



**DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET**

## **MASTEROPPGAVE**

Studieprogram/spesialisering: Industriell økonomi, investering og finans

Vårsemesteret, 2022

Åpen / Konfidensiell

Forfatter: Tor Mikkell Grønli

.....  
(signatur forfatter)

Fagansvarlig: Sigbjørn Landazuri Tveteraas

Veileder(e): Harald Haukås

Tittel på masteroppgaven: Markedsanalyse og posisjonering av private nett mot norsk industri basert på bruksområder og verdi-utfall

Studiepoeng: 30

Emneord: INDMAS

Sidetall: .....

+ vedlegg/annet: .....

Stavanger, 15.07.2022

---



## Anerkjennelser

Aller først – En stor takk til veilderene mine, Harald Haukås og den eksterne veilederen fra Ericsson, Ida Sørli. Takk for muligheten til å jobbe med en så kul oppgave. Denne studien hadde ikke vært mulig uten dere.

Samtidig vil jeg gi en stor takk til alle andre som har støttet meg under masteroppgaven, kolleger fra Ericsson og Telenor, studenter, venner, familie, hund og alle andre som har gitt moralsk og faglig støtte.

Jeg vil også gi en stor takk til alle med studenter og professorer gjennom mine 5 år på UiS for en herlig studietid.

Det har vært en veldig lang vei opp til dette øyeblikket når jeg er ferdig med 18 år på skole og endelig blitt sivilingeniør. Jeg er glad, stolt og utslitt, og har ikke ord eller kapasitet til å formulere det jeg føler nå. Tusen takk for meg!

## Abstrakt

Denne masteroppgaven studerer industrielle applikasjoner av private 5G nettverk for å adressere relevante faktorer for norsk industri og verdi utfall. Oppgaven ser på nettverksinvesteringen fra norske industrifabrikkers perspektiv. Først utvikles et rammeverk for framgangsmåte i et brownfield-miljø ved å se på hvilke faktorer som må adresseres og hvilke valg som må tas basert på state-of-the-art gjennomgang av industri 4.0 teknologier, reguleringer og applikasjoner av private nett. Til slutt er verdien av 5G-investeringene analysert i en norsk fabrikk basert på valgene i rammeverket ved teknisk-økonomiske evalueringer og NPV/ROI-analyser.

# Innholdsfortegnelse

## Contents

<b>DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET</b> .....	0
<b>MASTEROPPGAVE</b> .....	0
Anerkjennelser .....	2
Abstrakt .....	3
Innholdsfortegnelse .....	4
Figurer .....	6
Tabeller .....	6
Forkortelser .....	7
1 Introduksjon .....	8
1.1 Prosjekt Bakgrunn .....	8
1.2 Prosjekt Beskrivelse .....	10
1.3 Forskningsmål og spørsmål .....	12
1.4 Forskningsomfang, disposisjon og struktur .....	13
2 Teoretisk bakgrunn for 5G og aktuelle teknologier .....	15
2.1 5G og digitalisering .....	15
2.2 Private 5G nettverksalternativ .....	17
2.2.1 Datasikkerhet .....	19
2.2.2 Lokal databehandling .....	20
2.2.3 Frekvensbånd .....	21
2.3 Bruksområder for private 5G nettverk .....	22
2.3.1 Autonome Mobile Roboter .....	23
3 Metodikk .....	26
3.1 Kvalitativ gjennomgang .....	26
3.1.1 Markedsundersøkelser .....	26
3.1.2 Litteraturgjennomgang .....	27
3.2 Utvikling av rammeverk .....	29
3.3 Validering av rammeverk .....	30
4 Applikasjoner av private 5G nettverk og analyse av relevante faktorer .....	32
4.1 Applikasjoner av private 5G nettverk .....	32
4.2 Investeringskostnader .....	33
4.3 Reguleringer av frekvenser i Norge .....	34
4.3 Prosedyrer og framgangsmåter for applikasjoner av private 5G nettverk .....	36
4.4 Gjennomgang av bruksområder i 5G-SMART forskningsprosjektet .....	39

4.6 Oppsummering av funn .....	43
6 Rammeverk for industrielle applikasjoner av private 5G nettverk .....	44
6.1 Litteraturgjennomgang av produksjons KPI-er, økonomisk evaluering, matematisk og kostnadsmodellering.....	44
6.2 Rammeverk .....	51
7 Investeringsanalyse for implementering av privat 5G nett i produksjonsmiljø .....	56
7.1 Hydro .....	56
6.1.1 Analyse av Hydro Karmøy .....	56
6.2 Resultater fra teoretisk analyse på Hydro Karmøy .....	64
8 Diskusjon .....	66
8.1 Kvalitativ gjennomgang.....	66
8.2 Utviklingen av rammeverket.....	67
8.3 Analyse av Hydro.....	69
9 Konklusjon .....	72
Referanser .....	73
Appendiks A.....	79
Appendiks B .....	84
B.1 Regnskap.....	84
B.2 Input variabler.....	85
B.3 Direkte effekt på omsetning og kostnader .....	86
B.4 Estimering av priser .....	86
B.5 Økonomiske modeller på Hydro Karmøy.....	86
B.5 Nettverksalternativ .....	87

## Figurer

Figur 1.1: Disposisjon og studiens struktur.....
Figur 2.1: Lokal databehandling.....
Figur 2.3 Nøkkelteknologier for AMR-en.....
Figur 3.1: Arbeidspakker og mål i 5G-SMART prosjektet, basert på 5G-SMART D7.4 (2022)...
Figur 4.1: Innplassering i 3,6 GHz-båndet.....
Figur 6.1: Intern analyse.....
Figur 6.2: Ekstern analyse, basert på 5G-SMART D1.3 (2021).....
Figur 7.1: Nåverdi av kontantstrømmer fra analysen på Hydro Karmøy.....

## Tabeller

Tabell 1.1: Oversikt over forskningsspørsmål, metodikk og verktøy.

Tabell 2.1: Sammenligning mellom generasjoner med mobile nettverk (Sharma, 2013, Hasan et al., 2019).

Tabell 2.2: Nettverksalternativ for private 5G nettverk.

Tabell 2.3: 5G bruksområder.

Tabell 3.1: Søkeord.

Tabell 4.1: Investeringskostnader knyttet til nettverk.

Tabell 5.2: Sektoravgifter for ulike båndbredder i 3,8-4,2 GHz-båndet.

Tabell 5.3: Nettverksalternativ fra 5G-SMART D1.3 (2021).

Tabell 5.4: Bruksområder undersøkt i 5G-SMART.

Tabell 5.5: Ytelseskrav for BO1, BO2 og BO3.

Tabell 5.6: Ytelseskrav for BO4 og BO5.

Tabell 5.7: Ytelseskrav for BO6 og BO7.

Tabell 6.1: Effekt av 5G applikasjoner på tekniske mål, basert på 5G-SMART D1.2 (2021).

Tabell 6.2: Aluminiumstråd.

Tabell 6.3: Pressbolter.

## Forkortelser

<b>Forkortelse</b>	<b>Betydning</b>
AGV	Automatisert guided farttøy ( <i>Automated guided vehicle</i> )
API	Application Programming Interface
AI	Kunstig Intelligens ( <i>Artificial intelligence</i> )
AMR	Autonom mobil robot ( <i>Autonomous Mobile Robot</i> )
BU	Bruker utstyr
GSM	Global System for Mobile
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
Mbps	Megabit per sekund
MNC	Mobile nettverkskoder ( <i>Mobile network codes</i> )
MNO	Mobilnettverksoperatør
KPI	Nøkkeltallsindikator ( <i>Key performance indicator</i> )
IoT	Tingenes internett ( <i>Internet of Things</i> )
UV	Utvidet virkelighet

CAG - Closed Access Group

IT - Informasjonsteknologi

OT - Operasjonell teknologi

eMBB - Høy båndbredde, enhanced mobile broadband

mMTC - massiv maskin-til-maskin kommunikasjon, massive machine type communications

URLLC - høyt pålitelig kommunikasjon med lave tidsforsinkelser, ultra Reliable Low Latency Communications

MNO - mobilnettverksoperatør

NR - New Radio

NB-IoT - Narrowband IoT

PNI-NPN - Public Network Integrated Non-Public Networks

PN - Privat nettverk

SNPN - Standalone Non Public Networks

ITU - Den internasjonale telekommunikasjonsunion, International Telecommunication Union

3GPP - 3rd Generation Partnership Project



## 1 Introduksjon

Samfunnet og verden blir stadig mer digitalisert og data-drevet støttet av sentrale vertikaler som tilkoblede industrier, intelligente transportsystem og smarte byer. Likevel er maskin-til-maskin kommunikasjon og tingenes internett (*Internet of Things*, IoT) sofistikerte teknologier som krever en forbedring av tidligere trådløse nettverk for å oppnå nye bruksområder (Ranaweera et al., 2021). Samtidig møter industrien et økende behov for fleksibilitet grunnet nåværende markedstrender. Den femte generasjonen med mobile nettverk (5G) kan være løsning, men for å oppnå fordelene med 5G må infrastrukturen være på plass der det trengs. Mobiloperatører som Telenor er godt i gang med utbygging av det kommersielle 5G-nettet, men industrielle applikasjoner i Norge henger etter. Industrielle 5G applikasjoner kan effektivt møte utfordringer knyttet til markedstrender, men bruksområder og teknologiske faktorer må bli nøye planlagt for å sørge for at systemet møter de nødvendige kravene.

Selv om private 5G nettverk har blitt forsket på for standardisering, arkitektur og flere bruksområder har disse sviktet i å adressere den praktiske designprosessen for industrielle applikasjoner. Dette inkluderer linken mellom passende bruksområder, nettverksalternativ og det spesifikke produksjonsmiljøet. Samtidig er investeringsviljen til industrien basert på konseptutprøvde 5G-støttede teknologier som gir verdi (Adib, 2019). Dette har effektivt neglisjert behovene til industriaktører, og mangelen på et rammeverk mot disse hensiktene er tydelig i litteraturen.

Denne studien søker å adressere gapet i litteraturen ved å gi et enkelt rammeverk for beslutninger knyttet til valg av bruksområder og nettverksalternativ for å vurdere verdi utfall. Et rammeverk for å navigere interaksjonen mellom industrifabrikken, bruksområdet og tilgjengelige nettverksalternativ er foreslått basert på en gjennomgang av forskningslitteraturen, forskningsprosjektet av konsortiet i 5G-SMART, intervju med fagpersoner, eksempler, reguleringer i markedet og økonomiske modeller. Aktuelt teknisk nivå er undersøkt og beskrevet for ulike private 5G nettverk for å oppnå dette. Videre er en oversikt over faktorer som har betydning for valg av bruksområder, nettverksalternativ og verdi utfall presentert i det utviklede rammeverket. Til slutt er det foreslåtte rammeverket brukt for en teoretisk case-studie av industricampuset på Hydro Karmøy. På denne måten bidrar denne studien til vår forståelse av hvordan de nye og fremadtrekkende 5G teknologiene kan bli brukt i industriell sammenheng for å møte tekniske mål og trender som beskriver dagens marked.

### 1.1 Prosjekt Bakgrunn

På grunn av globalisering og høy konkurranse i nesten alle bransjer har dagens markedstrender gitt et økt behov for høyere grad av personlig tilpasning fra kunder. Et eksempel på dette er behovet for karbonnøytrale produkter som tvinger leverandører til å modifisere sine produkter og produksjonsmiljø. I tillegg, har nylige utfordringer som Covid-19 pandemien og geopolitiske konflikter skapt uro i forsyningskjeden som har ledet til underskudd på komponenter og råvarer gitt produsenter mindre forutsigbarhet. Sårbarheten som stammer fra geopolitisk uro har krevd en rask respons fra industrien, og i kombinasjon med klimapress har produsenter hatt behov for økt fleksibilitet. Produksjon i industrien startet eksklusivt med håndproduksjon av unike produkter (Koren, 2010). Deretter startet tiden med masseproduksjon og produksjonlinjer drevet av Henry Fords bilproduksjon, før det utviklet seg til Toyotas tilnærming til produksjon ved Lean og modifisering. Med dagens behov for personlig tilpasning må produksjonsmiljø igjen tilpasses for å tilrettelegge for unike produkter, samt reproduksjon (Hu et al., 2011, Koren, 2010). Personlig tilpasning er trenden der kunder har behov for å påvirke og bli med i designprosessen av produktene (Hu et al., 2011).

Dette kan også ekspanderes til inkludere bedriftskunders behov for karbonnøytrale og høyteknologiske produkter. Kundenes påvirkning i designprosessen har tidligere vært fraværende i masseproduserte goder, men kan spores tilbake til håndproduksjon.

