systemer. ERPS er ikke i stand til å tilby timing (T i PNT), og vil derfor ikke kunne være et redundant PNT system. ERPS kan likevel fungere som et lokalt backup-system.

### 2.7.1 Geometri

Posisjonsløsningen og posisjonens nøyaktighet vil være avhengig av geometrien mellom skipets e-radar og e-racon på land. Prinsippet Horizontal Dilution of Presisjon (HDOP) om horisontal geometrisk forringelse av posisjon vil være gjeldende (IALA, 2022). For å bedre geometrien kan et økt antall e-racon benyttes.

For å oppnå en pålitelig posisjon fra ERPS systemet går man ut ifra teorien der e-racon er montert på faste kjente punkter med pålitelig posisjon. Skipets posisjon finner man ut ved peilinger til den kjente posisjonen som utgir informasjon gjennom e-racon. Da man går utfra e-racon som den sikre og kjente posisjonen, er det en mer nøyaktig posisjon som oppnås ved bruk av flere e-racon. Derimot klarer ERPS å oppgi skipets posisjon når bare én e-racon er tilgjengelig, illustrert i Figur 11. Det gjøres ved å kalkulere inn skipets kurs, i forhold til en peiling til en e-racon, samtidig tar systemet høyde for e-radar antennens høyde og rotasjonshastighet.

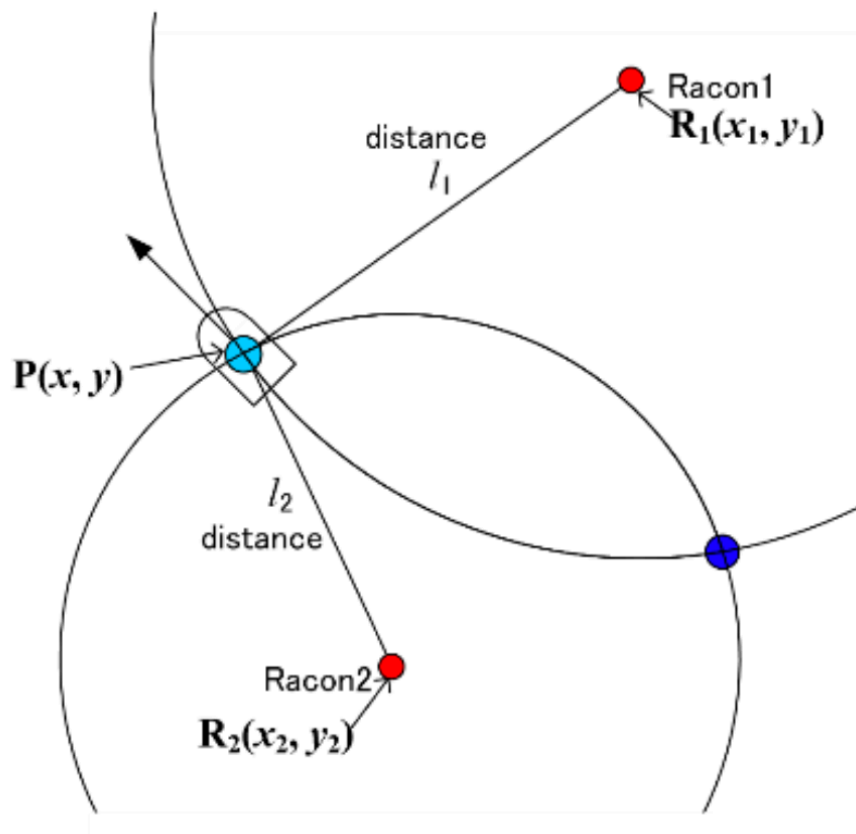
$$\begin{cases} x = x_1 - l_1 \cos(\pi/2 - \theta_H - \theta_1) \\ y = y_1 - l_1 \sin(\pi/2 - \theta_H - \theta_1) \end{cases}$$



Figur 11 ERPS posisjons bestemmelse en e-racon løsning (IALA, 2022)

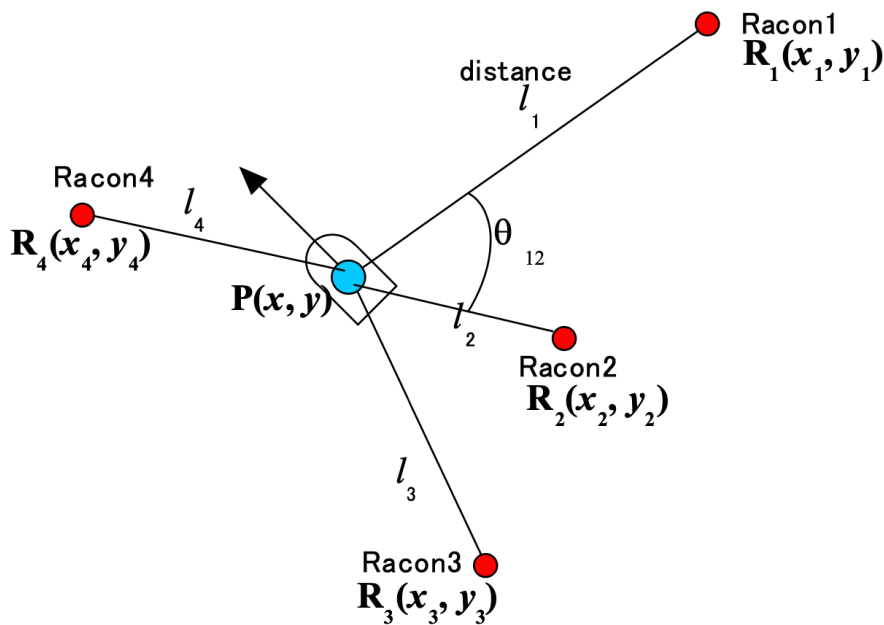
Ved tilgang til to eller flere e-racon blir posisjonen mer nøyaktig. E-radaren tar avstanden til e-racon X, og avstanden til e-racon Y. Der de punktene krysser er da posisjonen til skipet, som i Figur 12.

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = l_1 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = l_2 \end{cases}$$



Figur 12 ERPS posisjonsbestemmelse ved hjelp av to e-racon (IALA, 2022)

Dersom flere enn to e-racon er tilgjengelig velger ERPS å hente informasjon ut ifra de som har best tilgjengelighet og gir mest nøyaktig posisjon. Som for eksempel om det er tre e-racon tilgjengelig kan ERPS hente posisjonen fra en og to, to og tre eller en og tre, som vist i Figur 13.



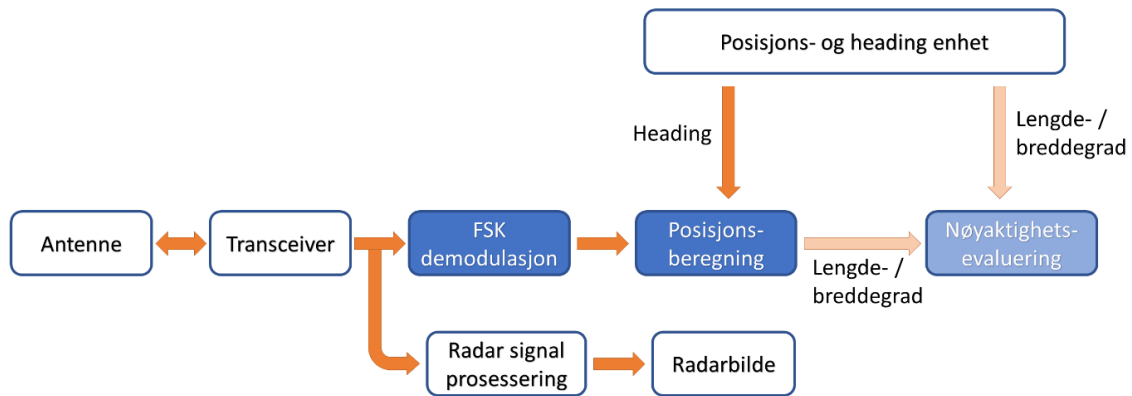
Figur 13 Uthenting av posisjon ved mer enn to e-racon tilgjengelig (IALA, 2022)

## 2.7.2 E-radar

Radaren i ERPS systemet vil være en modifisert radar som automatisk kan beregne posisjonen til sitt fartøy basert på informasjonen i e-racon signalet. En slik radar kan kalles for e-radar. E-radaren må sende ut radarpulser som er i stand til å trigge e-racon, og den må kunne motta og prosessere posisjonsinformasjonen i e-raconsignalet.

For at radaren skal kunne tolke posisjonsinformasjonen fra e-racon må den demodulere det mottatte e-raconsignalet og for deretter å kunne gjøre en posisjonsberegning. Posisjonsberegningen gjøres enten ved peiling og avstand eller kun ved avstand til e-racon. Dersom flere e-racon er tilgjengelig kan kun avstand brukes. Dersom kun en e-racon er tilgjengelig kan peiling og avstand benyttes. For at e-radaren skal kunne ta en sann peiling til en e-racon trenger e-radaren heading-input fra en annen sensor (IALA, 2022).

Figur 14 under viser en skjematisk oppbygning til en e-radar. Blå bakgrunn indikerer tilleggskomponenter til en vanlig maritim radar. Komponenten med svak farge ble brukt under en test av et ERPS system (Ward *et al.*, 2014) og vil ikke være nødvendig å ha som en egen komponent i en e-radar.



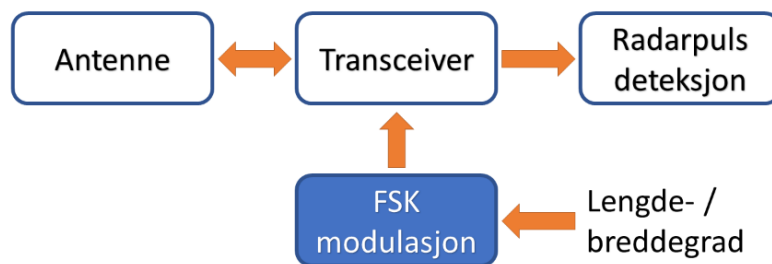
Figur 14 E-radar oppbygning. Blå bakgrunn indikerer tilleggskomponenter til vanlig radar. Egen figur med data fra (Ward *et al.*, 2014)

ERPS systemet vil ikke fungere med konvensjonelle maritime radarer slik de er i dag. Radarer om bord på skip må enten byttes ut eller oppgraderes. I to av testene som har blitt gjort av ERPS systemet er det brukt pulsbasert solid state-radar (Ward *et al.*, 2014; IALA, 2022). Rapporten fra testen utenfor England forteller at det i et ERPS system bør brukes NT solid state-radarer, og ikke konvensjonelle magnetron radarer. Dette begrunnes med de fordelene solid state-radarer gir når det angår ytelse, allsidighet og redusert vedlikehold. Rapporten forteller også at det i utgangspunktet er teknisk mulig å oppgradere eksisterende magnetronbaserte radarer, men at det likevel kan vise seg å være utfordrende grunnet alderen til utstyret på noen fartøy. Den sistnevnte løsningen kan også være upraktisk når det gjelder administrative og politiske angående (Ward *et al.*, 2014).

Når det gjelder bruk av FMCW radar som en e-radar skriver IALA at virkemåten til racon i dette tilfellet må endres (IALA, 2011). FMCW radarer er ikke i stand til å kommunisere med racon som trigges av radarpulser.

### 2.7.3 E-racon

E-racon er i utgangspunktet vanlige racon der svarpulsen inneholder informasjon om enhetens absolute posisjon. Posisjonsinformasjonen modelleres på den første streken i raconens morsekode ved hjelp av Frequency Shift Keying (FSK) modulasjon. Dette er illustrert under i Figur 15. En identifikasjonskode for hver e-racon modelleres også på raconens svarpuls. Informasjon om e-raconens lengde- og breddegrad, samt høyde over havet, er statiske parametere i e-raconens konfigurasjon. E-racon må derfor plasseres på faste steder, og kan ikke plasseres på eksempelvis flytende bøyer. E-racon vil også være kompatibel med vanlige maritime skipsradarer, da e-racon vil dukke opp på radarskjermen som vanlige racon (IALA, 2022).



Figur 15 E-racon oppbygning. Blå bakgrunn indikerer tilleggskomponent til vanlig racon. Egen figur med data fra (Ward et al., 2014)

Figur 15 over indikerer at den grunnleggende forskjellen mellom en vanlig racon og en e-racon er at lengde- og breddegrad til e-raconen modelleres som informasjon på raconens svarsignal. Modulasjonen gjøres ved FSK modulasjon.