I tillegg til utfordringene knyttet til fleksibilitet står industrien ovenfor en rekke utfordringer når det kommer til arbeidskraft. Eldrebølger, større krav til sikkerhet og krav til bedre vilkår har gitt mindre tilgang på arbeidskraft i industrien. Allerede lider industrien av en mangel på ferdigheter og det er estimert at bransjen kommer til å mangle 7,9 millioner arbeidere globalt innen 2030 (Adib, 2019). Og eldrebølgen gjør at mengden tunge og repiterende oppgaver relatert til materiell håndtering må reduseres (Markis et al., 2019). Dette har gitt et økt behov for å automatisere prosesser på tvers av bransjer. Samtidig som fremtredenen av produksjonslinjen automatiserte masseproduksjon, har teknologisk utvikling i programvare, robotikk og kommunikasjonteknologi muliggjort automatisering i alt fra kontorlandskap til intralogistikk i varehus og transport. I industrien har operatørens rolle endret seg. For det første har digitaliseringen fra industri 4.0 gjort at arbeidere må kunne samhandle mellom operasjonell teknologi (OT) og informasjonsteknologi (IT). For det andre vil operatører bli på arbeidstasjonen for å utføre verdiskapende arbeid i stedet for fysisk gåing og løfting. For det tredje har nye operatører blitt vanskeligere å ansette siden arbeidskraft ofte kommer fra migrerende arbeidere (International Labour Organization, 2021). Alle økonomiske kriser siden 90-tallet har understreket viktigheten av å bygge pålitelighet gjennom investeringer i sosial beskyttelse. Samtidig har store nylige transformasjoner innen teknologi, klimaforandringer og pandemien restrukturert arbeidsmarkedet og gitt rom til nye trender i arbeidssammenheng som fokuserer på fleksibilitet (International Labour Office, 2022). Dette er også i tråd med med vanlige mål om å redusere tid, unødvendige kostnader, bedre ergonomi og på å øke tiden brukt på verdiskapende arbeid i fabrikken.

Paradigmeskifte påvirker industrien uansett om de fortsatt bruker masseproduksjon eller har tatt steg mot tilpasning av produkter. Økt produktivitet har vært driveren for tidligere paradigmeskifter, og dette skiftet burde ikke bli noe anderledes (Rüßmann et al., 2015). Utfordringen er å produsere høye variasjoner på en økonomisk bærekraftig måte. Dagens masseproduksjonsmiljø har ikke fleksibiliteten til å møte det nåværende behovet (Fragapane et al., 2020), og massetilpasningssystemer står overfor kompleksiteten til personalisering, e-handel og omnikanal distribusjon (Custodio og Machado, 2020). På grunn av økt press for å produsere personaliserte produkter, globaliseringsfaktorer, og mangel på arbeidskraft er behovet for økt fleksibilitet blant industrien betydelig (Pei et al., 2019). Fleksibilitet er definert som *«et systems egenskap til å respondere kostandseffektivt på forandringer i krav til volum, produksjonsmix, maskin status og prosesskapasitet»* (Custodio og Machado, 2020). Ofte er det en avveining mellom å være effektiv i volum og lite fleksibel, eller fleksibel og mindre effektiv (Dang et al., 2011). Å oppnå økt produktivitet gjennom fleksibilitet er utfordringen i dag. Omfangsøkonomi er viktig å mestre, og verdiforskjell er en viktig faktor under disse markedtrendene. Målet fra Lean produksjon om partistørrelser på en har blitt virkelighet. Og kombinert med større produksjonsvariasjon og kortere livsykluser for både produkter og teknologier har dette skapt en stor utfordring for industrien (Andersen et al., 2017, Pedersen et al., 2016).

Dette paradigmeskiftet har populært blitt kalt Industri 4.0, som er trendnavnet for den fjerde industrielle revolusjon. Det heter den fjerde industrielle revolusjon fordi den følger de tre forrige revolusjonene, dampkraft og mekanisering, elektrisitet og masseproduksjon, og datamaskin og automatisering. Industri 4.0 startet som et initiativ fra tyske myndigheter og har spredt seg raskt grunnet applikasjonsbehov fra industrien, mye på grunn av behovet for fleksibilitet og raskere respons fra markedet (Lasi et al., 2014). Industri 4.0 mangler en klar definisjon, derfor er det vanlig å

se på industri 4.0 som et paraplybegrep som bygger på ni raskt voksende teknologier. Disse er ofte kalt de ni pillarene: IoT, databehandling i skyen, robotikk og autonome system, stordataanalyse, utvidet virkelighet, datasikkerhet, horisontal og vertikal system integrasjon, simulering og additiv tilvirkning (Rüßmann et al., 2015). Noen av disse teknologiene har eksistert en stund allerede, men hovedendringen skjer når disse teknologiene kombineres. For eksempel kan IoT kombineres med simulering og stordataanalyse for å skape digitale tvillinger av fabrikker – som muliggjør sanntidskontroll og optimering av produksjonssystem. Dette kan for eksempel brukes til å teste applikasjoner av nytt utstyr virtuelt før man installerer det fysisk i fabrikk. Industri 4.0 representerer ofte trendene i automasjon innen industrien, som omhandler forandringen fra innebygde systemer til cyber-fysiske systemer, eller smarte system (Shahin et al., 2020). Smarte system handler om å knytte IT og OT sammen, og kommunikasjonsteknologien er derfor i hjerte til fremskritt i industri 4.0. Industri 4.0 bruksområder kommer til å sette strenge krav til forsinkelser, pålitelighet og nøyaktig posisjonering. Kombinasjonen mellom 5G teknologi og bedriftsnettverksløsninger vil derfor være kritisk for å oppnå slike krav i industrielle applikasjoner (Ordonez-Lucena et al., 2019).

Selv om automatiske prosesser har eksistert lenge er autonomi viktig på grunn av integrasjon av flere teknologier, som gjør summen av komponentene sterkere enn deres individuelle bidrag. Dette øker effektiviteten og reduserer behovet for tilpasning av infrastrukturen (Indri et al., 2019). Rekonfigurerbare produksjonssystem har begynt sin fremtreden fra diskret produksjon som en respons til trendene i markedet (Koren og Shpitalni, 2010), men prosessindustrien følger nødvendigvis ikke dette (Fragapange et al., 2020b). Lite differensierte, masseproduserte produkter produseres av dedikert og lite fleksibelt utstyr. Konsekvensene av en slik konfigurasjon er redusert utnyttelse på grunn av oppstart tid, fastlåst oppsett, og ruter med samlebånd som til syvende og sist reduserer fleksibiliteten deres med tanke på produktmiks. I tilfeller der de ønsker flere varianter eller økt produksjon vil lang oppstarttid eller ekstra samlebånd resultere i lav utnyttelse og høye investeringskostnader (Fragapane et al., 2020). Dette er en stor ulempe med det økende behovet for fleksibilitet.

Med nåværende trender i markedet og industrien er det klart at industrien er satt under press. Likevel, kan dette gi det dyttede aktørene trenger for å oppnå suksess med industri 4.0. Alle disse eksterne faktorene, sammen med ny og forbedret teknologi for materiell håndtering og 5G har økt interessen både blant aktører og forskere på dette feltet. En av nøklene til rekonfigurerbare produksjonssystem og modulære samlebåndsystem er introduksjonen av autonom prosesser. Autonome prosesser tillater selvregulert, desentralisert planlegging, gjennomføring, kontroll og optimering av internt materiell og informasjonsflyt gjennom samarbeid med andre system og mennesker (Fottner et al., 2021). 5G kan være nøkkelen til å realisere slike industri 4.0 økosystem. Tidligere fokuserte mye av forskningen og implementerte løsninger på individuelle eller et par bruksområder, men med utrulling av 5G ser man på flere løsninger samtidig (Adib, 2019). 5G utfordrer alle eksisterende kommunikasjonsteknologier og har potensialet til å muliggjøre et bredt spekter av bruksområder.

## 1.2 Prosjekt Beskrivelse

Selv om 5G-operatører lover uttalige bruksområder og kostandsbesparelser knyttet til private 5G nett er industrien møtt med vanskelige valg og en jungel av alternativer. Det er mange bruksområder å fokusere på, og hvert bruksområde har en rekke leverandører med et bredt spekter av produkter. I tillegg, er det et kunnskapsgap mellom industrien og operatører når det kommer til verdien av private nett. Og en rettferdiggjøring av investeringer i nye teknologier krever både overbevisende argumenter og definerte mål (5G-SMART D1.2, 2021). Fram til 1990 fokuserte industrien på å oppnå

et enkelt sett med mål, nemlig å redusere kostnader, øke produktivitet eller forbedre kvalitet (Schuh et al., 2012). Men siden 90-tallet har det utviklet seg til multi-dimensjonelle ytelsesindikatorer (*key performance indicators*, KPI) for å holde tritt med den økende kompleksiteten til produksjonssystem. Slike KPI-er kan beskrives av industri 4.0-trender som omhandler å øke operasjonell produktivitet og effektivitet gjennom automasjon og sammenkobling mellom den fysiske og virtuelle verden (5G-SMART, 2021, D1.3). I tillegg til å nå mål ved å øke fleksibiliteten, allsidigheten og brukbarheten til smarte fabrikker (5G-ACIA, 2019).

Andre forskningsartikler har foreslått rammeverk for å estimere verdien av 5G applikasjoner i industri (5G-SMART D1.2, 2021). Samtidig har leverandører av 5G-tjenester og uttalige rapporter fra konsulenthus prøvd å selge inn fordelene med 5G ved kalkulatorer og lignende. Konseptutprøving og videreutvikling har blitt gjort av slike aktører, men resultatene er utilgjengelig for forskere og offentlige domener. På den andre siden har tidligere arbeid fra leverandører av nettverkstjenester, mobilnettverksoperatører (MNO) og universitet kommet langt i å teste ut applikasjoner og bidra til standardiseringer for institusjoner som 3rd Generation Partnership Project (3GPP). I tillegg har forskningsprosjekt som 5G-ACIA og 5G-SMART gjort en god jobb i å offentliggjøre konseptutprøving av teknologier, i tillegg å adressere tekno-økonomiske og teknologiske faktorer. På samme måte har Nasjonal Kommunikasjonsmyndighet i Norge åpnet for store muligheter for innovasjonen innen feltet ved å lette på reguleringer. Samtidig er det en blanding av rekke veletablerte og fremadtrekkende fagfelt å dekke når en slik applikasjon vurderes. De fleste fagfeltene har hatt sterkt fokus på å optimalisere ulike subsystem, som nye teknologiske aspekter med 5G eller programvare for å kontrollere diverse bruksområder. Likevel mangler det en oversikt som knytter disse faktorene sammen for å gi industriaktørene det informasjonsgrunnlaget de trenger for å vurdere teknologien i sine egne fabrikker.

Norsk industri står for 8% av landets BNP utenom olje og gass (SSB, 2022). Med 7.5% av den tilgjengelige arbeidskraften er det også den næringen som har økt mest i arbeidsproduktivitet samtidig som antall sysselsatte har falt fra 357 000 i 1970 til 216 000 i 2021 (SSB, 2022). Dette forklares i stor grad av automasjon, globalisering og trender i markedet hvor en større andel av befolkningen går for utdanning i stedet for faglære (Andersen, 2021). Samtidig understreker det behovet for å nå Industri 4.0 mål også i Norge. Samtidig er kostnader og omsetning er viktige faktorer for å beregne lønnsomheten til en applikasjon. Ved utgangen av 2021 var det i alt 22555 bedrifter i industrinæringen i Norge. Til sammenligning hadde kun 106 av disse 250 ansatte eller flere, og de aller fleste hadde under 50 ansatte (SSB, 2022). Størrelsen til bedriftene kan være en viktig faktor for investeringsviljen til selskapet. Og investeringer i private 5G nettverk kan være ute av rekkevidden til de fleste norske selskaper foreløpig på grunn av investeringskostnaden og mangel på forståelse av teknologien. Ifølge en undersøkelse gjort av STL-Partners i 2022 fant de at 72% av bedrifter ikke forstår avkastningen på investeringen når det kommer til private 5G nett (STL-Partners, 2022). Videre fant de at 55% av produksjonsbedrifter i Europa ikke har planlagt 5G på grunn av for høy usikkerhet knyttet til fordeler. Mye av denne usikkerheten stammer fra at bedriftene trenger håndfaste prosjektbegrunnelser som demonstrerer verdi (STL Partners, 2022). I tillegg er mangel på vertikal kunnskap og ekspertise blant produksjonsbedrifter og behovet for en annerledes salgstilnærming og spesifikke evner fra tilbyderne hindringer selskap møter i dag.

Andre hindringer for industrien er behovet for å finne et passende bruksområde, samt mangel på demonstrasjon av forretningsverdi for å rettferdiggjøre investeringer. Det er mange som er interessert i å finne løsninger på disse problemstillingene, og flere rapporter finnes fra ulike konsultantselskap og tilbydere som Ericsson. Men problemet med disse er at de ikke gir god nok innsikt i datagrunnlaget eller metodikk, og det er derfor vanskelig å gjenskape. I tillegg er det ikke

forsket mye på verdien knyttet til private 5G nett. Likevel er mulighetene store og bruksområdene mange når det kommer til Industri 4.0 og 5G. Og riktig valg av bruksområde og nettverksalternativ har stort potensiale til å redusere kostnader og øke blant annet fleksibilitet, produktivitet, kvalitet, trygghet og bærekraft. Litteraturgapet kan bli oppsummert av mangel på prosedyrer, rammeverk og modeller som knytter relevante faktorer og krav sammen for å assistere i den praktiske beslutningsprosessen av å velge bruksområde og nettverksalternativ. Og for å møte tekniske og økonomiske ønsker og krav. Å utføre forskning på dette området er derfor ansett som kritisk for aktører som planlegger utbygging av private 5G nettverk for å realisere ønsker om å dra nytte av Industri 4.0-trender.

### 1.3 Forskningsmål og spørsmål

Forskningsmålet med denne studien er å adressere litteraturgapet som omhandler verdi utfall av private nettverk på grunn av mangelen på prosedyrer, rammeverk og modeller som inneholder en oversikt over faktorer og krav for å assistere i beslutningsprosessen for valg av bruksområder og nettverksalternativ. Intensjonen er å utvikle et utforskende steg-for-steps rammeverk som knytter tekniske og strategiske mål mot produksjonsmiljø og prosess KPI-er for å identifisere bruksområde (e.g., skybaserte Autonome Mobile Roboter (*Autonomous Mobile Robots*, AMR) for internlogistikk). Samt å knytte dette opp mot krav (e.g., ytelseskrav, driftskrav og funksjonelle krav) og karakteristikk (e.g. fleksibilitet, ytelsestilpasning, skalerbarhet, datasikkerhet, økonomi) for kommunikasjonstjenesten slik at passende nettverksalternativ (e.g., SNPN, PNI-NPN og forretningsmodell) kan velges. Og slik at verdi utfallet kan analyseres basert på måloppnåelse og økonomiske modeller. Denne studien adresserer de følgende tre forskningsspørsmålene for å nå forskningsspørsmålet:

- Forskningsspørsmål 1: *Hvordan brukes private nettverk i dag?*
- Forskningsspørsmål 2: *Hvilke faktorer må adresseres?*
- Forskningsspørsmål 3: *Hva er verdien for norske industriaktører?*

Forskingsspørsmål 1 utforsker bruksområder for private 5G nettverk i industrielle applikasjoner. Spørsmålet er besvart ved en markedsundersøkelse bestående av en litteraturgjennomgang, eksempler og utforskende intervju med nettverksleverandører. Forskingsspørsmål 2 er besvart ved å utvikle et rammeverk som bygger på funnene fra forskningsspørsmål 1. Enkle økonomiske og tekniske modeller er brukt til å vurdere verdi utfallet av rammeverket. Dermed får industriaktører en oversikt over faktorer å vurdere, hva de innebærer og hvordan de kan gå fram for å oppnå verdi samt å måle verdien av investeringene. Og sammen med en teoretisk gjennomgang av rammeverket på en norsk fabrikk er forskningsspørsmål 3 besvart. Forskingsspørsmålene, metodikken og verktøy for industriaktører er knyttet sammen som vist i Tabell 1.1.

<b>Forskingsspørsmål</b>	<b>Mål</b>	<b>Metodikk</b>	<b>Verktøy for aktører</b>
<i>Hvordan brukes private nettverk i dag?</i>	Utforske bruksområder og industrielle applikasjoner	Litteraturgjennomgang Markedsundersøkelse gjennom utforskende intervju og eksempler	Oversikt over markedet
<i>Hvilke faktorer må adresseres?</i>	Gi en oversikt over faktorer som må adresseres for valg av bruksområde og nettverksalternativ	Basert på funn fra forskningsspørsmål 1 Estimering av verdi gjennom introduksjon av tekniske og økonomiske modeller	Oversikt over faktorer Rammeverk

<i>Hva er verdien for norske aktører?</i>	Estimert verdi av investeringer	Teoretisk gjennomgang av rammeverket Selskapsanalyse Økonomisk analyse	Praktisk eksempel på gjennomgang av rammeverket Estimert verdi utfall
---	---------------------------------	--	--

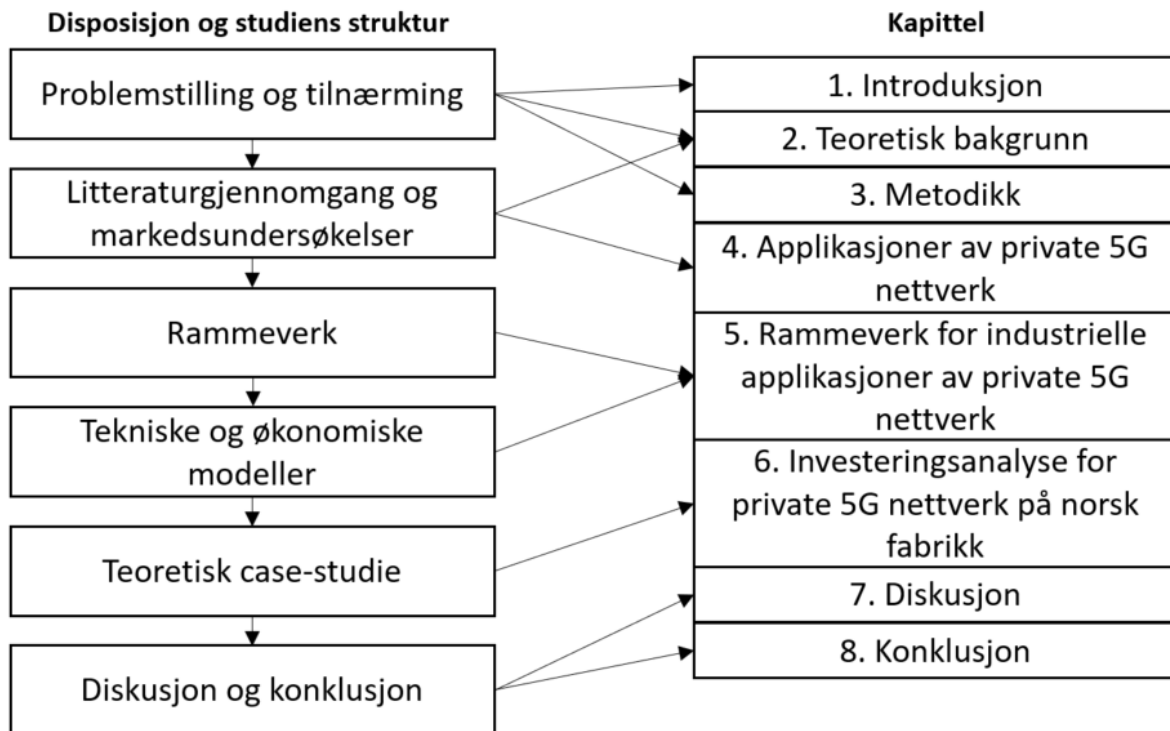
**Tabell 1.1: Oversikt over forskningsspørsmål, metodikk og verktøy.**

#### 1.4 Forskningsomfang, disposisjon og struktur

Denne studien fokuserer på bruken av private 5G nettverk i industrielle applikasjoner i Norge. Industri er et bredt begrep og omfatter mange bransjer. Denne studien studerer norsk industri, og følger EU standard NACE rev.2 (2007) for næringsgrupperingsdefinisjon. Standarden gir et grunnlag for koding av enheter etter viktigste aktivitet i blant annet SSB sine register. Industri inneholder en rekke punkter som omfatter produksjon, reparasjon og installasjon av diverse materialer, produkter, maskiner og utstyr. Industri er definert på følgende måte i EU standard NACE: *“Industriproduksjon omfatter fysisk eller kjemisk omdanning av materialer, stoffer eller deler til nye produkter.”* En rekke andre applikasjonsområder for private nettverk som varehus, sykehus, gruver, flyplasser og lignende er diskutert i litteraturen og anvendt av nettverksleverandører, men er ikke en del av denne oppgaven. Og siden de fleste industrielle applikasjoner befinner seg utenfor norske landegrenser er også globale eksempler presentert for å identifisere bruksområder. Videre er en myriade av industrielle bruksområder foreslått og introdusert i forskningslitteraturen, men omfanget av bruksområder i denne studien er begrenset til konseptutprøvde teknologier med tilgjengelige spesifikasjoner basert på ekte applikasjoner og litteraturgjennomgang.

Konkurrerende kommunikasjonsteknologier som kablede nettverk, Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth og lignende er anvendt i industrien i dag og kan støtte en rekke teknologier for bruksområder. Samtidig kan flere av disse teknologiene ha fordeler over 5G med blant annet pris, kompleksitet og integrasjon (Mehl et al., 2021). I tillegg er flere av disse teknologiene under kontinuerlig utvikling som potensielt kan gi de en konkurransefordel i nær framtid. Likevel begrenses denne studien til kommunikasjonsteknologien 5G, men korte diskusjoner er presentert for å beskrive fordelene med 5G i kontekst av tekniske mål. Videre er dybden i analysen av teknologier med detaljerte beskrivelser og framgangsmåter for nettverksarkitekturer (e.g., radioplanlegging,), programvare (e.g., administrasjonsprogramvare, AI, maskinlæring), maskinvare og industrielt maskineri (e.g., optimalisering) siden det ikke er målet å direkte adressere denne litteraturen. Likevel er de presentert og diskutert i form av potensielle bruksområder og kostnadsposter.

Disposisjonen og strukturen i dokumentet er presentert i Figur 1.1. Dette illustrerer forskningsstegene som ble tatt og hvor de er plassert i konteksten av denne studiens struktur.



Figur 1.1: Disposisjon og studiens struktur.

## 2 Teoretisk bakgrunn for 5G og aktuelle teknologier

Dette kapitlet tar for seg den teoretiske bakgrunnen for studien. Dette ble gjort ved å definere, beskrive og presentere de ulike teknologiene bak 5G med utfordringer og fordeler knyttet til industriell implementasjon. For å forstå verdien 5G kan bringe er drivkraften bak utviklingen og noen viktige bruksområder for private nettverk beskrevet.

### 2.1 5G og digitalisering

5G er den femte generasjonen og etterfølger 4G med standarden Long Term Evolution (LTE), 3G Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) og 2G Global System for Mobile (GSM). Det forventes at 5G skal tillatte et fullstendig mobilt tilkoblet samfunn som kan bringe sosioøkonomiske utviklinger som vi fortsatt ikke kan forestille oss (Ranaweera et al., 2021). 5G skal oppnå en betydelig forbedring på tjenestekvalitet, som høyere datahastigheter, pålitelighet, kapasitet og reduserte forsinkelser (Hassan et al., 2019), og er posisjonert for å adressere virksomheters behov som IoT. Denne utviklingen gjør at 5G utfordrer alle eksisterende nettverksteknologier som Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee og kablede løsninger med fiber. På grunn av strenge krav fra industrielle applikasjoner er nåværende tidskritiske nettverk basert på kablede kommunikasjonsnettverk (5G-SMART D7.4, 2022). Dette resulterer i begrenset fleksibilitet når det kommer til å sette opp nye eller rekonfigurere eksisterende produksjonslinjer. I tillegg er komplekst og kostbart vedlikehold store ulemper for kablede nettverk. Dette kan være et problem i lys av dagens markedstrender der industrielle miljø skal være så fleksible som mulig (5G-SMART D7.4, 2022). Introduksjon av 5G kan redusere slitasje på kablene og portene for mobile maskiner og kontrollere, og på den måten redusere vedlikeholdskostnader. I tillegg kan skiftet fra kabler til trådløst resultere i økt fleksibilitet for implementasjon og adaptasjon av industrielt maskineri. Og i kombinasjon med andre trådløse applikasjoner forventes det en stor effekt for industriaktører som tar i bruk 5G-teknologien (Ericsson, 2019).

Utviklingen til trådløse nettverk er blant annet drevet av den økende veksten i antall tilkoblede enheter og volumet av data i samfunnet. På samme måte har også de nye generasjonene med mobile nettverk drevet teknologiske utviklinger i samfunnet. 2G ble introdusert på slutten av 80-tallet og er fortsatt i bruk i dag. 2G introduserte digital flertilgangsteknologi som Time Division Multiple Access (TDMA) og Code Division Multiple Access (CDMA) som blant annet ga brukere tekstmeldinger, mobildata og krypterte samtaler (Sharma, 2013). Dermed drev nettverksteknologien utviklingen i mobiltelefoner og gjorde at folk kunne kommunisere med hverandre i farten. Deretter kom 3G og ett par år etter lanserte Apple smarttelefonen iPhone 3G, som ganske snart dominerte markedet. Smarttelefonen har endret livet vårt drastisk, og teknologien er muliggjort av utviklingen til mobile nettverk. Smarttelefonen og den enorme veksten i mobile tjenester som fulgte er et eksempel på innovasjoner som kom etter mobilnettverksoperatørene gjorde store investeringer for utbygging. For eksempel estimerte forsknings og utviklingsavdelingen i Telenor sammen med Nokia og andre at tilbakebetalingsperioden til utbygging av et 3G-nettverk av en teleoperatør i et stort europeisk land var på 7.7 år i 2005 (Varoutas et al., 2005). Senere fant Budiyanto et al. at tilbakebetalingsperioden til implementeringen av et LTE-nettverk i tettbefolket by kunne være innen 4 år (Budiyanto et al., 2021). Grunnen til den kortere tilbakebetalingsperioden er hovedsakelig en økning i antall brukere og tilkoblede enheter som har gitt en økning i antall abonnement. Denne trenden med økning i antall tilkoblede er estimert til å fortsette med 5G (Shafi et al., 2017). På samme måte har mengden data og antall tilkoblede enheter vokst i industrien (Hassan et al., 2019). Strenge krav til tjenestekvalitet for å støtte flere interaktive bruksområder og applikasjoner med ultralave forsinkelser og høye hastigheter i Industri 4.0-eraen har bidratt til utviklingen.