Ny teknologi gjør at det nå foregår en overgang fra tradisjonell magnetronbasert radar til solid state NT radar om bord på skip. Da IMO i 2008 fjernet kravet for at S-band radarer skal kunne trigge racon åpnet dette muligheten for en overgang til solid state S-band radarer. Samtidig er det også et ønske i den maritime næringen om å gå over til solid state X-band radarer. Siden solid state-radarer sender ut modulerte pulser med en lavere peak-effekt kan dette føre til at de ikke er i stand til å trigge racon. Dette medfører en usikkerhet for bruken av racon i fremtiden (IALA, 2011). IMO fortsetter å anerkjenne racon som et viktig navigasjonshjelpemiddel. I den anledning har IALA publisert en strategi for å opprettholde fremtidige racon-tjenester. Denne strategien presenterer seks ulike alternativ (IALA, 2011):

#### 1. Bruke eksisterende racon

Pulsbaserte solid state-radarer kan i prinsippet trigge eksisterende racon dersom visse begrensninger blir lagt på radardesignet. Slike begrensninger kan være uakseptable for radarprodusenter. Rekkevidden som solid state-radarer kan trigge racon på vil avhenge av pulsens peak-effekt. Dersom solid state-radarene (i tillegg til å sende modellerte pulser) sender ut en puls som er kompatibel til å trigge racon, og at de har algoritmer som gjør at de kan prosessere og tolke raconsignalene, kan dette være en løsning.

#### 2. Forbedre eksisterende racon

I denne løsningen byttes dagens racon ut med nye racon med endret design slik at de kan bli trigget av radarer på lengre avstand. Dette kan gjøres ved



blant annet å øke sensitiviteten i mottakeren. En konsekvens er at alle eksisterende racon må byttes ut.

### 3. Bruke nye e-racon

Her benyttes e-racon som beskrevet over.

### 4. Bruke nye universelle racon

I dette alternativet byttes eksisterende racon ut med nye universelle racon som er kompatible med alle typer konvensjonelle og NT radarer. Dette alternativet er teknisk mulig, men det vil være utfordrende med dagens teknologi. Denne løsningen kan være problematisk siden hver racon vil bruke mer strøm.

### 5. Bruke nye racon som ikke er radarbasert

Dersom de overnevnte alternativene viser seg å være for teknisk, politisk eller økonomisk utfordrende kan Automatic Identification System (AIS) baserte racon brukes. Dette alternativet har to negative sider: AIS er avhengig av GNSS posisjon og timing, og kun et begrenset antall fartøy har utstyr som kan vise AIS navigasjonshjelpemidler.

Strategien som IALA presenterer er delt i tre deler. Først legges det vekt på å vurdere alternativ 2 ved planlegging av bytte eller oppgradering av eksisterende racon på kort sikt. Dette vil gi en økt rekkevidde med solid state-radarer. Deretter oppfordres IALA medlemmer til å støtte og vurdere resultatene fra tester med e-racon, samt å utforske muligheten for å bruke universelle racon. På lengre sikt kan derfor alternativ 3, gjerne i kombinasjon med alternativ 4, anvendes. Til slutt oppfordres radarprodusenter til å sikre at NT radarer er i stand til å trigge racon på angitte rekkevidder, samt at raconprodusenter identifiserer mulige forbedringer til sine racon når det gjelder aktiviseringsrekkevidder.

Minimumskrav for rekkevidden til racon, uavhengig av radartype, er ifølge IALA sin strategi for å opprettholde fremtidige racon tjenester (IALA, 2011) 5 nm for flytende racon og 10 nm for faste racon. Disse rekkeviddene er basert på en racon høyde på 5 meter for flytende og 20 meter for faste racon. Dette stemmer overens med Figur 9. Her er effekten av multipath sett bort ifra.

#### 2.7.4 Standardiseringsutfordringer

I et fremtidig ERPS system vil det være nødvendig med internasjonale standarder for å sikre kompatibilitet mellom e-radar og e-racon (IALA, 2022). IALA har identifisert flere standardiseringsutfordringer for et ERPS system. Blant disse er (IALA, 2022):

- Bruk av hvert av radarbåndene X-band og/eller S-band må bekreftes.
- Standardisering av hvordan e-radar og e-racon kommuniserer med hverandre må komme på plass. Modulasjon på e-radar og e-racon signal, samt signalformat, må standardiseres.
- Kompatibilitet mellom e-racon og radarer som bruker tradisjonelle pulser, FMCW og puls kompresjon må sikres.
- Hver enkelt e-racon bør ha en unik identifikasjonskode slik at e-radaren vet hvilken e-racon den kommuniserer med.

Prosessen med å standardisere kommunikasjonen mellom e-radar og e-racon, utforme internasjonalt regelverk, og gjennomføre en overgang til NT solid state-radarer kan ta opp til minst 20 år (Ward *et al.*, 2014). I dette tilfellet brukes introduksjonen av ECDIS som tidsreferanse.

#### 2.7.5 ERPS tester

Som teoretisk grunnlag i denne bacheloroppgaven er det blant annet brukt oppsett og resultater fra to tester med ERPS systemer. Den ene testen er gjort av the General Lighthouse Authorities of the UK (GLA) utenfor østkysten av England i 2014 (Ward *et al.*, 2014). Den andre testen er gjort av Maritime and Port Authority of Singapore i Singapore i 2017 (IALA, 2022).

##### Testoppsett

I begge testene er det brukt racon produsert av Tideland Signal og X-band solid state-radar levert av Furuno. Solid state-radarene har i begge testene sendt ut umodulerte radarpulser som tradisjonelle racon kan trigges av. Signalformatet til racon som er brukt i testen fra Singapore er beskrevet i detalj av IALA (IALA, 2022).

En beskrivelse av oppbygningen til e-racon og e-radar brukt i testene er gitt i Figur 14 og Figur 15. Videre er en spesifisering på radaren og racon brukt i testen fra England gitt i Tabell 7 under (Ward *et al.*, 2014).

Tabell 7 Spesifikasjon på radar og racon brukt i ERPS test utenfor England (Ward et al., 2014)

Radar		Racon	
Del	Spesifikasjon	Del	Spesifikasjon
Plattform	X-band solid state (Prototype fra Furuno)	Plattform	Seabeacon 2 System 6 (Tideland Signal)
Utsendt effekt	150 W	Utsendt effekt	1 W
Frekvens	9 350 MHz	Modulasjonsprinsipp	FSK
Pulslengde	0,3 $\mu$ s	Senterfrekvens	Samme som mottatt radar frekvens
Pulsrepetisjonsfrekvens	1 250 Hz	Maks frekvensavvik	15 MHz
Modulasjon	Umodulert	Symbollengde	200 ns
Antenne	4 fot, 27,5 dBi	Antenne	Rundtstrålende, 6 dBi
Antenne rotasjonshastighet	24 rpm	Av-/på periode	Alltid aktiv

### Testresultater

Resultatene fra de overnevnte testene når det angår rekkevidde, horisontal feil og tilgjengelighet er presentert under i Tabell 8 og Tabell 9. Testene er noe forskjellige. Horisontal feil fra ERPS posisjoneringsen er i begge testene beregnet i forhold til GNSS posisjon til fartøyet.

Under testen fra Singapore ble det samlet inn resultater i tre faser; til kai, statisk (i ro på sjøen), og dynamisk (i bevegelse). Denne testen oppgir ikke avstand til e-racon. Her var det plassert ut tre e-racon med en innbyrdes avstand på maks 4,5 nm (Furuno Electric, 2017).

Fra testen utenfor England er det bare presentert resultater under statisk testing. Her er avstand til e-racon oppgitt. Det var plassert ut to e-racon med en innbyrdes avstand på 10 nm. Testen ble utført på opptil 10 nm ut fra kysten.

Tabell 8 Testresultat fra ERPS test i Singapore, 2017, (IALA, 2022)

Singapore, 2017	En e-racon		To e-racon	
	Horisontal feil [meter]	Tilgjengelighet [%]	Horisontal feil [meter]	Tilgjengelighet [%]
Til kai	38,6 m	87,3 %	2,5 m	62,7 %
Statisk	37,5 m	86,7 %	11,9 m	61,9 %
Dynamisk	30,3 m	87,4 %	26,2 m	64,0 %

Tabell 9 Testresultat fra ERPS test i England, 2014, (Ward et al., 2014)

England, 2014		Horisontal feil [meter] (95 % / $2\sigma$ )	Tilgjengelighet [%]
Antall e-racon	Avstand til e-racon [nm]		
En e-racon	12,1 nm	104 m	87 %
En e-racon	4,9 nm	41 m	98 %
To e-racon	12,1 nm & 4,9 nm	2,2 m	87 %

### 3 Metode

I denne oppgaven valgte studentene å gjennomføre kvalitative intervjuer, feltarbeid, forsøk på navigasjonslab og datainnsamling via akademiske databaser og rapporter. Intervjuene ble gjennomført semistrukturert da dette ga strukturen og fleksibiliteten til å besvare forskningsspørsmålene på en god måte. Samtidig som feltarbeid og forsøk i navigasjonslab bygget under den teoretiske begrunnelsen for behov og nytten av ERPS. Datainnsamling via akademiske databaser og rapporter ga teoretisk grunnlag for oppgaven. Disse metodene blir beskrevet nærmere i egne delkapittel.

#### 3.1 Datainnsamling til teoretisk grunnlag

For å besvare forskningsspørsmålet; «hvordan fungerer systemet?» var det nødvendig å innhente informasjon via databaser og rapporter. Dette for å skape et teoretisk grunnlag og en forståelse for systemet.

Ved innsamling av data fra vitenskapelige databaser ble blant annet disse søkeordene brukt, med tilsvarende antall treff:

Tabell 10 Antall treff per søkeord i vitenskapelige databaser

Database	Søkeord	Antall treff
Google Scholar	GNSS threats	20 400
	GNSS vulnerabilities	20 200
	Radar system radio detection	602 000
	Maritime racon	7 110
Oria	Maritime racon	10
Forsvarets forskningsinstitutt	e-navigasjon	4
	ERPS	0
	Enhanced Radar Positioning Systems	0
	Racon	0

Det ble besluttet å bruke Google Scholar og Oria for å få tak i vitenskapelige artikler knyttet til temaene som skulle belyses i oppgaven. Oppgaven har også bakgrunn fra tidligere tester

og rapporter, derfor vil en stor del av informasjonsinnhenting være fra tester, forsøk og rapporter. Formålet med oppgaven er heller ikke å forske på nye løsninger, men å belyse et eksisterende problem og gå i dybden på en foreslått løsning. Det ble også søkt systematisk på søkemotorer og lett etter informasjon og publikasjoner fra blant annet IMO, IALA og andre relevante kilder.

## **3.2 Intervju**

For å kunne gjøre en god drøfting og svare på forskningsspørsmålene om «hva er nytten av systemet» og «hvor langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim det er særlig behov for systemet», var det nødvendig å innhente relevante kvalitative data. De mest brukte metodene for innsamling av kvalitative data er intervjuer og observasjoner (Larsen, 2017).

Avveiningene som ble tatt for oppgaven var hvilke personer som best kunne besvare spørsmålene studentene ønsket å belyse, og hvilke forskningsspørsmål som kunne forventes å få svar på. Det var også viktig å begrense hva som var ønskelig å gå i dybden på, og hva som kunne besvares mer teknisk.

### **3.2.1 Semistrukturert intervju**

Ved semistrukturerte intervju brukes det en fleksibel intervjuguide. Denne inneholder ferdig formulerte spørsmål, men er fleksibel på rekkefølgen (Larsen, 2017). Det er også åpent for å stille oppfølgingsspørsmål for å få informanten til å utdype eller være mer konkret.

Da det ble gjennomført semistrukturert intervju fikk deltakerne større rom til å snakke fritt. Det ga også grunnlag for et videre omfang angående oppfølgingsspørsmål. Dette åpner for tanker og innspill som studentene selv ikke har tenkt på, og som kan være relevant. Dette er fordi deltakerne har lengre erfaring med dagens navigasjonssystemer, og dermed er det vanskelig for studentene å formulere spørsmål som dekker alle innfallsvinkler. Samtidig er det fordelaktig å ha noe struktur i intervjuet. Dette for å dele intervjuet opp i ulike hovedtemaer, samt for å holde en rød tråd gjennom intervjuet og sikre at alle spørsmålene ble stilt til alle informantene.

Lydopptak av intervjuene ble tatt for å kunne transkribere og analysere intervjuene senere.

### **3.2.2 Søknad til NSD og samtykkeskjema**

Før man går i gang med selve datainnsamlingen og intervjuene er det nødvendig å gjøre forberedelser (Larsen, 2017). Blant disse inngår å søke til Norsk senter for forskningsdata (NSD) for tillatelse til å gjøre undersøkelsen. Ved innhenting av sensitive data og/eller personopplysninger trengs det en slik tillatelse. Personopplysningene som var ønsket i oppgaven er alder, relevant erfaring og arbeidstittel. Den godkjente søknaden ligger under vedlegg I.

I noen tilfeller vil det også være nødvendig å innhente samtykke for å gjøre datainnsamlingen. Samtykkeskjema for deltakelse i intervju i denne oppgaven ligger under vedlegg III. Dette inneholder informasjon om hva det innebærer, at det er frivillig å delta, og informasjon om personvern og personopplysninger. Skjemaet ble brukt til å informere intervjuobjektene, samt å hente samtykke til lydopptak ved underskrift.

### **3.2.3 Intervjuguide**

For å sikre at det blir samlet inn data som i best mulig grad svarer på problemstillingen og de aktuelle forskningsspørsmål ble det utformet en intervjuguide. Denne er delt inn i tre hovedtemaer. Dette for å først samle data om informantens opplevelse og tanker om dagens navigasjonssystemer, deretter om radar, for så å hente informasjon om intervjuobjektets mening om det er behov for ERPS. Intervjuguiden ligger vedlagt i vedlegg II.

Intervjuguiden ble brukt til å holde en rød tråd gjennom intervjuene. Det var også åpent for å stille oppfølgingsspørsmål. Hovedspørsmålene i intervjuguiden ble med hensikt laget som åpne spørsmål. Dette for å sikre at de synspunktene hver informant mener er viktige kommer frem ved å la hen snakke fritt rundt spørsmålet. Åpne spørsmål åpner også opp for at det kan komme frem synspunkter og momenter som intervjuerne ikke har tanker om på forhånd. Det var ønskelig å unngå å stille ledende hovedspørsmål. Dette for å unngå at måten spørsmålet er formulert på ikke skal påvirke informantens svar (Larsen, 2017). Derimot var underspørsmålene mer lukket, dette for å få svar på spesifikke deler, dersom de ikke ble nevnt.

Innholdet i intervjuguiden har også noe innledende informasjon om ERPS. Siden dette er et nytt system som kan være ukjent for mange var det fordelaktig å inkludere en beskrivelse av systemet. Intervjuguide og samtykkeskjema ble sendt til hver informant på forhånd slik at hen kunne forberede seg på intervjuet i forkant.

### **3.2.4 Valg av informanter**

Skjønnsmessig valg av informanter ble gjort tidlig i planleggingsprosessen. Ved skjønnsmessig utvelgning velger forskerne selv ut informanter basert på hvem de mener kan være kvalifisert og egnet til å svare på problemstillingen (Larsen, 2017). Informantene kan plukkes ut etter ulike kriterier som kjønn, alder, utdanning, erfaring, geografisk bosted osv.

For denne oppgaven mente studentene at det var hensiktsmessig å velge ut informanter som har erfaring med kystnavigasjon og som er kjent langs norskekysten. Det ble derfor bestemt å intervjuer både seilende navigatører og losere. Å ha navigatører som informanter ble valgt fordi disse kan representere navigatører på kysten på et generelt grunnlag. Videre ble losere valgt da de gjerne har mer spisskompetanse og erfaring i spesifikke områder langs kysten. Losere kommer også i kontakt med andre navigatører gjennom sitt yrke. De kan dermed uttrykke sin oppfatning av andre navigatører når det gjelder bruken og avhengigheten av GNSS, og om de mener det er behov for ERPS blant andre navigatører.

Det ble gjennomført syv intervjuer, der intervjuobjektene hadde spredt erfaring. Dette styrker svarene da det kan være forskjellige prosedyrer og holdninger til navigasjonsinstrumenter. Det ble besluttet å stoppe på syv intervjuer, da studentene mente bredden av erfaringer og bakgrunnskunnskaper ga et godt grunnlag til å besvare de forskningsspørsmålene som var ment å besvares gjennom intervjuer. Flere intervjuer kunne gå over til mer bekreftelse av det som har kommet frem fra tidligere intervjuer, og dermed ikke noe nytt.

## **3.3 Case Ålesund til Trondheim**

Oppgaven ble begrenset til området langs hovedleden mellom Ålesund og Trondheim. For å besvare forskningsspørsmålet; «hvor mange e-racon trengs langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim?» gjennomførte studentene et forsøk på navigasjonslab og en feltundersøkelse for området. Dette ut fra et ønske om å skape et bilde av hvor omfattende det vil være å implementere ERPS langs norskekysten.

### **3.3.1 Navigasjonslab**

Til forsøket på navigasjonslab ble testoppsettene og resultatene fra Singapore og England presentert i kapittel 2.7.5 anvendt. For å gjennomføre denne planleggingen var det nødvendig å definere noen betingelser og krav for valg av plassering til e-racon. Forsøket gikk derfor ut ifra samme avstander og antall e-racon som ble brukt i testene. Disse kravene



er presentert i Tabell 11 i kapittel 4.2.1. Dermed kunne resultatene fra denne oppgaven si noe om nøyaktigheten og tilgjengeligheten til det tenkte planlagte systemet i kapittel 4.2.

Erfaringer og bekjentskap fra navigasjonslab kom til nytte som teoretisk grunnlag under feltundersøkelsene.

### **3.3.2 Feltundersøkelse**

Grunnet at denne oppgaven tar for seg ERPS som et system i et begrenset område langs norskekysten, var det et behov for å gjøre seg kjent med området. Det ble derfor gjennomført feltundersøkelser på strekningen mellom Ålesund og Trondheim.

Observasjon kan brukes som en metode til å samle data (Larsen, 2017), og handler om å gjøre systematiske iakttagelser hovedsakelig ved hjelp av det man observerer. Disse iakttagelsene brukes deretter som grunnlag til videre analyse og tolkning av det en ønsker å finne svar på. Feltundersøkelse er en mye brukt metode for samfunnsvitenskapelig forskning. Her «observerer forskeren de fenomener hun/han er interessert i, i sin naturlige sosiale sammenheng» (Larsen, 2017, s. 104).

Det ble gjennomført to feltundersøkelser til denne oppgaven:

- Deltakelse på nordgående seilas fra Ålesund gjennom Hustadvika.
  - Her deltok en representant fra bachelorgruppen i forbindelse med jobb utenom studiet.
  - Formålet og utbyttet fra denne seilasen relatert til oppgaven var å bli kjent med radarlandet og dokumentere dette med bilder av radarskjermen.
- Deltakelse på sørgående seilas fra Trondheim til Ålesund.
  - Her deltok alle gruppens tre medlemmer på seilasen med et forskningsskip, i anledning at fartøyet skulle fra Trondheim til Ålesund.
  - Formålet ved denne feltundersøkelsen var å gjennomføre visuell observasjon av og bli kjent med radarlandskapet på strekningen, da med særlig fokus på Hustadvika. Dette dokumentert med bilder. Videre var det ønskelig å sjekke hvilke racon som kunne observeres på radarskjermen. Dette for å sjekke

rekkevidden opp mot IMO-krav. Det var også ønskelig å observere racon for å få en bedre forståelse for bruken av disse til navigasjon.

Studentene fikk på forhånd informasjon om at noen racon tidvis er ute av drift. Derfor ønsket de å sjekke opp hvilke racon de kunne observere som operative på seilassen, og hvilke som var ute av drift. Dette for å dokumentere hvordan systemet fungerer i praksis. Samtidig var det lærerikt for deltakerne å observere systemet. Erfaringene og dokumenteringen av deteksjonsavstand til de aktuelle racon ble ansett som nyttig informasjon til egen planlegging av e-racon på strekningen.

For å sikre at den ønskede informasjonen fra feltundersøkelsen på sørgående seilas fra Trondheim til Ålesund ble observert og dokumentert, ble det laget en plan i form av et observasjonsskjema. Her ble det bestemt på forhånd hva man ønsket å se etter, og hvordan det skulle dokumenteres. Denne observasjonsplanen ligger under vedlegg V.

### **3.4 Styrker og svakheter**

Det er viktig å bemerke at oppgaven ikke er vitenskapelig vurdert og at det ikke er drevet noen spesiell form for forskning. Dette kan være en svakhet ved oppgaven da oppgaven er avhengig av informasjon fra eksterne kilder.

Andre svakheter med oppgaven er at ERPS er en ny teknologi som er i forskningsstadiet. Dermed er det ikke mye tilgjengelig informasjon fra forskning og forsøk. Under skrivingen av oppgaven var det bare gjennomført to feltforsøk av systemet, med noe varierende resultater. Mangel på flere feltforsøk blir til en svakhet da man ikke vet hvilken av de som er mest reel for systemet. Det er heller ikke gjennomført tester av systemet i Norge, eller egne fysiske feltforsøk. Dette kunne belyst hvordan systemet ville fungert under norske forhold, med tanke på klima og kystens utforming.

Oppgaven er begrenset til hovedleden mellom Ålesund og Trondheim. Dette er en liten del av norskekysten, dermed kan det antas at andre områder er mer utfordrende for systemet. Grunlaget for den tenkte plasseringen av systemet baseres på testoppsettene og resultatene fra de to tidligere testene. Det er heller ikke utviklet retningslinjer og regelverk for hvordan systemet skal bli satt opp. Dette er en svakhet da det kan være andre forhold som dermed ikke blir tatt med.

Implementeringen av ERPS er en omfattende prosess med regelverk, byråkrati og økonomi som denne oppgaven ikke utreder. Dermed kan det være andre vinklinger som vil gjøre det utfordrende å ta i bruk systemet.

Det kunne med fordel vært intervjuet objekter med akademisk bakgrunn, utenlandske fartøy og flere næringer. Denne informasjonen ville gitt en økt forståelse og andre tilnærminger til systemet.

En styrke med denne oppgaven er at den tar for seg en teknologi som er lite forsket på. Dette viser nytenking og åpner opp for videre undersøkelser, samt at det samler mye av informasjon om ERPS systemet. Oppgaven baserer seg også på intervju av relevante intervjuobjekter, som da er navigatører og losere. Dette er med på å styrke oppgaven da det gir et godt grunnlag for dagens navigasjonssituasjon.

Studentene har også vist engasjement for å gi mest mulig informasjon og kjennskap til området som oppgaven tar for seg gjennom feltundersøkelser og forsøk på navigasjonslab. Dette viser at studentene ønsker å ha kunnskap om området, og at det ikke kun baserer seg på antakelser og informasjonsinnhenting via eksterne kilder.

## 4 Resultater

Presentert under er resultatene fra casen med antall racon fra Ålesund til Trondheim, fra intervjuene og fra ekspedisjonene på ruten mellom Ålesund og Trondheim.

### 4.1 Intervjuer

I perioden 25.02.2023 til 03.03.2023 ble det gjennomført totalt syv intervjuer av navigatører og losere angående ERPS. Intervjuene var et semistrukturert intervju, og tok utgangspunkt i intervjuguiden presentert i vedlegg II.

Intervjuobjektene bestod av fire navigatører og tre losere i alderen 30 til 65 år. De hadde arbeidsstilling som navigasjonsoffiser, overstyrmann, kaptein og los på aktuelt intervjutidspunkt. Navigatørene arbeidet om bord på forskningsskip og på passasjerskip. Losene hadde 23 til 30 års erfaring som los. Annen tidligere erfaring hos intervjuobjektene er blant annet fra kystvakten og marinen, offshore, lasteskip og ferge.

Sammendrag av hvert intervju ligger vedlagt vedlegg i IV.

#### 4.1.1 Hovedfunn intervjuer

I intervjuguiden var det tre hovedspørsmål som ble lagt mest vekt på; 1) «Hva tenker du om dagens navigasjonssystemer?», 2) «Hva synes du om radar?» Og 3) «Tenker du at vi har et behov for ERPS?»

- 1) Det kom frem i intervjuene at deltakerne mente dagens navigasjonssystemer fungerte i en tilstrekkelig grad slik de ble brukt. Der de mente å kunne stole på informasjonen som ble presentert fra ECDIS, radar, GNSS og optisk. Deltakerne rettet fokus mot å ha et klart skille mellom det som er primærnavigasjon og sekundærnavigasjon. Der primærnavigasjon inneholder; radar og optisk informasjon, og sekundærnavigasjon inneholder; ECDIS og GNSS informasjon. Selv om deltakerne mente å kunne stole på informasjonen som kom fra ECDIS og GNSS, var de påpasselige med å bemerke at det kunne oppstå feil og at man dermed kun burde benytte det til å forsterke informasjonen fra primærnavigeringen.
- 2) Radar kom frem som et verktøy samtlige av deltakerne både brukte mye og hadde tillit til. Det ble lagt frem som både pålitelig, nøyaktig og til tider det beste verktøyet en navigatør kunne ha. En av intervjuobjektene mente følgende om radar:

«Veldig viktig verktøy, for å kunne verifisere seilassen min. Det er viktig å forstå radaren, skjønne om du kan stole på den eller ikke. Men når du vet hva han kan og du vet at du bruker han rett så syntes jeg det er det mest nyttige verktøyet innenfor navigasjon som navigatøren kan ha. I tillegg til kikkert.»