5G er beskrevet av en rekke spesifikke standarder, krav og karakteristikk. Globalt er det hovedsakelig to institusjoner som utarbeider standarder for 5G, nemlig den internasjonale telekommunikasjonsunion (*International Telecommunication Union*, ITU) og 3GPP (Shafi et al., 2017). Disse standardene omfatter spesielle retningslinjer, protokoller og tekniske spesifikasjoner. Eksempler på aktiviteter dette omfatter er sikkerhetsprotokoller som skal forsvare systemet mot angrep, og identifikasjonen av frekvenser som skal brukes for 5G applikasjoner. Når det kommer til tekniske spesifikasjoner overgår 5G de tidligere generasjonene på alle dimensjoner av målbare ytelsesberegninger (Shafi et al., 2017). Dette har også vært målet siden begynnelsen. I 2015 publiserte NGMN den første hvitboken til 5G som omfattet framtidens behov for nye radio-grensesnitt støttet av høyere frekvenser og spesifikke egenskaper (e.g., lavere forsinkelser). Dette var en beskrivelse som skulle gå utover det LTE kan støtte. I tillegg, skulle 5G være et ende-til-ende system som inkluderer alle aspekter av nettet, fra tilgangspunkter til kjernenettet (NGMN, 2015). Dette skulle muliggjøre data-dreven digitalisering og sofistikerte internetteknologier som automatisert kjøring, utvidet virkelighet og maskin-til-maskin kommunikasjon. For å oppnå dette karakteriserte NGMN 5G med mye høyere hastighet, mye kortere forsinkelser, ultra høy pålitelighet, større båndbredde, og større mobilitetsområde sammenlignet med tidligere generasjoner. Senere har 3GPP formalisert disse karakteristikkene i ulike standard utgivelser. Da ble disse karakteristikkene kategorisert til tre hovedelementer som gjør at 5G skiller seg ut fra tidligere generasjoner (3GPP, 2020). Det første er høy båndbredde (*Enhanced Mobile Broadband*, eMBB). Dette dekker behovet for høye datahastigheter og stor kapasitet i mobile applikasjoner. Det andre er massiv maskin-til-maskin kommunikasjon (*Massive Machine Type Communications*, mMTC). Dette dekker behovet for mange applikasjoner av maskin-til-maskin kommunikasjon, for eksempel for å støtte industriell IoT. Det tredje og kanskje mest spennende elementet for industrien er høyt pålitelig kommunikasjon med lave tidsforsinkelser (*Ultra Reliable Low Latency Communications*, URLLC). Tidligere har trådløse nettverk vært for upålitelige og det resulterte i at kabelløsninger var foretrukket i industrien. Men med 5G URLLC finnes det for første gang et trådløst nettverk med høy pålitelighet og lave tidsforsinkelser.

3GPP standardene blir utarbeidet i samarbeid med aktører i industrien og tilrettelegger dermed for deres behov. Den første 5G standarden utgitt av 3GPP var utgivelse-15. Fokuset på denne utgivelsen var å sikre funksjoner for URLLC. Den neste utgivelsen var utgivelse-16, denne utgivelsen var veldig viktig for private 5G nett fordi den tilrettela for industriell IoT med nøkkelfunksjoner som støtte for IEEE Time Sensitive Networking (TSN). TSN er en rekke standarder for nettverksarkitekturer som kontrollerer trafikkflyt og sikrer pålitelighet (Parkvall et al., 2020). Sammen URLLC funksjonene til 5G vil dette sikre at kritisk trafikkflyt kommer fram med minimale tidsforsinkelser. Senere har utgivelse-17 og -18 blitt utgitt, de har hovedsakelig fokusert på forbedring av de tidligere standardene. Konsensus for referanseverdier på nøkkelindikatorer som hastighet og forsinkelser er vanskelig å finne i litteraturen siden det er store forskjeller i ulike rapporter. Likevel går det an å sammenligne ut fra teoretiske og gjennomsnittsverdier. I følge O'Connel et al. kan 5G nå teoretiske hastigheter opp mot 50 Gbps (2020). Og Tabell 2.1 viser en sammenligning av teoretiske maksimale nedlastingshastigheter for de ulike generasjonene med mobile nettverk. Selv om en typisk 5G bruker kommer nærmere disse hastighetene da en rekke faktorer som tekniske spesifikasjoner på det kommersielle nettverket, mobil operatør og antall tilkoblede brukere påvirker dette (O'Connel et al., 2020). For å oppnå disse hastighetene, tidsforsinkelsene og foreslåtte fordelene med 5G må nettverket spesialtilpasses for dette formålet. Og med private nettverk er slike spesialtilpasninger mulig (Prados-Garzon et al., 2021).

	<b>1G</b>	<b>2G</b>	<b>3G</b>	<b>4G</b>	<b>5G</b>
Utgitt:	1979	1991	2002	2009	2019
Standarder:	NMT, AMPS & TACS	GSM & CDMA	UMTS & EV-DO	LTE	NR
Elementer:	Analog stemme	Digital stemme Kryptert kommunikasjon Begrenset internetttilkobling SMS & MMS	Mobilt bredbånd Lokasjonstjenester Multimedia strømming Sømløs global internetttilkobling	Høy hastighet IP-basert pakkeveksling HD multimedia strømming	Private nett TI-støtte eMMB mMTC URLLC mmWave
Utvidelser:		GPRS CDMA2000 EDGE	HSPA+	Funksjonsutvidelser gjennom nye kategoriutvidelser	Funksjonsutvidelser gjennom nye kategoriutvidelser
Hastighet:*		0.064 Mbit/s	42 Mbit/s	1,000 Mbit/s	10,000 Mbit/s
Forsinkelser:**			60 ms	50 ms	<10ms
Industriell innvirkning:		Begrenset fjernkontroll Tekstmeldinger til og fra maskiner	Videoovervåkning Utvidet fjernkontroll og overvåkning	Mobile service teknikkere Service via smarttelefoner Trådløs backhaul	Autonome logistikk og produksjonsmiljø Lokal databehandling Lukkede nettverk

**Tabell 2.1: Sammenligning mellom generasjoner med mobile nettverk (Sharma, 2013, Hasan et al., 2019). \*Teoretiske hastigheter. \*\*Gjennomsnittlige tidsforsinkelser.**

## 2.2 Private 5G nettverksalternativ

Et privat 5G nettverk er et 5G nettverk som settes opp til privat bruk for et firma, som industri vertikaler eller statlige foretak. I motsetning til dette er et offentlig kommersielt nettverk bygget ut og eid av mobilnettverksoperatører (MNO) for offentlig bruk og tjenester. De ulike alternativene har forskjellige fordeler og ulemper. I denne seksjonen presenteres de ulike private 5G nettverksalternativene og 5G-teknologier, samt fordeler og ulemper med nettverksalternativene knyttet til relevante faktorer og teknologier.

Mobile nettverk består hovedsakelig av et Radio Access Network (RAN) og et kjernenettverk (Ericsson, 2020). RAN gir dekning via antenner, allokterer radioressurser og kobler enheter til kjernenettet. RAN implementerer også Radio Access Technology (RAT) som 5G New Radio (NR) eller 4G LTE. Kjernenettet administrerer ruting, mobilitet, autentisering, andre relaterte funksjoner og gir kobling til det globale internettet. De fysiske komponentene er antennene som kan ses på toppen av bygninger og tårn, basestasjonene med basebands og serverne til kjernenettet. Kjernenettet har mange funksjoner, spesielt styrer det hvem som har tilgang til nettet og sørger for at brukere er godkjent for serverne de skal bruke (Prados-Garzon et al., 2021). I tillegg, navigerer det telefonsamtaler over det offentlige telefonnettet og styrer databruk som blant annet lar operatører ta betalt for ulike tjenester. Det har også kritiske funksjoner som sikrer kvaliteten i nettet, som for eksempel overlevering når brukere beveger seg fra et RAN-område til det neste. I tidligere generasjoner med mobile nettverk måtte RAT og kjernenettet være av samme generasjon. For eksempel kunne 4G LTE nettverk bare bruke 4G kjernenettverk. For 5G nettverk er dette annerledes og det muliggjør forskjellige kategorier private nett (Prados-Garzon et al., 2021). Et RAN kan for eksempel nå settes opp med 5G NR på et 4G kjernenett. Det finnes hovedsakelig to forskjellige måter å strukturere et privat 5G-nett på i følge 3GPPs spesifikasjoner (2020), enten via det offentlige nettet eller et selvstendig nettverk utenom det offentlige nettet. En rekke

spesifikasjoner i nettet er avhenging av hvilken av de to strukturene som velges. Samtidig dreier det seg om hvem som eier hver komponent og hvem som styrer nettet, alstå MNO, industriaktør eller en tredjepart (Prados-Garzon et al., 2021). Tabell 2.2 presenterer de alternative kategoriene for 5G private nett.

<b>5G Private nett kategorier</b>	<b>Detaljer</b>	<b>3GPP Terminologi</b>
SNPN	Alle nettverksfunksjoner er lokale.	SNPN
PNI-NPN med delt infrastruktur	RAN eller kjernenett deles med MNO. Nettverkskontroll er styrt av MNO.	PNI-NPN
MNO-styrte (skivedelte) PNI-NPN	MNO kontrollerer alle nettverksfunksjoner. Dataflyten er utenfor lokalet.	PNI-NPN

**Tabell 2.2: Nettverksalternativ for private 5G nettverk.**

Private nett som bruker det kommersielle nettverket er kalt Public Network Integrated Non-Public Networks (PNI-NPN) av 3GPP (2020). PNI-NPN har lavere oppstarts og vedlikeholdskostnader, og er enklere for aktører å sette opp da man kan utnytte MNO-ens infrastruktur, frekvensbånd og kompetanse (Prados-Garzon et al., 2021). Et PNI-NPN kan settes opp på to forskjellige måter, enten med delt infrastruktur (e.g., RAN eller kjernenett) eller som et MNO-styrt privat nett. PNI-NPN via delt RAN deler RAN og bruker dermed basestasjonene til MNO. I denne løsningen forblir kjernenettet lokalt, men kontrollfunksjoner må deles med MNO slik at kommersielle kunder kan koble seg til nettverket. PNI-NPN med delt kjernenett kontrolleres av MNO, men egne basestasjoner med RAN har blitt bygd ut for industriaktøren. MNO-styrte PNI-NPN bruker nye 5G-teknologier for å skape et virtuelt nett i et eksisterende nett, kalt skivedeling. Det kan gjøres ved å allokere nettverksskiver for det private nettet (3GPP, 2020). For å begrense tilgangen til nettet settes det opp et sporingområde der dedikerte celler gir tilgang til enheter innenfor et lukket geografisk område (e.g., et industricampus). Ved skivedeling tildeles en viss mengde radioressurser fra hver antenne til bruk for det spesifikke nettverket. Skivedeling er en teknologisk løsning som gir et logisk isolert nett med divergerende nettverksytelse over en delt nettverksinfrastruktur. MNO kan bruke skivedeling til å tilrettelegge offentlige tjenester eller private nett. Det er også mulig å ha flere dedikerte skiver i samme nettverksinfrastruktur, hvis for eksempel det er behov for spesifikke kvalitetskrav (Prados-Garzon et al., 2021).

Selvstendendige private nettverk kalles Standalone Non Public Networks (SNPN) av 3GPP (2020). SNPN gir aktører fullstendig kontroll over nettverket på et lukket geografisk område, på lignende måte som et privat Wi-Fi nettverk. SNPN har et eget kjernenettverk og kontrolleres dermed av SNPN-eieren (Prados-Garzon et al., 2021). I motsetning med PNI-NPN er ikke SNPN avhengig av det offentlige nettet, det er helt lukket og kan ikke brukes av andre. På den måten trenger ikke SNPN å håndtere mobile eller nomadiske brukere i nettverket (Prados-Garzon et al., 2021). Dette gjøre det lettere å dimensjonere nødvendig kapasitet for å sikre stabile hastigheter. Denne typen nett tilbyr også større fleksibilitet ved at ulike funksjoner kan allokere til tredjeparter eller MNO (Prados-Garzon et al., 2021). Til slutt, selv om skivedeling hovedsakelig er en tilrettelegger for PNI-NPN, er det mulig å bruke det i SNPN for å differensiere datatrafikk fra ulike Industri 4.0-applikasjoner (Prados-Garzon et al., 2021).