Radaren viser seg som et viktig verktøy til navigering, for noen på lik linje med optisk. Det ble også lagt press på at radaren kan ha sine svakheter. Der den ved feil innstilling eller bruk kan fjerne informasjon som ville vært viktig for seilassen. Samt over tid og med mye bruk, kunne den bli noe mer unøyaktig i informasjonen den utgir.

- 3) Den generelle oppfattelsen til intervjuobjektene var at det er et behov for et sekundært posisjoneringssystem, men kanskje ikke for ERPS. Behovet kommer fra den avhengigheten dagens navigatører har til informasjon som kommer fra GNSS, og truslene med at det bare er et system innenfor dagens posisjonering. Argumentene imot ERPS var at det ikke oppfyller kravene til PNT og dermed ikke kan erstatte rollen til GNSS, der posisjonen fra ERPS ikke er nøyaktig nok. Dessuten ville den korte rekkevidden til en e-racon og nødvendigheten til mer enn to for å få en omtrentlig nok posisjon, ført til et behov for mange e-racon for å dekke hele norskekysten. Bruken av ERPS som en sikkerhet til informasjonen som kommer fra GNSS fant flere nytten av. Samtlige var enige i at det er bedre med en omtrentlig posisjon enn ingen posisjon eller feil posisjon.

Som et av forskningsspørsmålene til oppgaven ønsket studentene å utrede hvor langs hovedleden mellom Ålesund og Trondheim det kunne være særlig behov for et system som ERPS. På den begrensede strekningen kom Hustadvika frem i flere intervjuer som ett område der det ville vært kritisk å ikke ha pålitelig posisjon, dermed ett område som ERPS kunne vært utplassert for å skape redundans til posisjoneringen på dette området.

## 4.2 Case Ålesund – Trondheim

For å se hvordan systemet kunne blitt bygget opp i Norge, ble fokuset i oppgaven begrenset til hovedleden mellom Ålesund og Trondheim. Strekningen ble valgt på bakgrunn av sitt mangfold i variasjon under en eventuell seilas, der ruten går både inneskjærs og utenskjærs, samt variasjon i radarlandet gjennom seilasen.

Det ble gjennomført en planlegging av et tenkt system med e-racon på strekningen. Dette for å skape et bilde av omfanget til systemet, og besvare forskningsspørsmålet om antall e-racon på strekningen.

### 4.2.1 Krav ved utplassering av racon

For å gjennomføre arbeidet med å planlegge plassering og antall e-racon på strekningen fra Ålesund til Trondheim var det nødvendig å definere noen betingelser og krav for valg av plassering. Kravene kommer frem i Tabell 11 under. Kravene som angår maksimal avstand mellom e-racon, og mellom e-racon og fartøy, er satt tilsvarende testene i Singapore og England slik de var satt opp og utført. Dette er gjort for at ytelsen til systemet fra testene også skal gjelde for det systemet planlagt i oppgaven.

Kravet som angår geometri, er satt på grunnlag av teorien om DOP ved kryssende stedlinjer. Det er også prioritert lokasjoner der det allerede eksisterer strømtilførsel. Lokasjoner som er høyt over havet er også prioritert for å maksimere rekkevidde til e-racon.

Tabell 11 Krav for utplassering av e-racon

Parameter	Krav
Avstand mellom e-racon	Maks 10 nm
Maksimal avstand fra fartøy til e-racon	Alltid to e-racon inn forbi 12,1 nm fra fartøy
Geometri	Unngå stedlinjer med skjæringsvinkel mindre enn 30 grader
Bruke eksisterende fyr/racon/lykter/steder tilgjengelig for strøm	Prioritet
Høyde	Prioriter lokasjoner høyt over havet

#### 4.2.2 Plassering av e-racon tabellform

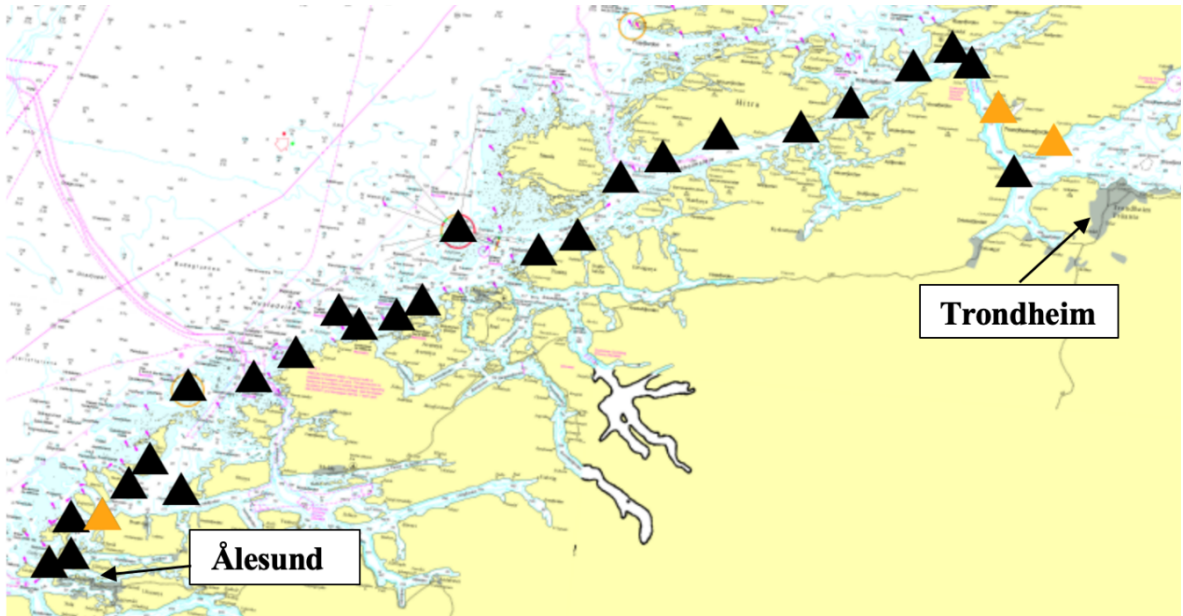
For de e-racon som ikke ble plassert på eksisterende fyr/racon/lykter/steder blir det lagt ved posisjon.

Tabell 12 Tabellisert plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim

Nummer	Navn	Bredde-grad	Lengde-grad	Avstand til neste e-racon	Kommentar
1.	Havstein			2,72 nm	Fyrlykt
2.	Oksebåsen			4,31 nm	Myrlykt
3.	Roald molo			3,72 nm	Molo
4.	Lepsøyrevet bro	Nord: 62° 35,611'	Øst: 006° 15,624'	4,68 nm	Ikke eksisterende sjømerke. Bro.
5.	Rogne molo			6,16 nm	Molo
6.	Drønnesundvågen			5,05 nm	Fyrlykt
7.	Østre Vågholmen			9,68 nm	Fyrlykt
8.	Ona			7,68 nm	Fyrlykt / racon
9.	Bjørnsund			5,82 nm	Fyrlykt / racon
10.	Vikan			6,05 nm	Fyrlykt
11.	Fuglen			2,88 nm	Fyrlykt / racon
12.	Kvitholmen			4,55 nm	Fyrlykt / racon
13.	Litlesandøya			3,47 nm	Fyrlykt / racon
14.	Hestskjæret			9,67 nm	Fyrlykt / racon
15.	Grip			9,65 nm	Fyrlykt / racon
16.	Hamarsundet			4,88 nm	Fyrlykt
17.	Sandvikbåen			8,45 nm	Lykt
18.	Remmingskjæret			5,48 nm	Fyrlykt
19.	Værøyen			7,38 nm	Fyrlykt
20.	Supoddan			9,28 nm	Lykt
21.	Terningen			6,42 nm	Fyrlykt
22.	Storaflu			8,45 nm	Lykt
23.	Smellingen			5,01 nm	Lykt
24.	Hovdtåa			2,87 nm	Lykt
25.	Ringflua			6,20 nm	Fyrlykt
26.	Fosen Yard	Nord: 63° 33,807'	Øst: 009° 53,423'	7,60 nm	Ikke eksisterende sjømerke. Skipsverft.
27.	Geitaneset			5,95 nm	Fyrlykt
28.	Rørvik ferjekai	Nord: 63° 30,582'	Øst: 010° 08,473'	Siste e-racon	Ikke eksisterende sjømerke. Ferjekai.

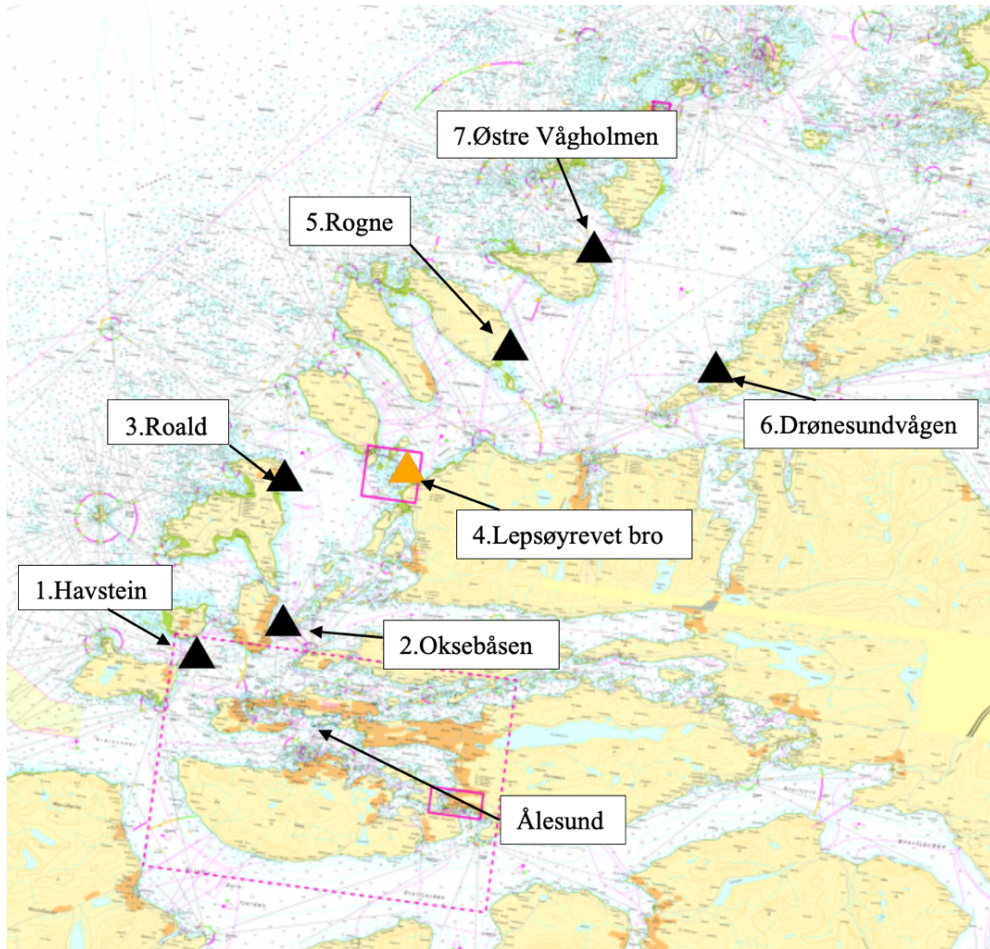
### 4.2.3 Plassering av e-racon kartform

Presentasjonen av plasseringen av e-racon mellom Ålesund og Trondheim vil først være et oversiktsbilde i Figur 16, før seilassen blir delt opp og e-racon blir navngitt i Figur 17 til Figur 20. De e-racon som er merket med oransje er plassert på steder uten eksisterende sjømerker pr. 09.03.23.

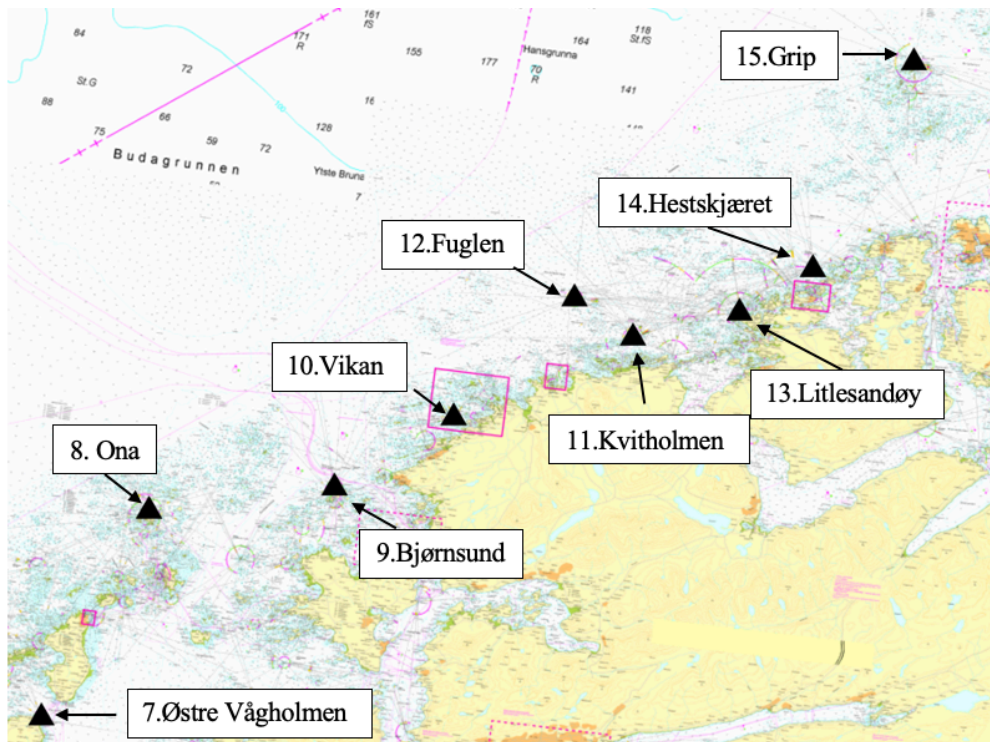


Figur 16 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no

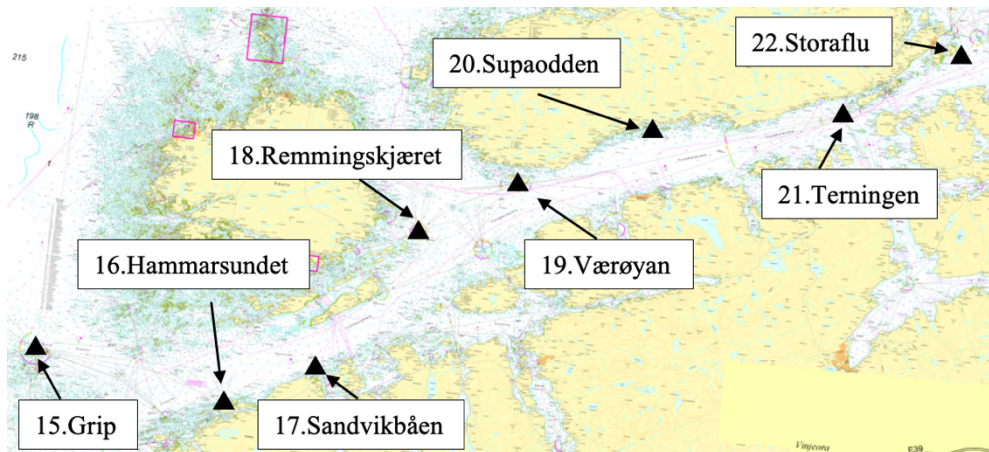




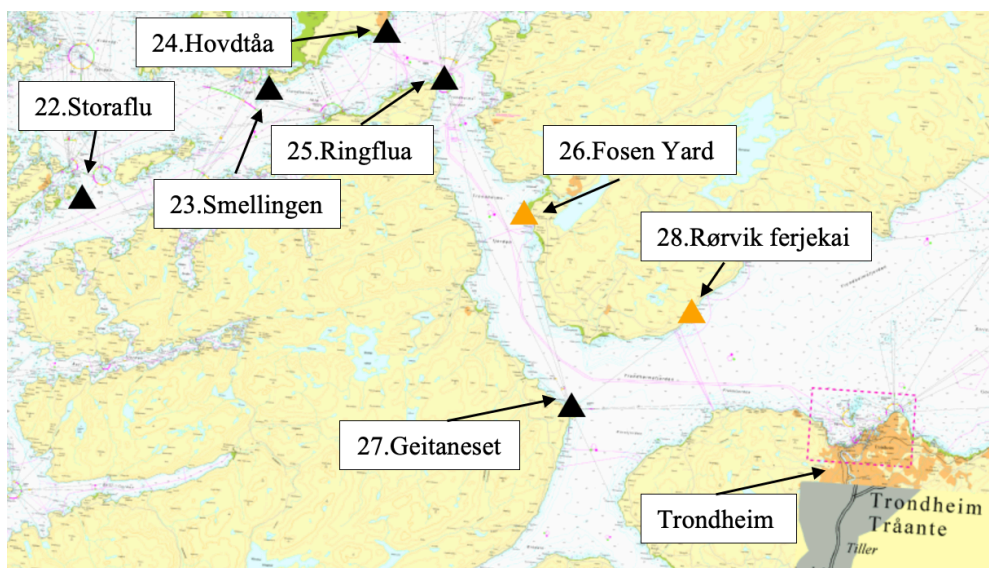
Figur 17 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 1. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no



Figur 18 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 2. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no



Figur 19 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 3. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no



Figur 20 Plassering av e-racon mellom Ålesund og Trondheim del 4. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no

### **4.3 Presentasjon av resultat etter ekspedisjon mellom Ålesund og Trondheim**

For å øke forståelsen av området for oppgaven og for å selv se hvor langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim det ville vært særlig behov for et system som ERPS dro studentene på to ekspedisjoner. Den ene fra Trondheim til Ålesund og den andre fra Ålesund og gjennom Hustadvika, men da ikke inn til Trondheim. Gjennom de to ekspedisjonene fikk studentene se hvordan radarbildet, lateralmerker, fyrlykter og mer, bidrar til å bedre informasjonsinnhenting som er relevant for seilassen. Ut Trondheimsfjorden var det ikke noen større utfordringer ved å hente informasjon til seilassen, selv uten GNSS, det samme gjaldt ut fra Ålesund. Det ble observert at Hustadvika var et område som fort kunne bli problematisk dersom GNSS ble ustabil og sikten ble dårlig. Dette på bakgrunn av det dårlige radarlandet, som gjør det vanskelig å bekrefte posisjonen utfra radarbildet, samt de mange skjærene som ligger like under vannoverflaten. Området er derimot bra dekket av racon, som bidrar til situasjonsforståelsen underveis, men noen av de fungerte ikke. I Tabell 13 på neste side presenteres funnene av hvilke racon som ikke fungerte. Fotografi av radarbilde på nordgående og sørgående seilas er vist i neste delkapittel 4.3.2.

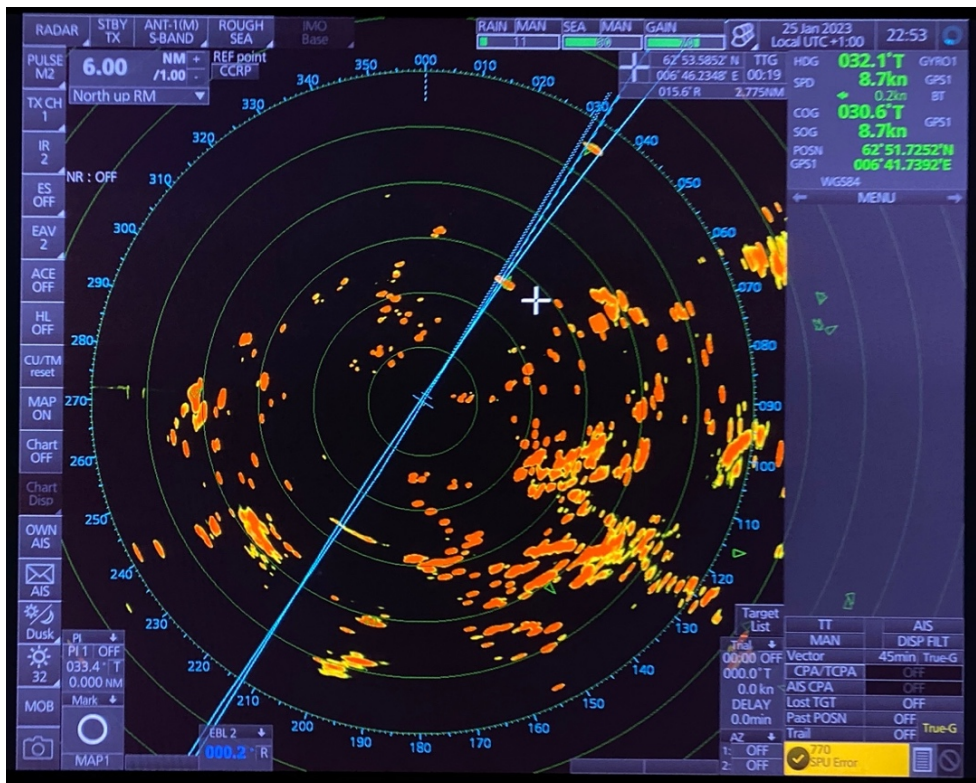
### 4.3.1 Observasjoner av racon mellom Trondheim og Ålesund

Tabell 13 Racon observert på seilas

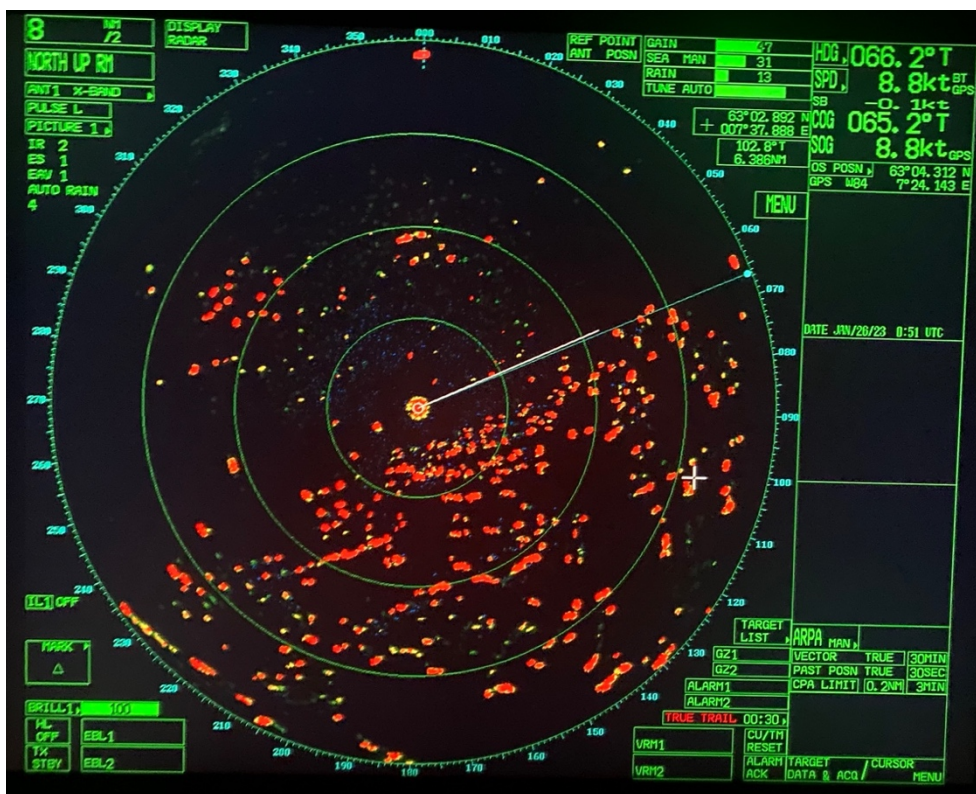
Nummer	Navn	Morsekode	Lyskarakter	Detektert på radar	Deteksjon avstand (nm)	Deteksjon peiling (grader)	Begrensninger
1.	Flesa	K	OC (3) 10s	JA	7,74	282,5	Land
2.	Haugjeglgå	B	OC (2) 8s	JA	16,43	299,2	Land
3.	Hilbåan	T	FI W 10s	JA	13,84	243,7	Land
4.	Grip	G	OC (2) 8s	JA	13,04	259,0	Land, avstand eller sen sjekk
5.	Hestskjæret	K	OC (2) 8s	JA	3,2	229,9	Land
6.	Litlsandøya	N	OC (3) 10s	NEI			
7.	Kvitholmen	O	OC 6s	JA	12,45	240,9	Land
8.	Fuglen	M	ISO 6s	JA	13,02	247,7	Avstand eller sen sjekk
9.	Lyroddan	T	Varde	JA	8,23	236,4	Land eller avstand
10.	Bjørnsund	B	OC (2) 8s	NEI			
11.	Ona	O	F W FI R 30s	JA	17,19	236,9	Avstand eller sen sjekk