### 2.2.1 Datasikkerhet

Den trådløse tilkoblingen 5G tilbyr bringer fordeler, men det kan også gjøre industriaktører sårbare mot dataangrep. Mange driftskritiske funksjoner og sensitiv data styres av nettverksinfrastruktur, og potensielle angrep kan gjøre store skader. Derfor har datasikkerhet og forsvar mot dataangrep blitt en høy prioritet for bedrifter (5G-SMART D1.2, 2021). En viktig forskjell mellom PNI-NPN og SNPN er forskjellene i datasikkerhet og personvern. Industrielle nettverk har spesifikke sikkerhetskrav som er definert i IEC62443 serien av spesifikasjoner (Leander et al., 2019). Denne standarden definerer fire nivå av sikkerhet for ulike trusselkilder, fra SL1 – beskyttelse fra enhver internettbruker, til SL4 – beskyttelse fra statlige organisasjoner. Det betyr at til og med de enkleste produksjons og prosessdataen vanligvis er regnet som industrihemmeligheter (Leander et al., 2019). Introduksjonen av 5G teknologi i OT industri må samsvare med disse kravene. Både når det kommer til overføring og lagring av data. 5G har en avansert verktøykasse for sikkerhet, inkludert gjensidig verifisering mellom enheter og nettverket, og støtte for sikkerhetsmoduler for maskinvare (Jerichow et al., 2020). Spesifikt er det tre ulike verifiseringsmekanismer: 5G-AKA, EAP-AKA' og EAP-TLS. For aktører er det greit å vite at de to første krever et Universal Integrated Circuit Card (UICC), for eksempel en SIM-modul i enhetene, mens EAP-TLS ikke krever det. EAP-TLS forenkler derfor introduksjonen av 5G-teknologien i IoT-enheter (Prados-Garzon et al., 2021). Videre støtter 3GPP Release 16 (2020) en rekke avanserte sikkerhetsmekanismer for private nett. Disse mekanismene gir løsninger relatert til enhet-til-nettverk kommunikasjon. Dette inkluderer enhetsverifisering med muligheten for aktører til å implementere ytterligere verifisering, ende-til-ende trafikk integritetsgaranti og kryptering på både bruker og kontrollplanene, samt enhetslegitimasjonskontroll. Kort oppsummert er det store muligheter for industriaktører til øke datasikkerheten i 5G-nettverk, men det krever ekstra kompetanse eller utgifter til eksperter.

For SNPN står industriaktøren fritt til å velge verifiseringmekanisme, men alle enheter som skal kobles til må ha en identitet som kan bli verifisert av nettverket. Dette kan medføre ekstra kompleksitet dersom industriaktøren velger å gjøre det selv siden identitesressurser må anskaffes. Identitesressurser består av kombinasjonen mellom en Mobile Country Code (MCC) og nettverksidentitetskode (Prados-Garzon et al., 2021). MCC allokeres av ITU, via nasjonale myndigheter eller via en MNO (3GPP, 2020). Og dersom industriaktøren ønsker tilgang til tale for å kommunisere med andre brukere på det kommersielle nettverket må det avtales med MNO (3GPP, 2020). Dette kan være fordelaktig hvis det private nettet befinner seg på et sted med begrenset eller fraværende dekning fra det kommersielle nettet. Tilslutt er den største fordelene med SNPN når det kommer til sikkerhet at all data forblir på lokalet (5G-SMART D1.2, 2021).

I PNI-NPN må enten 5G-AKA eller EAP-AKA' brukes for å verifisere enheter mot the offentlige nettverket, det vil si ved bruk av SIM-kort eller tilsvarende (Prados-Garzon et al., 2021). På den måten kan SIM-kort og abonnement til MNO-en bli en ekstra utgift for industriaktøren. I tillegg, definerte 3GPP i utgivelse-16 (2020) en ytterligere verifiseringsmekanisme som tillater operatørene å ha sin egen tilgangskontroll i skivedelte PNI-NPN (Prados-Garzon et al., 2021). Likevel er det mulig for andre å koble seg til spesifikke basestasjoner innenfor området til det private nettet. En løsning på dette kan være å bruke Closed Access Groups (CAG). CAG definerer en liste med abonnenter som har tillatelse til å koble seg til cellene. Slik kan man forhindre at uautoriserte enheter kobler seg til basestasjoner i et geografisk område (Prados-Garzon et al., 2021). Dette betyr at PNI-nettverket kan bli veldig sammenlignbart med et SNPN når det kommer til å begrense tilgang til et spesifikt område. På den andre siden har industrielle nettverk tradisjonelt vært fysisk adskilt i OT-miljøet og på den måten skapt et enkelt tillitsdomene innenfor deres lukkede områder, men med PNI-NPN representerer MNO-en bak nettverket et separat tillitsdomene. Dette krever at man har funksjoner som kan sikre at dataen i OT-miljøet forblir privat. Slike funksjoner kan være ende-til-ende-

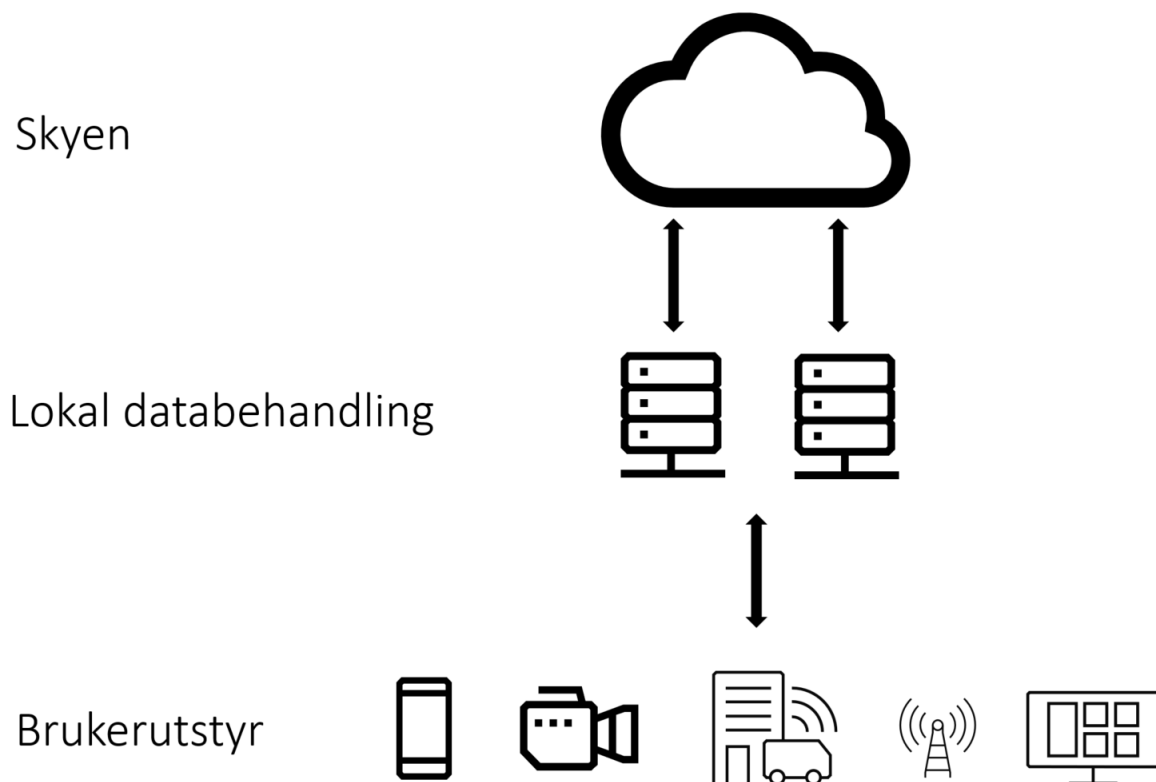
kryptering og integritetsbeskyttelse, samt isolasjon av operasjonell og abonnements informasjon (Prados-Garzon et al., 2021).

Til slutt kan industriaktører også vurdere annen infrastruktur for sikkerhet. Eksempler på slik infrastruktur er fjernattestering og transittbevis (Prados-Garzon et al., 2021). Fjernattestering sikrer tillit og forpliktelser til virtuelle nettverksfunksjoner og underliggende infrastruktur. Transittbevis tillater esktern verifisering av trafikk og samsvar med videresendingsrettningslinjer, i tillegg til å garantere at pakker traverserer noder i henhold til mandat. Totalt sett er det mange valg industriaktører kan gjøre når det kommer til datasikkerhet, men i seg selv er SNPN det sikreste alternativet (5G-SMART D1.2, 2021).

### 2.2.2 Lokal databehandling

Med digitaliseringen av samfunnet og utviklingen i nettverksteknologier kan milliarder av smarte enheter nå koble til internett i formen av IoT (Al-Fuqaha et al, 2015). Data generert av IoT-enheter er essensielle for organisasjoner som er interessert i å forbedre deres produktivitet og omsetning. Innovative skyløsninger som databaser, analyseverktøy og AI er allerede godt etablert blant bedrifter. Imidlertid er det utfordrende å behandle og analysere så store mengder data med konvensjonelle nettverkspadigmer. Av den grunn har lokal databehandling blitt en løsning fordi det behandler data nærmere IoT-enheten. Lokal databehandling, referert som *“Edge Computing”* i engelsk faglitteratur, er et samlebegrep for flere løsninger som representerer skyløsninger for databehandling på kanten av nettverket.

Lokal databehandling er en voksende teknologi som skal muliggjøre mange av de nye bruksområdene til 5G. Lokal databehandling flytter prosessorkraften til servere nærmere brukerutstyr i nettverksarkitekturen. Disse lokale serverne utvider sky-tjenester til kanten av nettverket for å gjøre prosessorkrevende oppgaver og lagre store mengder data nærmere brukerne av nettet. Dette er en del av teknologien som gjør at forsinkelsene i 5G-nett er mye lavere enn i tidligere generasjoner (Hassan et al., 2019). Figur 2.1 illustrerer at serverne er nærmere brukerutstyr. Tradisjonelle sky-tjenester er sentraliserte nettverkspadigmer som gir tilgang til datasenter der brukere kan utnytte prosessorkraft og lagringsplass. I disse paradigmen er datasentrene plassert fysisk langt unna brukerne og dette forårsaker forsinkelser. Lokal databehandling er derfor foretrukket for de trådløse kommunikasjonskravene i neste generasjons bruksområder, som for eksempel utvidet og virtuell virkelighet da de er interaktive teknologier. Interaktive teknologier og bruksområder har høye krav til prosessorkraft og tjenestekvaliteter som lave forsinkelser og høy hastighet. Dette er viktig for å oppnå mange av de foreslåtte bruksområdene til 5G ettersom det forenkler behandlingen av forsinkelsesfølsomme og båndbreddekrevende applikasjoner i nærheten av datakilden (Hassan et al., 2019).



**Figur 2.1: Lokal databehandling.**

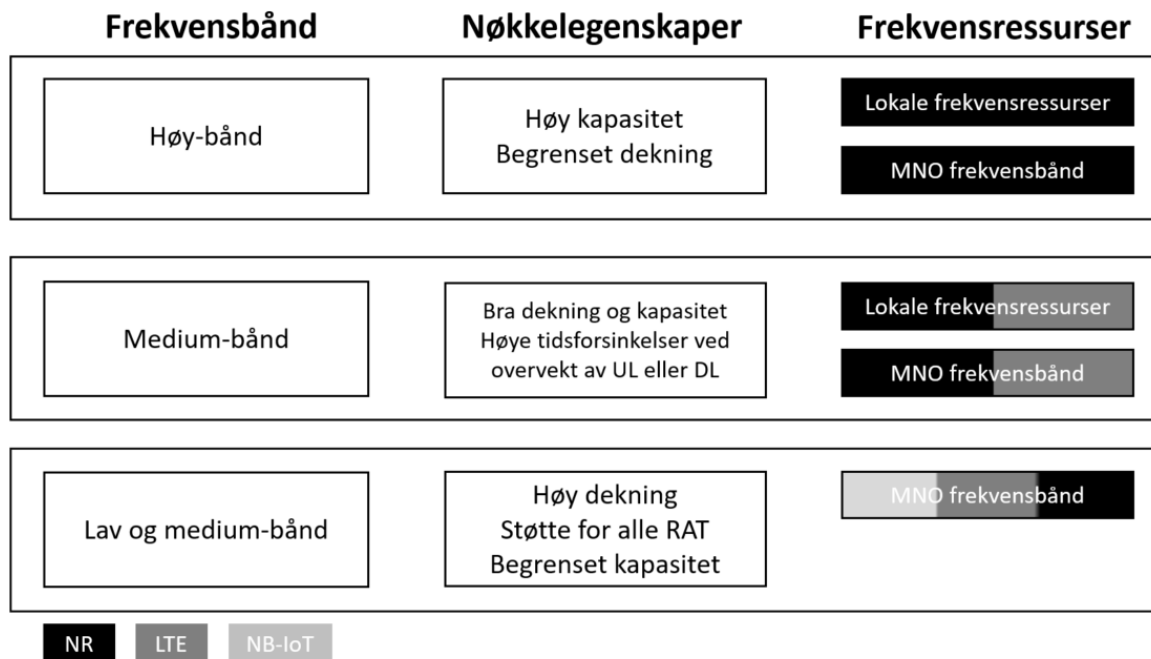
Tidligere har RAN og kjernenett blitt satt opp på forskjellige geografiske plasseringer. RAN blir typisk blitt satt opp for få å oppnå maksimal dekning og ytelse, og kjernenett har blitt satt opp på noen få regionale eller nasjonale plasseringer. Det vil si at et fysisk kjernenett ofte dekker flere basestasjoner (RAN). Dette har endret seg litt med 5G, der lokal databehandling og skyløsninger gjør at kjernenettet kan bli satt opp per dekningsområde. Disse løsningene er enda ikke definert av en 3GPP standard, men heller drevet av kommersielle valg (Teppo og Norrman, 2020). Dette betyr at lokal databehandling ikke er helt avhenging med alternativene SNPN og SNI-PN.

### 2.2.3 Frekvensbånd

Trådløs kommunikasjonsteknologi bruker radiobølger for å overføre data. Lengden, eller frekvensen, mellom radiobølgene har stor påvirkning på nettverkets dekning, kapasitet og hastighet. De ulike frekvensene er i stor grad harmonisert i Europa og internasjonalt (Nkom, 2021). Det vil si at myndigheter deler ut frekvenstillatelser som brukes til mobilnett og avgjør hvem som kan bruke ulike frekvensressurser. Frekvenstillatelser inneholder en bestemt mengde spektrum i en frekvensblokk, der myndigheter stiller krav til bruk til for eksempel satellitt, mobilt bredbånd eller mobiltelefoni. Med slike tillatelser kan operatører selv bestemme hvor de vil sette opp basestasjoner for å gi dekning. Grunnen til at frekvenstillatelser deles ut til bestemt bruk er for å unngå overlapp mellom nett og interferens som forstyrrer signalene. Derfor kan frekvensbånd i seg avgjøre hvilket nettverksalternativ som er mulig.

Det har vært en trend med nye generasjoner av nettverksteknologi at de stadig bruker høyere frekvensbånd. Det blir da en avveining mellom bedre dekning og raskere hastighet ved frekvensvalg som radioplanleggere må ta hensyn til når de skal bygge basestasjoner (Prados-Garzon et al., 2021). Lavere frekvensbånd under 1 GHz gir bredere dekning og støtter alle radioteknologier, samt

Narrowband IoT (NB-IoT) som er standard utviklet av 3GPP for IoT-enheter (3GPP, 2020). Til gjengjeld er det mindre kapasitet i slike frekvenser. Medium frekvensbånd mellom 1 og 6 GHz støttes hovedsakelig av LTE og 5G NR. De høyeste frekvensbåndene mellom 24 og 40 GHz er det kun 5G som støtter, men disse frekvensbåndene er stort sett i utviklingsstadiet på lab i dag eller testlokasjoner i fabrikker (Nkom, 2021). En av hovedforskjellene mellom 5G og tidligere nettverksteknologier er at 5G fungerer på nesten alle frekvensbånd. Til sammenligning operer LTE i dag på frekvensbånd mellom 300Mhz og 2600Mhz. Figur 2.2 illustrerer forskjellene mellom ulike frekvensbånd.



**Figur 2.2: Oppsummering av frekvensbånd.**

### 2.3 Bruksområder for private 5G nettverk

Etterhvert som 5G utvikles kan flere og flere applikasjoner og bruksområder realiseres. Og allerede i 2019 hadde Ericsson identifisert mer enn 200 industrielle bruksområder muliggjort eller forbedret av 5G teknologi (2019). I denne seksjonen presenteres ulike kategorier for bruksområder for kort, før en av de mest populære 5G-bruksområdene presenteres i detalj. Siden det er sannsynlig at 5G først vil introduseres i bruksområder hvor kabler ikke kan bli brukt og fordi den dekker en rekke teknologier som kan muliggjøres av 5G, er AMR-en beskrevet og definert.

Basert på relevante faktorer for industribedrifter kan digitalisering bety en stor fordel. Og siden utviklingen til Industri 4.0 er drevet av knytte sammen forskjellige maskineri og utstyr i industri økosystemet kan 5G muliggjøre en rekke bruksområder. Disse kan bli kategorisert innen fem kategorier (5G-SMART D1.1, 2020, Mehl et al., 2021) som vist i Tabell 2.3. AMR er et eksempel på et bruksområde for 5G som kan effektivisere intralogistikk.

<b>Bruksområde kategori</b>
<b>Fabrikk automatisering</b>
<b>Prosess automatisering</b>

Tabell 2.3: 5G bruksområder.

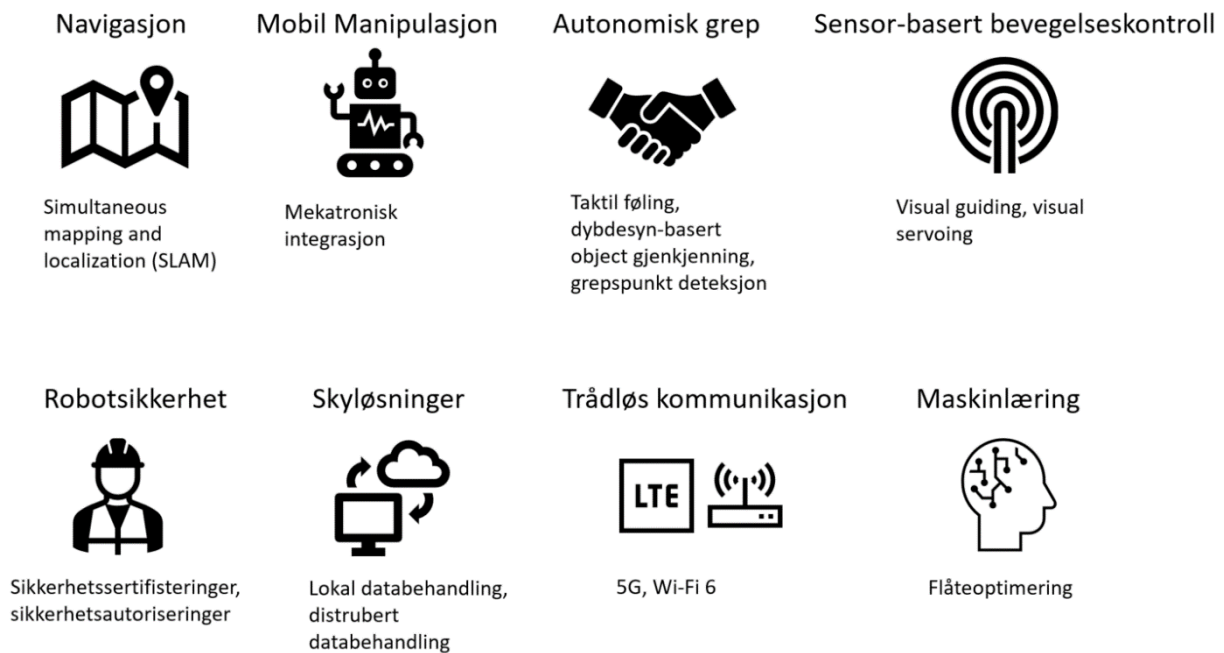
### 2.3.1 Autonome Mobile Roboter

Autonome mobile roboter (AMR) er en av de ni teknologiske søylene i Industri 4.0 og har blitt et fremtredende verktøy for materiell håndtering og intralogistikk. De er sentrale i Industri 4.0 framskritt (Lasi et al., 2014) og tillater fabrikker å realisere aspirasjoner om virtualisering og desentralisering (Fragapane et al., 2020). De blir satt i bruk av produksjonsselskap over hele verden, leverandører utvikler stadig nye og bedre versjoner, og det er blitt et populært område for forskere (Andersen et al., 2017). Teknologisk utvikling og lavere kostnader for AMRer er viktige drivere for utbredt bruk. Det er ventet at smarte fabrikker som vil integrere produksjonslinjer og samleband med AMRer, samarbeidende roboter, og forbedrede manuelle arbeidsstasjoner vil bli mer vanlig (Indri et al., 2019). Det finnes et bredt utvalg av AMRer med ulike applikasjoner og utstyr, i tillegg utvikles det raskt nye typer som gjør det vanskelig å finne en konkret definisjon (Indri et al., 2019). Fragapane et al. (2021) definerte AMRer på følgende måte, *“Autonome Mobile Roboter er industrielle roboter som bruker en desentralisert beslutnings-prosess for kollisjonsfri navigasjon for å gi en plattform for materiell håndtering, samarbeidsaktiviteter, og utfyllende tjenester innenfor et avgrenset område”*.

I likhet med AMR er Automatiske Guidede Fartøy (AGV) brukt til intralogistikk. Hovedforskjellen mellom de to er at AGVer følger preprogrammerte ruter for å navigere (ABI Research, 2020). Dette kan være to-dimensjonale strekkoder, radiofrekvensidentifikasjon eller magnetisk teip plassert på bakken som sensorer på AGVen registrer og følger. Flåten med fartøyene er kontrollert av operativsystemet til robotene som kontrollerer bevegelse, og et styringssystem som gir instruksjoner. Innebygde sensorer i AGV-ene unngår at de kolliderer med bevegelige hindre og kan utløse hendelser når de kommer i nærhet. For eksempel bruker Oslo universitetssykehus AGVer til å frakte varer internt i sykehuset, der de følger preprogrammerte ruter mellom varemottak og lokale leveringpunkter (Helse Sør-øst, 2018). De bruker de innebygde sensorene i AGVene til å kommunisere med egne vareheiser for å unngå trafikk.

Nøkkeldrivere for AMRer i industri 4.0 er ikke bare mangel på arbeidskraft og en eldrebølge, men også økt behov i andre sektorer som bygg og anlegg, e-handel, restauranter og helse (Leung et al., 2021). I for eksempel en studie gjort av Leung et al. (2021) demonstrerte de konstruksjonen av trebygg ved hjelp av autonome roboter. Derfor er AMR et av de mest velutforskede bruksområdene. 5G-SMART har identifisert noen av teknologiene som muliggjør slike bruksområder (5G-SMART D4.3, 2022). De grupperte teknologiske framskritt i åtte kategorier: Navigasjon, mobil manipulasjon, autonomt grep, sensorbasert bevegelseskontroll, robotsikkerhet, skyløsninger eller lokal databehandling, trådløs kommunikasjon og maskinlæring. Figur 2.3 viser oversikt teknologiene som trengs for helt autonome landskap.





**Figur 2.3: Nøkkelteknologier for AMR-en**

Alle disse teknologiene går hånd i hånd for at AMR skal fungere i komplekse miljø og utføre forskjellige oppgaver. Mobilitet er en selvfølge fordi å ha en robot på hver eneste jobbstasjon kommer til å være alt for kostbart. Dette er spesielt viktig der operasjoner ikke er kontinuerlige eller lit forutsigbare. Mobilitet tillater AMRen og bevege seg fram og tilbake mellom stasjoner ved behov. Navigasjon og sensor-basert bevegelseskontroll er derfor kritisk for at robotene skal kunne være mobile og autonome. Teknologisk utvikling som sanntidslokalisering og navigering (SLAM), og lysdeteksjon og rekkevidde (LiDAR) vært nøkler for å få robotene autonome. Fri navigasjon gjør at roboten kan navigere og samhandle med verden uten å kollidere med hindringer, mennesker og andre roboter. Videre er grepet og bevegelsen til roboter vært en begrensende faktor. Med dybdesyn kan AMR lettere plukke opp og ta med seg ting i farten. Dette er fortsatt under utvikling og man kan fortsatt ikke sammenligne roboters egenskap til å plukke opp ting med mennesker (Fragapane et al., 2021). Men fremgang på autonomisk grep og mobil manipulasjon blir et hav av bruksområder for AMRene muliggjort. Med slike egenskaper er sikkerhet et viktig tema. Dette inkluderer sikkerhet i menneske-maskinmiljø og sikker håndtering av materiell. Testing av nye sensorer blir i stor grad gjort for å møte standarder som skal sikre både mennesker og last i autonome miljø. Den neste teknologien som har vært begrensende er kommunikasjonsteknologien. Skyløsninger og trådløs kommunikasjon er essensielt for mobilitet, da tidligere kabelløsninger er veldige sårbare og kan hindre bevegelse. 5G, lokaldatabehandling og maskinlæring gjør at styringssystemer og sanntidskontroll av flåten nå er enklere ved at intensive beregninger for maskinarmen kan gjøres på en lokal server. Kort oppsummert gjør alle disse teknologiene sammen at AMRene kan bevege seg fritt rundt i komplekse miljø og håndtere oppgaver som krever materiell håndtering og samhandling med maskiner og mennesker. De forskjellige teknologiene utgjør flere nivå med kontroll, både lokalt på robotene ved navigasjon og globalt ved flåtestyring.

Design av intralogistikksystem med AMRer er forskjellig fra tradisjonelle design på grunn av de ulike egenskapene til fartøyene. AMRene operer uten førere, har et lite fysisk fotavtrykk og kan bli konfigurert til å operere i et bredt spekter av ulike miljø ved å utføre ulike aktiviteter. Hvis fartøyene blir satt ut i et eksisterende miljø er det to viktige avgjørelser som tas. Den første er størrelsen på

flåten og den andre er egenskapene til topmodulen (Andersen, 2021). Størrelsen på flåten er i stor grad avhengig av arkitekturen i fabrikken, reisedistanser, lasting og avlasting, og flyten på materiell. Egenskapene til toppmodulen bør ta hensyn til produkttegnegenskaper som vekt og størrelse. I nye miljøer eller i store prosjekter kan hvert steg i prosessen vurderes og knyttes opp mot introduksjonen av AMR-er. For eksempel kan lasting og avlasting ha stor innvirkning på antall fartøy som skal kjøpes og på trafikk problem hvor det kan dannes køer (Alizaon et al., 2009). Lastestasjoner på maskiner kan redesignes, bli utstyrt med nytt utstyr eller bli fjernet avhengig av topmodulen på AMR-ene. Arkitektur og produksjonsmiljø kan restruktureres for å tilrettelegge for mer fleksibilitet, med for eksempel å modulere produksjonsceller med større variasjon i produksjonsrutene fordi dagens AMR-er har færre restriksjoner enn tidligere utgaver. Det er også mulighet til å utføre forskjellige andre oppgaver avhengig av topmodulen. Ansatte kan bli frigitt fra intralogistiske oppgaver og heller fokusere på verdiskaping. Derfor er AMR et godt alternativ, fordi målet for enhver aktør er å lage et effektivt, fleksibelt og skalerbart intralogistikk-system som utfyller produksjonsmiljøets krav til riktig og tidsnok levering.