### 4.3.2 Fotografi av radarbildet på Hustadvika

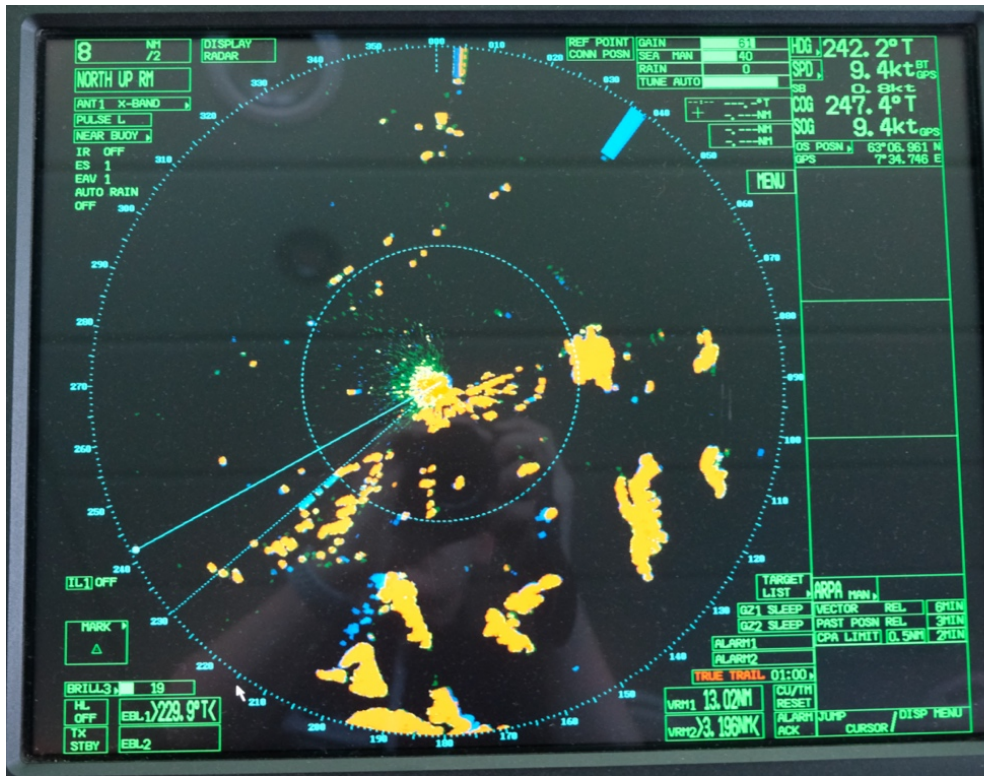
Observasjonene fra seilasene er presenter først nordover så sørover i Figur 21 til Figur 24.



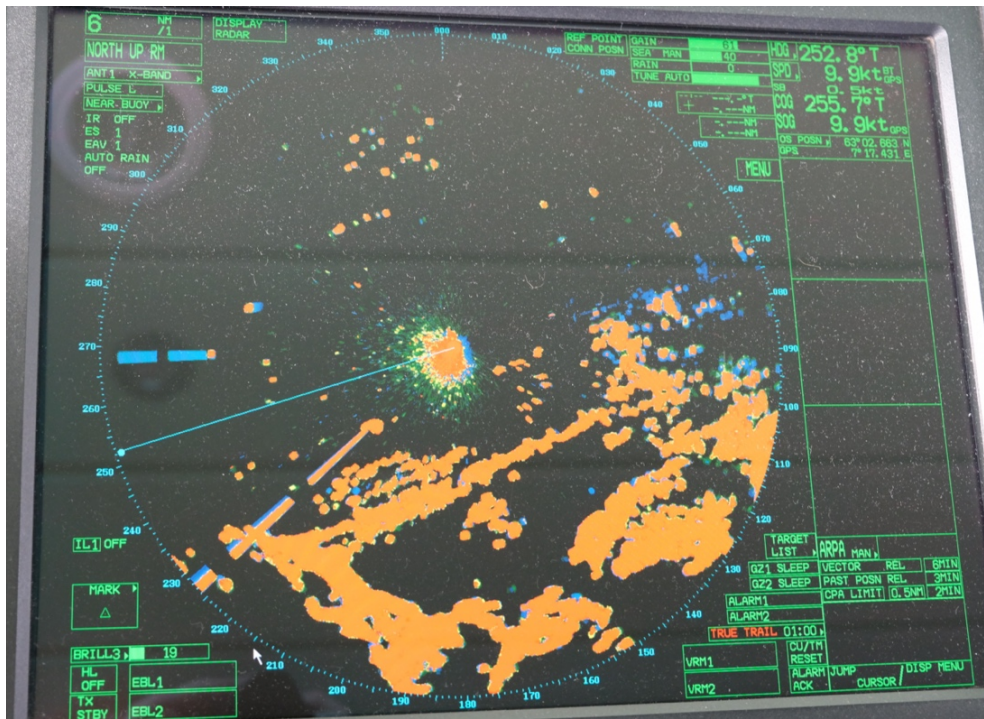
Figur 21 Seilas nord: Radarbilde start på Hustadvika S-band radar, ingen racon synlig.



Figur 22 Seilas nord: Radarbilde midt i Hustadvika, X-band radar, ingen racon er synlige.



Figur 23 Seilas sør: Radarbilde starten av Hustadvika fra Trondheim, X-band radar, synlige racon.



Figur 24 Seilas sør: Radarbilde noe midt i Hustadvika, X-band radar, synlige racon.

## 5 Drøfting

Den følgende drøftingen tar for seg oppgavens fire forskningsspørsmål i egne delkapitler.

### 5.1 Hvordan fungerer ERPS

ERPS er et radarsystem som skal gi en absolutt posisjonering ved hjelp av e-racon og e-radar. Hovedforskjellen fra vanlig racon og radar er at ERPS systemet modifierer signalene som brukes til kommunikasjon mellom disse to enhetene. En vanlig racon som blir trigget vil gi et svar i form av en morsekode. En e-racon vil i tillegg til morsekoden gi sin absolutte posisjon. Denne posisjonen blir modifisert i den første delen av morsekoden. Ved vanlig radar og racon bruk, kjenner man til peiling og avstand. Dette er noe brukeren må gjøre fysisk på radaren, for deretter å bruke informasjonen til å plote dette inn i kartmaskinen. ERPS systemet skal gjøre denne prosessen automatisk. Dette gjøres ved at e-radaren trigger e-racon, og e-racon sender ut sin identitet og posisjon. Når e-radaren får denne informasjonen beregnes fartøyets posisjon ut ifra posisjonen til e-racon og ved hjelp av peiling og avstand skal den da kunne kalkulere sin egen posisjon. Det er verdt å nevne at dette kan kalkuleres ved to forskjellige metoder. Det ene er ved kun én e-racon, og da trengs peiling, avstand og kurs til fartøyet. Den andre metoden er ved å ha to e-racon innenfor rekkevidde. Dette vil gi en krysspeiling som fører til en absolutt posisjon.

I denne oppgaven skal det undersøkes om ERPS kan være et sekundært navigasjonssystem i form av et supplement eller sikkerhetssystem med tanke på sikker elektronisk posisjonering. Derfor vil det være viktig å se på PNT kravene som er satt for GNSS, da dette per dags dato er det eneste elektroniske posisjoneringssystemet til trygg navigering. PNT kravene er gitt i Tabell 2 og resultatene av testene som er gjort i Singapore og England er i Tabell 8 og Tabell 9.

Første krav er at posisjonsbestemmelsen til systemet skal ha avvik under 10 m i 95 % av målingene. Fra testresultatene kan man se at avviket kun er under 10 m ved følgende situasjoner: Dette er mens fartøyet ligger til kai i Singapore med to tilgjengelige e-racon, og mens fartøyet er i ro ute på sjøen i England. Sistnevnte er med to tilgjengelige e-racon med avstand til e-racon på 12,1 og 4,9 nautiske mil.

Neste krav som er viktig å se på er tilgjengeligheten som skal ligge på over 99,8 %. Her er det ingen av testene som oppfyller kravet. Nærmest er testen i England hvor fartøyet ligger

i ro med én e-racon 4,9 nm unna. Ved å se på dette kan det per dags dato konstateres at ERPS systemet ikke fungerer godt nok til å være en erstatning til GNSS systemet. Dette vil si at dersom GNSS systemet skulle svikte eller på en eller annen måte bli forstyrret, er ikke ERPS et system som kan levere like god posisjonering innenfor navigering langs kysten.

Skal en se det opp mot dagens radar, som kun gir en omtrentlig posisjon, kan ERPS være et godt supplement eller en erstatning til tryggere navigering hvis GNSS systemet svikter. Da er det kun radar og visuell navigering som er tilgjengelig. Om en da erstatter eller supplerer med ERPS vil en ha et ekstra hjelpemiddel.

I løpet av intervjuene ble intervjuobjektene informert om at ERPS ikke dekker kravene til PNT. De mener da at brukerne må være informert om systemets begrensinger og at det gir en omtrentlig posisjon som kan inneholde avvik. Skal ERPS systemet erstatte dagens radarnavigasjon, vil dette føre til mer effektiv posisjonsangivelse der det er e-racon tilgjengelig. Dette er fordi kalkuleringen skjer automatisk. Spørsmålet man må stille seg der er om avvikene i posisjon med ERPS er større enn det man vil ha med vanlig konvensjonell radar. Dette er noe som kan være vanskelig å avgjøre, da det avhenger av radarlandet og om det vil bli plassert ut tilstrekkelig med e-racon langs kysten. Det kan tenkes at man ved å plassere ut flere vanlige racon langs kysten kan oppnå en bedre posisjon enn med ERPS, bare med mindre effektivitet. Det kommer fram i mange av intervjuene at vanlig konvensjonell radar fungerer godt nok, men også en generell oppfatning om at dagens navigatører stoler mye på GPS og derfor ikke bruker radar slik den skal bli brukt. Fra det resultatet kan en stille spørsmålet om ERPS vil føre til tryggere navigering. Dette forutsetter at navigatører bruker dette systemet mer aktivt enn hva som blir gjort med radar, samtidig som at de er klar over avvikene.

I forsøkene som har blitt gjennomført, ble det brukt solid state-radar, men pulsene var umodulerte slik at det skulle ligne en konvensjonell magnetron radar. Dette kan ta opp en diskusjon om det kan brukes konvensjonell magnetron radar til ERPS systemet. Det som skiller en magnetron radar og en e-radar i oppbygning er at en e-radar, i tillegg til radarens vanlige oppbygning, har en modulasjons- og posisjonsberegneende komponent. Dette vil si at en vanlig magnetron radar er nødt til å få supplerende komponenter for å kunne fungere i et ERPS system. Konklusjonen er at dette vil være krevende å oppnå, og dermed ikke anbefalt. Hvis en ser bort ifra tilleggskomponentene som trengs, kan det tenkes å være krevende siden magnetron og solid state-radarer bygger på to forskjellige måter å skape



radarpulser på. Det er også en vesentlig forskjell i energien som trengs for å lage disse radarpulsene.

Ved nye system vil det alltid være fordeler og ulemper, men noen av de større fordelene til en NT solid state-radar er ytelse, allsidighet og redusert vedlikehold. En solid state-radar kan variere radarpulsene, istedenfor å kun sende korte pulser med fast frekvens. Dette gir muligheter for å oppnå et mer detaljert og støyfritt radarbilde. Dette er på grunn av en lavere pulseffekt. Siden solid state-radar kan modifisere fase og frekvens på radarpulsen, vil man kunne detektere ekko innad i radarpulsen. Dette vil si at en kan detektere flere ekko med samme puls, samtidig som det blir mindre støy fra regn og bølger. Disse fordelene er med på å minske farene ved å ikke detektere små ekko på radaren, da det gir et bedre radarbilde. Samtidig vil det være redusert vedlikehold på radaren siden energien som trengs er vesentlig mindre, og da medfører mindre slitasje på selve systemet.

Det er forskjell på kompatibilitet mellom ERPS og vanlig radar/racon. En e-racon vil kunne kommunisere med en vanlig konvensjonell radar, men da ikke avgi lengde- og breddegrad. En e-radar derimot kan ha problemer med å trigge en vanlig racon. Dette er fordi den utstrålte effekten er for lav, eller at modulasjonen som blir brukt ikke er kompatibel med racon. Dette vil si at et komplett system med ERPS ikke vil fungere optimalt hvis det skal brukes av brukere med konvensjonell radar. Dermed er det nødt til å skje en koordinert overgang.