I industrien er trådløse kommunikasjonsbaserte løsninger implementert omfattende for å kontrollere og styre AMR-ene (Zhan og Yu, 2018). Likevel er måtene 5G kan være nyttige for AMR-er i industrien fortsatt ikke helt utforsket (Oyekanlu et al., 2020). Samtidig er det en rekke utfordringer med eksisterende AMR teknologier som 5G kan være løsningen til. Oyekanlu et al. (2020) oppsummerte flere AMR utfordringer knyttet til smart produksjon. Navigeringsmetoder må være pålitelige og robuste mot forstyrrelser på fabrikkgulvet. Lasernavigeringsmetoder er populært, men kan være sårbare mot rotete og tap-av-synsmiljø (Kelly et al., 2007). I tillegg brukes ofte kunstige landemerker for laserbasert navigering (Kirsch og Rohrig, 2011), men slike landemerker kan være ugunstig for operasjonell sikkerhet. For å garantere operasjonell sikkerhet kan laserrekkeviddefindere installeres, men det kan være dyrt å installere ny infrastruktur i eksisterende produksjonsmiljø. Med 5G kan slike utfordringer forsvinne.

## 3 Metodikk

Dette kapitlet beskriver metodikken brukt til å adressere de tre forskningsspørsmålene. Forskningsspørsmål 1 ble besvart ved å undersøke det norske markedet, det globale markedet og ved å gjennomføre en litteraturgjennomgang av forskningsprosjektet 5G-SMART. Dette er beskrevet i kapittel 3.1. Forskningsspørsmål 2 ble besvart ved å utvikle et rammeverk basert på prosedyren beskrevet i kapittel 3.2. Økonomiske og tekniske modeller til rammeverket som besvarer forskningsspørsmål 3 ble testet i en norsk fabrikk, som beskrevet i kapittel 3.3

### 3.1 Kvalitativ gjennomgang

For å finne relevante aktuelt teknisk nivå på 5G-bruksområder, nettverksalternativ og forretningsmodeller, og for å adressere forskningsspørsmål 1 ble det gjennomført undersøkelse av det norske markedet, det globale markedet og litteraturgjennomgang av forskningsprosjektet 5G-SMART. Undersøkelsene av det markedene ble gjort ved interresantgjennomgang, via offentlige register og statlig informasjon, og ved semi-strukturerte intervju med fagpersoner. Ved å undersøke resulterende artikler og informasjon ble områder som påvirker nettverksalternativ, forretningsmodell og valg av bruksområder, eller sammenhengen mellom dem, funnet. Dette resulterte i en oversikt over faktorer som må adresseres når man skal sette opp et privat 5G nett basert på bruksområder. Artikler fra litteraturgjennomgangen er også tilstede i introduksjonen, den teoretiske bakgrunnen og for forskningsspørsmål 2 og 3 når det er til nytte for enten å definere eller adressere forskningsmålet for denne oppgaven.

Denne tilnærmingen med å se på markedet globalt og i Norge var passende på grunn av den utforskende naturen til forskningsspørsmålet. I tillegg er bruken av private 5G nett mer utbredt utenfor Norge, samtidig som det er faktorer som gjelder kun i Norge. I tillegg er forskningen på private 5G mye drevet av leverandører og ikke helt utforsket. Dette krever gjennomgang av interessenter på nett, og informasjon fra bransjen som har kommet lengst ved semi-strukturerte intervju og møter. Samtidig er private 5G nettverk ikke et veldig godt etablert forskningsfelt, og det krever omfattende litteratursøk i databaser på nett. På samme måte er det institusjoner som arbeider med internasjonale standarder basert på forskning og kommersielt behov. Slike forskningsprosjekt har som mål å etablere forskningsfeltet, utvikle standarder og utvikle teknologien. I tillegg består de ofte av konsortium mellom offentlige institusjoner, universitet, leverandører og andre interessenter. Derfor er det passende å gjennomgå det mest moderne forskningsprosjektet på feltet som bygger videre på eksisterende forskning og standarder, nemlig 5G-SMART. I tillegg ble andre relevante forskningsartikler ble gjennomgått der det var nødvendig. Markedsundersøkelsene og litteraturgjennomgangen tillot oppgaven å utvikle resultater basert på moderne forskning og informasjon fra interessenter.

#### 3.1.1 Markedsundersøkelser

Markedsundersøkelsene ble gjennomført i tre ulike faser på grunn av det brede og fragmenterte feltet innenfor private 5G nettverk. Den første fasen bestod av semi-strukturerte intervju, interne møter, foredragsrapporter og dokumentasjon direkte fra selskap. Den andre fasen bestod av offentlig dokumentasjon fra diverse kilder. Den tredje fasen bestod av selskapsspesifikk informasjon og datainnhenting for evaluering av rammeverket.

**Fase 1:** Fordi mobile nettverksoperatører (MNO) og nettverksleverandører stiller en veldig stor rolle i utviklingen og applikasjoner av private 5G nettverk sitter de på veldig mye relevant informasjon. Samtidig er det en del av denne informasjonen sensitiv eller hemmelig, spesielt gjelder dette prismodeller og tekniske løsninger som gir konkurransefortrinn. I samsvar med forskningsmål fikk forfatteren begrenset tilgang på informasjon fra Ericsson og Telenor som oppgaven skrives i

samarbeid med. Forfatteren var under taushetsplikt som nødvendiggjorde at sensitiv informasjon og data ble ekskludert fra rapporten, selv om enkelte konklusjoner er tatt på dette grunnlaget. Dette kan rettfærdiggjøres ved at slike konklusjoner også har støttende informasjon fra andre kilder diskutert i dette kapitlet, og derfor hentes det informasjon fra et bredt register av kilder. På grunn av den utforskende naturen til forskningsspørsmålet ble det gjennomført semi-strukturerte intervju med aktuelle personer i begge bedrifter. Det betyr at det både var forberedte og spontane spørsmål, slik at intervjuene ble gjennomført mer som en samtale. Notater ble tatt sporadisk på nøkkelpunkter. Det ble også hentet informasjon fra interne møter der notater ble gjort på samme måte. Både forberedte spørsmål og notater fra intervju, og interne møter er tilgjengelig i vedlegg seksjonen. Samtidig fikk forfatteren tilgang på interne dokumenter

**Fase 2:** Siden private 5G nettverk er i et voksende marked og veldig relevant da oppgaven ble skrevet gir offentlige medier, industrielle magasiner, rapporter fra konsulenthus og lignende en kontinuerlig strøm av informasjon. Der er det også blant annet historier fra applikasjoner i industrien. Utvalgte utgivelser har blitt inkludert siden informasjonen sannsynligvis kommer direkte fra aktøren eller interessenter med tilgang til informasjonen fra industrien. Veldig få forskningsartikler diskuterer implementeringen av 5G i selskap, og denne mangelen på forskning rettfærdiggjør innhenting av slike alternative kilder til informasjon. Likevel er ingen konklusjoner tatt basert på slike kilder, men det tilføyer perspektiv til diskusjonen som mangler i forskningslitteratur. Av samme grunn er det også inkludert noen publiserte norske master eller doktoroppgaver i søket for å inkludere norske perspektiv. Videre er det inkludert flere *white papers* fra relevante aktører for ulike teknologier innen private 5G nettverk for å forklare aktuelt teknisk nivå. Enkelte aktører og institusjoner har blitt valgt for å finne de eksisterende løsningene/standardene, og for å hjelpe med å kvantifisere noen av de tekniske spesifikasjonene på nettverksalternativene og bruksområdene. Ericsson, ABB, Next Generation Mobile Networks (NGMN), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 3rd Generation Partnership Project (3GPP) og 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) ble valgt som kilder for dette fordi de er referert i forskningsartikler, industrielle applikasjoner og informasjon tilgjengelig for forfatteren. Til slutt er det hentet informasjon fra relevante statlige etater og myndigheter for å adressere regulerings spørsmål og for å hente offentlig statistikk/data som kan brukes i rammeverket. Statistisk sentralbyrå (SSB), Nasjonal kommunikasjonsmyndighet (Nkom), International Labor Union (ILO) og International Telecommunications Union (ITU). Denne informasjonen er samlet fra deres respektive nettsider på internett.

**Fase 3:** For å bruke rammeverket utviklet fra den kvalitative gjennomgangen i en teoretisk analyse krevdes det selskapsesifikk data. Dette ble gjennomført ved å se på offentlig tall som rapportertes til myndighetene fra selskapet. Slike tall blir revidert og offentliggjøres på både på statlige sider og via årsrapporter fra selskapet. Rammeverket krevde også informasjon kun selskapet sitter på. Siden analysen gjøres uten direkte støtte fra selskapet ble slik informasjon tolket basert på selskapets årsrapport ut i fra forfatterens forståelse. Dermed ble det også tatt noen antagelser. Slike antagelser var nødvendig der informasjon og data ikke var tilgjengelig. For å estimere tall ble det gjort ytterligere litteratursøk og generelle søk på internett for å ha noe å basere antagelsene på. Selskapet som ble evaluert var Norsk Hydro. All selskapsesifikk informasjon ble hentet fra nettsiden til Hydro på internett mellom mars og juni i 2022 (Hydro, 2022).

### 3.1.2 Litteraturgjennomgang

Litteraturgjennomgangen ble gjennomført som en integrativ litteraturgjennomgang fordi intensjonen var å kombinere perspektiver for å skape nye teoretiske modeller. Og ikke for å gjennomgå all publisert materialet på emnet (Snyder, 2019). Den integrative gjennomgangen passer

bedre for å bedømme tidligere forskning når nye teoretiske rammeverk og perspektiv er målet (Torraco, 2005). Dette passet oppgaven best fordi denne metoden med litteraturgjennomgang er i tråd med målet med oppgaven – nemlig å få et nytt perspektiv på et uetablert felt. Siden denne typen litteraturgjennomgang mangler en fast struktur er databaser, søkestrategier og filtreringsprosesser beskrevet nedenfor for å tillatte replikasjon og validering.

De tre databasene som ble brukt var 5G-SMART, Oria og Google Scholar. Dette dekte et bredt og tilfredstillende assortiment av forskningsartikler. 5G-SMART databasen er helt åpen på nett, men for de to andre det var noen faktorer som var utenfor forfatterens kontroll. Kun artikler skrevet på engelsk tilgjengelig via Universitetet i Stavanger (UiS) sin lisens kunne bli brukt. Grunnen til dette var manglende litteratur på norsk. Søkeresultatene utenfor 5G-SMART var begrenset til det som var tilgjengelig mellom januar og juni i 2022. Relevante artikler funnet i litteratursøkene ble også inkludert når det var anset som egnet ved å bruke en *backwards snowballing method*.

Søkestrategien i Oria og Google Scholar er basert på *building blocks* søk med Boolske operatører. Forskjellige nivåer med søk er kombinert for å tillate databasene å returnere relevante artikler. Sammen med de Boolske operatørene ELLER og OG, blir søkeordene sjekket mot titler, abstrakt og nøkkelord i publiserte artikler. Tabell 3.1 presenterer søkeordene som ble brukt. Nivå 1 søkeord er generelle fraser som er kombinert med nivå 2 søkeord for å spesifisere konteksten med søket. Nivå 2 A søkeord representerer forskjellig nomenklatur til private 5G nettverk og finner relevant forskning på private 5G nettverk i nivå 1 søkeordene. Nivå 2 B søkeord hjelper med å spesifisere nivå 1 søkeord ved å produsere mer pålitelige resultater innenfor interesseområdene. Nivå 2 A og 2 B søkeord ble også kombinert for å identifisere forskning som relaterer direkte til målet med denne oppgaven. Utvalget av søkeord er basert på vanlig nomenklatur til emnet kjent til forfatteren og erfaring fra tidligere søk.

Nivå 1	Nivå 2 A	Nivå 2 B
Manufacturing	Non-public network(s), NPN(s)	Industry 4.0
Industrial	Private mobile network(s)	Use case(s)
Production	Private 5G network(s)	Architecture
Deployment		Options
Techno-economic		Design
		Edge computing
		Autonomous mobile robot(s), AMR(s)
		Digital twin
		Analysis

**Tabell 3.1: Søkeord.**

Filtreringsstrategien var basert på titler, abstract, siteringer, fagfelle vurdering og full tekst. Dette var hjelpsom ettersom bruksområdene til private 5G nettverk er et fragmentert felt mellom ingeniør disipliner. Bruksområder finnes i produksjon og logistikk, men også kybernetikk og robotikk, elektronikk, informasjonsteknologi, og relaterte felt. Evaluering av titler og abstrakt eliminerte artikler fra feil felt, og full tekst screening avslørte relevanter artikler for problemstillingen. Feltet for private 5G nettverk utvikles raskt, derfor var de nyeste artiklene vurdert som mest relevant. Samtidig ble artikler med fagfelle vurdering og/eller høyt antall siteringer prioritert. Derfor er en rekke vitenskapelige tidskrift representert i litteraturen. På den andre siden, ble noen eldre artikler brukt for å beskrive historiske utviklinger og etablerte felt som produksjonsmiljø. I tillegg, ble noen norske artikler brukt der det var vurdert som relevant.