Det som kan være en mulighet her er å se på S-band radarene. IMO har fjernet kravet om at S-band skal trigge dagens racon, dermed åpner dette muligheten for å bruke solid state S-band radar. Hvis en da installerer e-racon langs kysten, vil de som har solid state S-band radar kunne bruke fordelene som ERPS systemet gir, samtidig som de kan bruke dagens racon med X-band radar. For brukere med konvensjonell magnetron radar, vil utbygging av e-racon medføre en større dekning av racon med morse, så selv om de ikke får brukt det fulle potensialet til ERPS, vil dekningen av faste holdepunkt være større. Dette kan være den beste løsningen per dags dato hvis ERPS systemet skulle innføres. ERPS er ikke godt nok til å kunne erstatte GNSS systemet, men derimot godt nok til å kunne brukes som et hjelpemiddel for sikring av seilassen.

Ulempen vil være kostnadene for å sette ut det gitte antallet e-racon, og hvor mange som faktisk vil ta det i bruk. Kostnad rundt vedlikehold av e-racon er også trukket fram i et intervju, der det i dag allerede er mye vedlikehold med dagens racon system. Det oppleves

også at mange racon ikke fungerer i dag, og det kan antas at dette også vil kunne bli et problem med e-racon. E-racon bruker også statiske parametere som lengde- og breddegrad, samt høyde over havet. Dette gjør at det ikke kan installeres på for eksempel flytende bøyer.

Fordelen er at det kan gjøre dårlig radarland mer synlig, men ulempen er at det kan bli krevende med tanke på geometrien, da det er nødt til å stå på land og i rekkevidde til en annen e-racon. Med en vanlig racon, hvor geometrien ikke har en så stor rolle, kan vanskelige områder enkelt merkes med en bøye hvor det er montert racon.

For at ERPS skal bli implementert gjenstår det en del utfordringer som må oppklares og standarder som må bestemmes. Dette gjelder blant annet om det skal brukes både X- og S-band solid state-radarer, eller om det kun skal brukes S-band som i eksempelet tidligere. Det må være en standardisert kommunikasjonsform mellom e-radar og e-racon. Dette gjelder moduleringen av signal, hvilke radarer som skal kunne kommunisere med e-racon og en standard som tar for seg hvordan e-radaren skal vite hvilken e-racon den kommuniserer med. Dette er problemer som kan ta lang tid å oppklare, samt å gjennomføre. Til sammenlikning med overgangen til ECDIS kan det ta minimum 20 år. Med det tidsperspektivet er ERPS systemet muligens ikke godt nok til å skulle implementeres som en erstatning for dagens konvensjonelle radar, men heller et supplement. Derimot kan det være interessant å innføre e-racon på vanskelige områder, som for eksempel Hustadvika, hvor brukere kan installere S-band solid state-radar for å kunne sikre posisjonen bedre. Altså ha flere hjelpemidler til å avdekke feil i posisjon.

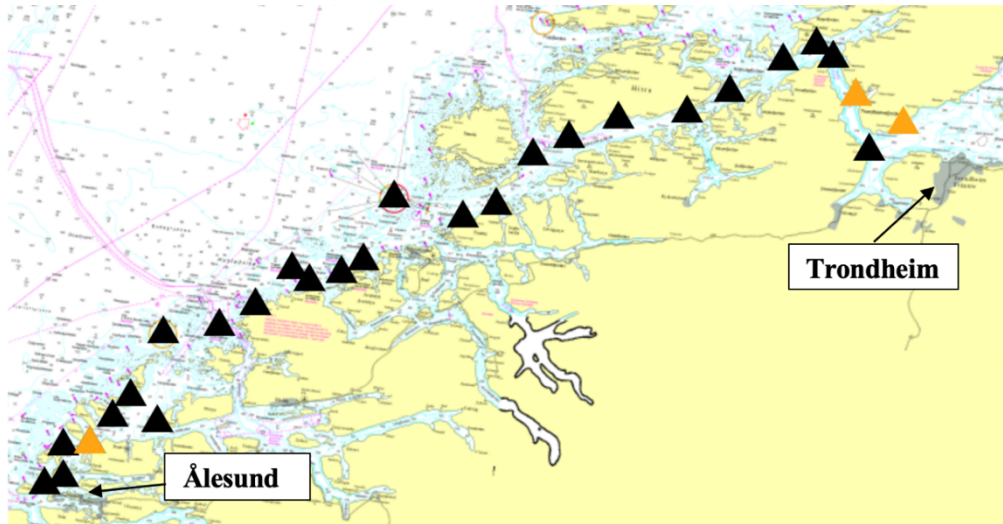
Da ERPS scorer dårlig på tilgjengelighet av signal opp mot PNT kravene, kan en løsning være å kombinere systemet med dagens treghetsnavigasjon. Dette vil kunne bidra til å opprettholde en omtrentlig posisjon, når signalet fra e-racon ikke er godt nok. Det vil også kunne bidra til en viss situasjonsforståelse inntil ny posisjon er gitt av ERPS systemet.

## **5.2 Hvor mange e-racon trengs langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim**

For å finne ut antall og plassering av e-racon langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim, ble det tatt utgangspunkt i testene fra England og Singapore. Kravene er lagt frem i Tabell 11. Ut ifra kravene om å bruke eksisterende sjømerker først og plassere nye ved behov, endte det med 28 e-racon installasjoner på den gitte strekningen. Med utgangspunkt i en kostnad

pr enhet inkludert montering på totalt 200 000kr (£20 000 (Ward *et al.*, 2014)), ender det med en pris for etablering av ERPS systemet på denne strekningen tilsvarende:

$$200\ 000kr * 28\ e - racon = 5\ 600\ 000kr$$



Figur 25 Plassering av e-racon langs hovedleden mellom Ålesund og Trondheim. Skjerm bilde uten markering hentet fra norgeskart.no

Figur 25 viser oversiktsbildet av plasseringene av e-racon via hovedleden mellom Ålesund og Trondheim. Tabell 12 gir mer informasjon om de enkelte e-racon plasseringene. For å få et nærmere innblikk i hvor de enkelte e-racon er plassert er det tatt nærmere utsnitt av kartet og navngitt e-racon i; Figur 17 til Figur 20.

Tenkte svakheter ved foreslått plassering av e-racon er at det bare er tatt høyde for to e-racon innenfor rekkevidde til enhver tid. Det betyr ikke at e-racon ikke kan bli detektert på større avstander enn det som er lagt til grunn. Problemet med å bare ha to e-racon innenfor teoretisk rekkevidde er at ved utfall av en, mister skipene mye av nøyaktigheten til posisjonen. Ut ifra intervjuene kom det frem at noen av intervjuobjektene har opplevd svakheter ved dagens racon, der de ikke fungerer når de skulle fungere. Om det samme gjelder for e-racon er vanskelig å si. Det burde dermed blitt plassert ut flere e-racon langs strekningen for å skape redundans til systemet.

### 5.3 Hvor langs hovedleden er det særlig behov for ERPS

Når posisjonen fra GNSS faller ut har navigatørene flere hjelpemidler for gjennomførelsen av en sikker seilas. Under intervjuene svarte fem av syv deltakere at Hustadvika vil være et

område der det er vanskelig å finne posisjon uten input fra GNSS og ved dårlig sikt. Dette forklares på bakgrunn av det dårlige radarlandet i området, som gjør det vanskelig å kjenne igjen landet som blir presentert på radaren. En av intervjuobjektene forklarte dårlig radarland som: «Nei det e gjerne et lavt landskap da, der du, der du har ei lang slak strand, ikkje sant. Som gir dårlig radarekko da, og det.»

Hustadvika er det som kan kalles for et dårlig radarland. Dette fordi det ikke er noen naturlige høyder, fjell, åser og lignende som gir klare og tydelige refleksjoner av radarsignaler. I området er det grunt langt fra land og flere skjær som kommer opp av havet eller akkurat ikke. Det dårlige radarlandet blir vist i Figur 21 til Figur 24, og de lave skjærene blir vist i Figur 26 og Figur 27. For å gjøre opp for det dårlige radarlandet er det plassert ut 11 vanlige racon på strekningen, men som oppdaget under ekspedisjonen fungerte ikke alle. Dette er presentert i Tabell 13.



Figur 26 Skjær på Hustadvika



Figur 27 Skjær på Hustadvika

#### 5.4 Hva er nytten av systemet

Det grunnleggende behovet for et nytt PNT system kommer fra IMO sin e-navigasjonsstrategi. Her er et av målene å oppnå redundans i PNT systemene til navigasjon. For å få til dette må det implementeres et nytt PNT system som baserer seg på en annen grunnleggende virkemåte enn GNSS, og som ikke har de samme feilkildene som GNSS.

ERPS er et system som kan gi en alternativ posisjonering for navigering. Det er fordi ERPS fungerer ved å beregne posisjon relativt til e-racon på bakken ved bruk av egen skipsradar, mens GNSS beregner posisjon i forhold til satellitter. GNSS er et satellittbasert globalt system, mens ERPS er et bakkebasert lokalt system. Altså er virkemåten og feilkildene forskjellige. Dersom GNSS systemet skulle feile kan dermed ERPS ta over og gi en posisjon

som kan brukes for å verifisere de optiske observasjonene gjort gjennom konvensjonell navigasjon.

Fra kapittel 2.3 om GNSS kommer det frem at systemet består av ulike leverandører av satellitter. Amerika har et system, Russland et annet, Kina et tredje og Europa har et fjerde. Sammen danner alle disse systemene GNSS. Det er dermed en forutsetning for at systemet skal være operativt og tilgjengelig for brukerne, at leverandørene vedlikeholder systemet og i tillegg tillater andre brukere å benytte systemet. Med dagens ustabile sikkerhetspolitiske situasjon i verden er det ikke nødvendigvis en selvfølge at alle GNSS systemene vil være tilgjengelig for alle brukere. Dette er en svakhet som også ble belyst gjennom intervjuene som ble gjort. Særlig losene poengterte at bruken av GNSS forutsetter at leverandørene tillater at brukere fra andre nasjoner har tilgang.

Kapittel 2.3 presenterer også feilkilder til GNSS systemet og en risikoanalyse knyttet til disse. Her beskrives både fysiske feilkilder og tilsiktede/utslåttede trusler mot systemet. Felles for alle feilkildene og truslene er at konsekvensen av dem er fra middels til stor. Blant feilkildene er ionosfærefeil, jamming og spoofing. Disse er det moderat til vanskelig å gjøre korrigerende tiltak mot. Konsekvensene av feilkildene og truslene kan blant annet være at sjøtrafikksentraltjenesten og skipsovervåking gjennom AIS blir svekket. AIS presentasjon av andre fartøy på egen radar og ECDIS kan også bli feil. Dette, sammen med at presentasjon av egen posisjon på ECDIS vil være feil, kan i verste tilfelle føre til kollisjon eller grunnstøting med følgende materielle skader, miljøkatastrofer og tap av menneskeliv som konsekvens.

Diskusjonen om GNSS og IMO sin e-navigasjonsstrategi over viser at det er et behov for et backup-system til GNSS som kan skape redundans innen PNT. Dersom ERPS i fremtiden dekker kravene til nøyaktighet og tilgjengelighet, kan dette behovet dekkes av ERPS. Systemet vil dessuten være et lokalt system som hver kyststat kan drifte og ha kontroll over selv, uten å være avhengig av andre nasjoner. Det sistnevnte ble belyst av noen av intervjuobjektene som en etterlengtet fordel med ERPS som man ikke finner igjen i GNSS systemet.

Kapittel 2.4 viser at det er flere systemer om bord på et skip som er avhengig av posisjonsinput for å fungere optimalt. Blant disse er ECDIS, AIS, radar og Digital Selective Calling (DSC). Felles for alle de nevnte systemene er at de har en sikkerhetsfunksjon, det

være enten for trygging av navigasjon eller til kommunikasjon i nød- haster- og trygging situasjoner.

Gjennom intervjuene er det belyst at det blant noen navigatører har en utbredt praksis å navigere i hovedsak kun ut fra ECDIS og den posisjonen som vises der. Feil i posisjon som følge av feil på GNSS systemet vil derfor være forbundet med fare for materielle verdier, miljø og mennesker. Blant disse navigatørene vil en endring i navigasjonspraksisen ved å gå over til å bruke radar og visuelle observasjoner som primær informasjonskilde være fordelaktig. Likevel vil et backup posisjoneringssystem, som for eksempel ERPS, vise sin nytte i slike situasjoner.

Feil på GNSS posisjon vil føre til feil på skipets utsendte posisjon på AIS systemet. Dette er også forbundet med fare, fordi det vil gi navigatører en presentasjon av virkeligheten som er feil. AIS er i utgangspunktet ment som et antikollisjonssystem, og dersom systemet viser et situasjonsbilde som er forskjellig fra virkeligheten kan dette bidra til å forvirre navigatører og dermed gi en feil situasjonsforståelse. Da er det opplagt at systemet ikke virker slik som det er ment til å fungere. En av intervjuobjektene nevnte at AIS systemet er til god hjelp for fartøy som navigerer i Skatestraumen sør for Måløy. Her er det høye fjell, trangt og uoversiktlig. Det gjør at det ikke er mulig å se andre fartøy på lengre avstand med radar. Derfor er AIS presentasjonen av annen trafikk på radar og ECDIS til god hjelp i dette området. Forutsetningen for at informasjonen er til hjelp er at den er korrekt. Det kan dermed være nyttig med et fungerende ERPS system som en backup til et PNT system.

Ved bruk av DSC funksjonen på radioutstyr sendes automatisk fartøyets posisjon. I nødsituasjoner er tiden en kritisk faktor. Det er derfor nødvendig at posisjonen i DSC-kallet er korrekt for at søk og redningsoperasjoner skal iverksettes på korrekt sted. Det er dermed tydelig at redundans i PNT systemene vil gi en økt trygghet for sjøfarende.

Et annet bruksområde for ERPS er på autonome skip. Når man er klar over svakhetene og sårbarhetene til GNSS systemet er det opplagt at det vil være risikofylt å åpne opp for autonome skip langs kysten dersom eneste posisjoneringssystem som brukes er GNSS. En redundans i posisjoneringssystemene vil være nødvendig. ERPS kan her være ett blant flere system som brukes.

ERPS systemet kan også brukes til skipsovervåking langs kysten. I dag gjøres dette blant annet ved bruk av AIS systemet med GNSS posisjon som posisjonskilde på fartøyene. Bruk

av et tilleggssystem som posisjonskilde til AIS vil gi redundans og en trygghet for å sikre tilgjengeligheten til overvåkningssystemet ved bortfall eller feil på GNSS systemet.

I det ene intervjuet ble det belyst at det per i dag er flere forskjellige navigasjonssystemer tilgjengelig for navigatører. Alle disse systemene inneholder feilkilder som kan gi navigatøren feil situasjonsforståelse. Intervjuobjektet uttrykte i denne sammenheng en bekymring for at ERPS kan bli et nytt ikke-feilfritt system som navigatører stoler blindt på. Dersom det er tilfellet, vil systemet gi en falsk trygghet og kan i verste fall føre til en økt risiko for uønskede hendelser og ulykker. For å unngå dette er det nødvendig at navigatører har god kjennskap til systemets virkemåte, feilkilder og begrensninger.

Fra presentasjonen av testresultatene fra ERPS testene i Singapore og England i kapittel 2.7.5 ser man at forventet nøyaktigheten til ERPS systemet slik det var testet er bedre enn 26,2 meter. Dette vil gjelde når to e-racon er tilgjengelig. Singapore-testen viser noe dårligere testresultat enn testen fra England. Grunnen til det er noe usikkert, men det kan være grunnet feilkilder som forstyrrelser fra andre fartøy og obstruksjoner fra land i testområdet i havnen i Singapore. Testen utenfor østkysten av England viser at systemet er i stand til å gi en nøyaktighet på inntil 2,2 meter. Tilgjengeligheten til systemet kan ut fra testene anslås til å være mellom 62,7 % og 87 %. Denne tilgjengeligheten gjelder når to e-racon er tilgjengelig.

Det planlagte systemet med e-racon på strekningen fra Ålesund til Trondheim i kapittel 4.2 er laget slik at to e-racon alltid er tilgjengelig innenfor de avstandene som er oppgitt i testoppsettene til testene fra Singapore og England. Man kan derfor anta at det planlagte ERPS systemet fra Ålesund til Trondheim vil gi en nøyaktighet på 26,2–2,2 meter og en tilgjengelighet på 62,7–87 %. Forventet ytelse til systemet vil dermed være mellom de oppgitte verdiene avhengig av geometri og forstyrrelser.

Basert på den oppgitte ytelsen til ERPS systemet ovenfor ser man at systemet ikke dekker IMO-kravene til PNT systemer i kyst- og havnefarvann i kapittel 2.2.1. Basert på dette kan man trekke slutningen at ERPS ikke kan fungere som et redundant PNT system, men at det kan fungere som et backup system til GNSS med relativt god nøyaktighet og tilgjengelighet. For å bedre tilgjengeligheten kan treghetssensorer integreres i ERPS systemet slik som diskutert tidligere.

Kapittel 2.7 viser at ERPS ikke kan fungere som et redundant PNT system fordi det ikke kan tilby timing. Dette sammen med informasjonen i avsnittet over gjør at ERPS i beste fall kan fungere som et lokalt backup PNT system.



## 6 Konklusjon

Enhanced Radar Positioning System kan fungere som et sekundært posisjoneringssystem, men det kan ikke erstatte dagens posisjonering med GNSS. E-racon vil kunne fungerer ved vanlig konvensjonell radar, men vil kun bli fullt utnyttet ved bruk av e-radar. Da e-radar vil motta både morsekode og lengde- og breddegrader fra e-racon, mens en konvensjonell radar kun vil motta morsekode. ERPS vil kunne gi en omtrentlig posisjon, og posisjonen blir bedre dersom flere e-racon blir tilgjengelig. Derimot vil en e-radar ha problemer med å trigge en vanlig konvensjonell racon, da utsendt effekt per idag er for lav.

For det begrensede området til oppgaven, langs hovedleden fra Ålesund til Trondheim, ble det estimert at ERPS kan dekke området med 28 e-racon. Der kravene for plasseringene ble satt til å være lik forutsetningene fra testene gjennomført i England og Singapore. Nøyaktigheten og tilgjengeligheten til systemet kan dermed antas å være henholdsvis 2,2-26,2 m og 87-62,7 %, som i testene.

Gjennom intervju og feltundersøkelse ble det belyst at Hustadvika er et område på strekningen der det vil være særlig behov for ERPS som et sekundært posisjoneringssystem. Dette på grunn av skjær og dårlig radarland.

Nytten til ERPS er at det kan gi en viss redundans til posisjonering, men ikke til PNT. Dette fordi systemet kan gi en posisjon med nøyaktighet og tilgjengelighet som beskrevet over. ERPS oppfyller likevel ikke kravene som IMO setter til PNT, og kan dermed ikke erstatte GNSS. I tillegg er ERPS i motsetning til GNSS et lokalt bakkebasert system, som er kontrollert av den enkelte kyststat.

## **7 Forslag til videre arbeid**

Oppgaven konkluderer med at ERPS kan fungere som et sekundært posisjoneringssystem, men at det ikke kan erstatte GNSS da det ikke oppfyller krav til PNT. Det anbefales dermed å forske videre på hva som kan gjøres for at systemet skal oppfylle kravene til PNT. Dette i form av flere tester, for å utvide datagrunnlaget, og utvikling av en internasjonal standard på kommunikasjonsformat mellom e-racon og e-radar.

Det burde utredes om treghetsnavigasjon kan skape en redundans til systemet. Dermed ved utfall av signal eller sviktende posisjonering med ERPS, kan skipet fortsatt inneha en omtrentlig posisjon.

ERPS kan være en kilde til redundans i posisjoneringen for autonome skip. Det anbefales å utrede hvordan ERPS kan bidra til dette.

For å begrense oppgaven har studentene valgt å ikke utrede økonomi og regelverk ved en eventuell implementering av et slikt system. Det anbefales å se nærmere på dette, da det vil være avgjørende for innføringen av et slikt system.

Til slutt anbefales det å se videre på hvordan systemet kunne sett ut langs hele kysten og hva som skal til for å implementere det på en god måte.

## Referanseliste

Bransby, M. og Williams, P. (2016) Maritime Resilient PNT in Europe... Where Now?, i *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, Oregon Convention Center, 12.-16. september. Portland, Oregon: Institute of Navigation, s. 3494-3498.

Furuno Electric (2017) *Trails of e-Radar/e-Racon Positioning System at Singapore port*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/content/uploads/2016/09/1555-Takuo-Kashiwa-Trials-of-e-Radar-e-Racon-positioning-system-at-Singapore-Port-final.pdf> (Hentet: 22. februar 2023).

Holtebekk, T. (2022) *dopplereffekt*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/dopplereffekt> (Hentet: 16. februar 2023).

HowStuffWorks.com (2001) *What does solid-state mean in relation to electronics?* Tilgjengelig fra: <https://electronics.howstuffworks.com/question558.htm> (Hentet: 20. april 2023).

IALA (2004) *R0101 (R-101) MARINE RADAR BEACONS (RACONS)*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/repository/20220217/recommendations/R0101%20Marine%20Radar%20Beacons%20%28Racons%29%20%28R-101%29%20Ed2.1%20December%202004.pdf> (Hentet: 23. januar 2023).

IALA (2011) *R0146 (e-NAV-146) STRATEGY FOR MAINTAINING RACON SERVICE CAPABILITY*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/repository/20220217/recommendations/R0146%20Strategy%20for%20Maintaining%20Racon%20Service%20Capability%20%28e-NAV-146%29%20Ed1.1%20December%202011.pdf> (Hentet: 23. januar 2023).

IALA (2012) *R0129 (R-129) GNSS VULNERABILITY AND MITIGATION MEASURES*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/product/r0129/> (Hentet: 2. januar 2023).

IALA (2018) *R1017 RESILIENT POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING (PNT)*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/product/r1017/> (Hentet: 23. januar 2023).

IALA (2022) *G1147 THE USE OF ENHANCED RADAR POSITIONING SYSTEMS*. Tilgjengelig fra: <https://www.iala-aism.org/product/g1147/> (Hentet: 11. januar 2023).

IMO (2011) *Resolution A.1046(27) WORLDWIDE RADIONAVIGATION SYSTEM*. Tilgjengelig fra: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf?fbclid=IwAR0NeZpaXnQpZ1hdnTfPJH4wCGVnLpA0w9JkWVgtz1utPp8uYcwo65-xikM](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf?fbclid=IwAR0NeZpaXnQpZ1hdnTfPJH4wCGVnLpA0w9JkWVgtz1utPp8uYcwo65-xikM) (Hentet: 8. februar 2023).

Ioannides, R. T., Pany, T. og Gibbons, G. (2016) Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status, and Potential Mitigation Techniques, *Proceedings of the IEEE*, 104(6), s. 1174-1194. <https://doi.org/10.1109/jproc.2016.2535898>

- Kjerstad, N. (2015) *Elektroniske og akustiske navigasjonssystemer*. 5. utgave. Bergen: Fagbokforlaget.
- Kjerstad, N. (2019) *Elektroniske og akustiske navigasjonssystemer*. 6. utgave. Bergen: Fagbokforlaget.
- Kjerstad, N. (2022a) *navigasjon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/navigasjon> (Hentet: 18. februar 2023).
- Kjerstad, N. (2022b) Racon. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/radarfyr\\_-\\_racon](https://snl.no/radarfyr_-_racon).
- Kjerstad, N. (2022c) Racon på radar. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/radarfyr\\_-\\_racon](https://snl.no/radarfyr_-_racon).
- Kjerstad, N. (2022d) *radarfyr - racon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/radarfyr\\_-\\_racon](https://snl.no/radarfyr_-_racon) (Hentet: 6. februar 2023).
- Kystverket (u.å.) *e-navigasjon*. Tilgjengelig fra: <https://www.kystverket.no/om-kystverket/forskning-og-utvikling-fou/e-navigasjon/> (Hentet: 18. februar 2023).
- Larsen, A. K. (2017) *En enklere metode*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Lied, F. (2017) *magnetron*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/magnetron> (Hentet: 13. februar 2023).
- Samferdselsdepartementet (2018) *På rett sted til rett tid*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/abd1dec7647a4c22aaef7d93046e3f2b/pa-rett-sted-til-rett-tid.pdf> (Hentet: 7. februar 2023).
- Schmidt, D. *et al.* (2016) A Survey and Analysis of the GNSS Spoofing Threat and Countermeasures, *ACM Computing Surveys*, 48(4), s. 1-31.  
<https://doi.org/10.1145/2897166>
- Ward, N. *et al.* (2014) Enhanced Radar Positioning, i *Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Catamaran Resort Hotel, 27.-29. Januar*. San Diego, California: Institute of Navigation, s. 583-587.
- Wolff, C. (u.å.) *Radartutorial.eu*. Tilgjengelig fra: <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Intrapulse%20Modulation.en.html#p3> (Hentet: 16. februar 2023).
- Zidan, J. *et al.* (2021) GNSS Vulnerabilities and Existing Solutions: A Review of the Literature, *IEEE Access*, 9, s. 153960-153976.  
<https://doi.org/10.1109/access.2020.2973759>