Siden 5G-SMART databasen består av et begrenset antall artikler var søkestrategien og filtreringsprosessen i 5G-SMART relativt rett fram. Prosjektet var delt opp i seks arbeidspakker (AP) som vist i Figur 3.1. I AP1 ga de en oversikt over 5G integrasjon i produksjonsmiljøet. I AP2, AP3 og AP4 hadde de prøveprosjekt og validering av 5Gs egenskaper i tre ulike fabrikker. I AP5 jobbet de med å optimalisere 5G for smart produksjon. Til slutt, i AP6 la de fram forslag til standarder og forslag til videre arbeid. Resultatene fra forskningen er publisert som leveranser under de ulike arbeidspakkene og ble referert som D1.1 til D6.3 som vist i Figur 3.1. Siden 5G-SMART databasen og korrespondere forskningsartikler er oversiktlige ble filtreringsprosessen en enkel eliminasjonsøvelse basert på målene i hver AP. Først ble AP-er ekskludert ved å se på mål, AP5 og AP6 har ikke mål ikke relevante for denne oppgaven å ble dermed ekskludert fra gjennomgangen. AP1-AP4 ble filtrert på tittel, relasjon til andre dokumenter og *executive summary* på samme måte som i litteraturgjennomgangen.

5G-integrasjon inn i produksjonsmiljø	5G-SMART eksperiment for evaluering og validering av 5G egenskaper og bruksområder			5G-optimalisering for smart produksjon	Etter 5G-SMART
AP1	AP2 (Kista)	AP3 (Aachen)	AP4 (Reutlingen)	AP5	AP6
Oversikt over nye produksjons-bruksområder Forretningseffekt-analyse Evaluering av alternative radio implementeringer i fabrikker	Eksperimentering og validering for 5G-støttede industrielle roboter	5G for forbedrede industrielle produksjonsmiljø	Eksperimentering og validering av 5G i en halvlederfabrikk	5G nettverks-arkitektur for smarte fabrikker Avanserte 5G egenskaper Nettverks-administrasjon	Forslag til standarder Utnyttelse i framtidige produkter Tidlig tilpasning av 5G
D1.1 – D1.5	D2.1 – D2.3	D3.1 – D.3.4	D4.1 – D4.4	D5.1 – D5.5	D6.1 – D6.3

**Figur 3.1: Arbeidspakker og mål i 5G-SMART prosjektet, basert på 5G-SMART D7.4 (2022).**

### 3.2 Utvikling av rammeverk

For å adressere forskningsspørsmål 2 ble det foreslått et rammeverk for å velge passende nettverksalternativ i et norsk produksjonsmiljø med gitte karakteristikk. Behovet for et slikt rammeverk ble identifisert i løpet av oppgaven siden et slikt verktøy mangler i litteraturer og hos aktører. Informasjonen fra de ulike kildene fra forskningsspørsmål 1 ble kombinert for å utvikle rammeverket i to ulike faser med flere steg.

#### Intern analyse – Valg av bruksområde

Framgangsmåtene hentet fra forskningsspørsmål 1 ble kombinert til et eget stegvis rammeverk for å velge bruksområde. Framgangsmåtene inkluderte tekniske mål og selskapsesifikk informasjon fra en fabrikk. En slik kombinasjon var passende fordi forskningen ga et bredt grunnlag som kunne innsnevres via informasjon fra leverandører. Rammeverket ble delt opp i flere steg, der vært steg inkluderte enten objektive mål fra industriaktøren eller kvantitativ data. Målene og produksjonsmiljøet til bedriften vil bestemme hvilket bruksområde som er aktuelt ved å identifisere hvilke prosesser som kan forbedres. Utvelgelsen av tekniske mål og kvantitativ data var basert på denne logikken som er støttet av litteraturfunn fra lignende studier og input fra private nett leverandører. Antall bruksområder ble begrenset til de som ble bedømt av mest aktuelle ut i fra forskningsspørsmål 1. Dette var fordi det er utallige alternativer hvor mange av de er et eget forskningsfelt. I tillegg, utvikles det stadig flere da private 5G nett er et såpass nytt felt.

- **Steg 1 – Kvalitativ analyse:** Disse tekniske målene sammen med en oversikt over produksjonsmiljøet ble basert på de viktigste målene funnet direkte fra kilder i forskningsspørsmål 1.
- **Steg 2 – Kvantitativ analyse, valg av viktige karakteristikk:** Hvilken kvantitativ data som trengtes var basert på målene industriaktøren velger. Disse kvantifiserbare tallene ble basert på kildene fra forskningsspørsmål 1.

### Ekstern analyse – Valg av nettverksalternativ

Siden bruksområdet setter krav til kommunikasjonskrav som tidsforsinkelser og hastighet fokuserte denne delen av rammeverket på å finne ut hvilke nettverksalternativ som passet best til hvilket bruksområde. Basert på forskningsspørsmål 1 ble det identifisert applikasjonstjenester til bruksområdet. Applikasjonstjenestene bestemmer kommunikasjonskrav som igjen setter krav og KPI-er. Ut i fra disse kravene og KPI-ene vil man se hvilke forretningsmodeller som er tilgjengelige. Tilslutt, vil dette avgjøre et av nettverksalternativene identifisert i forskningsspørsmål 1. Kort oppsummert blir nettverksalternativet valgt både på kvantitativ og kvalitativ data. Siden de ulike nettverksmodellene fortsatt trenger mer forskning i forhold til ytelse og hvilke tjenester de støtter ble det også nødvendig å ta noen antagelser.

- **Steg 1 – Identifisere applikasjonstjeneste:** For å finne ut hvilken applikasjonstjeneste det aktuelle bruksområdet bruker ble framgangsmåten funnet i 5G-SMART brukt. For å oppnå fjernstyrt autonomi må for eksempel en AMR ha sanntidskontroll og/eller sanntidssensorer. Her identifiseres hvilke applikasjonstjeneste(r) bruksområdet trenger som sanntidskontroll og ultra-høy definisjonsvideo.
- **Steg 2 – Identifisere kommunikasjonsstjeneste:** Med de tilgjengelige standardene på private 5G nett er det avveininger mellom de ulike kommunikasjonsstjenestene, det vil si at det ikke er mulig å bygge ut et 5G nett for alle på en gang. Kommunikasjonsstjenestene ble identifisert tidlig og består av eMBB, URLLC eller m-MTC.
- **Steg 3 – Finne krav og karakteristikk:** Etter kommunikasjonsstjenesten er identifisert må krav som tidsforsinkelser, pålitelighet og ytelse med UL/DL-hastighet defineres. Disse ble funnet i resultatene fra forsøkene i 5G-SMART fra forskningsspørsmål 1. Her må det også defineres karakteristikk som sier om det er nødvendig med lokal databehandling og ekstra datasikkerhet. Samtidig knytter man sammen karakteristikk fra de tidligere stegene som produksjonsmiljø og tekniske mål for å finne den passende forretningsmodellen.

### 3.3 Validering av rammeverk

For å validere det foreslåtte rammeverket slik at forskningsspørsmål 3 kan bli besvart, ble det foreslått formler for kostnadsestimering og kvantifisering av tekniske mål. Disse er basert på generaliserte og forenklede scenarier for produksjonsmiljø. Siden private 5G nettverk kan bringe fordeler som ikke er økonomiske ble det utviklet tekniske mål for å måle andre effekter. Relevante KPI-er basert på konkret kvantifiserbar data ble utviklet for hvert av de tekniske målene. Dette muliggjør bedre forståelse av effekten til 5G applikasjoner.

Økonomiske modeller ble brukt for å estimere verdien av investeringene før casestudien på den norske fabrikken. Disse inkluderte identifiserte faktorer som driver kostnadene ut i fra de forskjellige nettverksalternativene og bruksområdene. Flere antagelser begrenset de presenterte matematiske modellene for tekniske, og de er ikke ment som en nøyaktig modell for å måle fordeler med 5G applikasjoner. De er heller ment til å gi en pekepinn på hva en industriaktør kan forvente av et privat 5G nettverk, som er i tråd med oppgavens hovedbidrag. Formlene måler forskjellen mellom KPI-er i fabrikken før og etter 5G applikasjoner. Siden detaljert prosessdata fra både før og under

applikasjonslevetiden kreves for å måle nøyaktige verdier, og tilgang på slik informasjon krever en ekte applikasjon. Er en slik analyse utenfor siktet til denne oppgaven.

Ytterligere litteratur var nødvendig for å utvikle de økonomiske og tekniske modellene. For de tekniske målene ble søkeordene *techno-economic analysis/assessment*, *key performance indicators*, *industry 4.0* og *smart manufacturing* kombinert for å finne relevant litteratur på området. Søkeordene *fleet sizing*, *Autonomous Mobile Robots (AMR)* og *Autonomous Guided Vehicle (AGV)* ble kombinert for å finne relevant litteratur på det feltet. De samme databasene og prosedyre for utvelgelse som presentert i Kapittel 3.1 ble brukt. Kapittel 5.1 presenterer de nye funnene kombinert med funnene i den kvalitative gjennomgangen, samt logikken bak utviklingen av formlene med antagelser. Dette tillater en evaluering av de foreslåtte formlene og etterprøvbarehet. For å svare på forskningsspørsmål 3 og evaluere rammeverket ble det utført en casestudie på en norsk fabrikk med det foreslåtte rammeverket. Dette var basert på input data fra fase 3 i Kapittel 3.1.1. I tillegg til estimerte verdier på data fra lignende teoretiske rammeverk og casestudier der datagrunnlaget manglet.



## 4 Applikasjoner av private 5G nettverk og analyse av relevante faktorer

Dette kapitlet presenterer funnene fra markedsundersøkelsene. For å få oversikt over hva 5G kan muliggjøre presenterer dette kapitlet implementasjoner og spesifikke bruksområder med mål om å finne en framgangsmåte fabrikk i Norge kan bruke. Først ble industriell bruk av private 5G nett globalt gjennomgått. Deretter ble investeringskostnader gjennomgått, en gjennomgang av reguleringer på frekvensbånd i Norge basert på offentlig informasjon fra Nkom, og intervju med Telenor. Videre ble framgangsmåter og de viktigste funnene fra 5G-SMART prosjektet presentert. I Kapittel 5 ble funnene fra dette kapitlet knyttet sammen for å utvikle et rammeverk for en framgangsmåte for industriaktører.

### 4.1 Applikasjoner av private 5G nettverk

Interessen har økt voldsomt for private 5G nettverk og mulighetene det kan bringe industrien. Og det finnes mange eksempler på applikasjoner globalt. GM investerte 2.2 milliarder amerikanske dollar i sin nye flaggskipsfabrikk for elbiler i 2020. Denne fabrikk ble den første i USA som implementerte et dedikert privat 5G-nettverk med Verizons 5G Ultra Wideband service som er nettverk basert på eMBB. GM bruker dette nettverket til pålitelig kommunikasjon mellom roboter og sensorer, internlogistikk ved AMR, samt til kommunikasjon mellom arbeiderne. Til sammen er det tusenvis av tilkoblede enheter på en fabrikk på over 370 000 kvadratmeter. Bosch, som allerede har brukt private 5G nettverk en stund og var en del av konsortiet i 5G-SMART, har planer om å implementere private 5G nettverk på flere av sine fabrikk. Nettverket brukes til blant annet til å redusere vedlikehold. Ford har installert et privat 5G nettverk i en av sine fabrikk for el-bil produksjon. Der brukes det blant annet til å se data fra en sveisemaskin som har 1000 sveisepunkter per enhet og krever levering av en halv million datapunkt per minutt. Fujitsu har allerede kommet langt i sine applikasjoner av private 5G nettverk. Der bruker de 4.7 GHz-båndet for å støtte sanntidskontroll av AMR-er, og 28 GHz-båndet for å støtte sanntids analyse fra et 4K kamera med kunstig intelligens. Til slutt brukes nettverket til å støtte de virtuelle virkelighets brillene Microsoft HoloLens 2 til opplæring og ekstern støtte fra eksperter.

I Norge er det tre MNO-er som tilbyr egne kommersielle nettverk til befolkningen, nemlig Telenor, Telia og Ice. Både Telenor og Telia er godt i gang med å bygge ut 5G-dekning for befolkningen med Ericsson som leverandør av RAN. De to er desidert største basert på antall kunder og ansatte, og de har store planer om å satse på private nett. I dag tilbyr Telenor og Telia private 5G nettverk som servicenivåavtaler som betyr at løsningen er spesifikk for kunden. Det tilbys både avtaler for SNPN, og to varianter av PNI-NPN gjennom skivedeling eller delt kjernenett (Lorentzen, 2022 ). Slike avtaler baseres på en rekke faktorer. Priser på de avtalene som tilbys av Telenor og Telia er ikke tilgjengelig. Samtidig er det foreløpig veldig få industrielle applikasjoner av private 5G nettverk i Norge. Et eksempel på de som finnes er på Yaras anlegg for produksjon av kunstgjødsel på Herøya. Der er det Telenor som har levert et PNI-NPN ved skivedeling over 3,6 GHz og 26 GHz-båndene (Intervju A.3, Telenor, 2022, Inside Telecom, 2022). PNI-NPN-et er skreddersydd for bruksområdene som krever eMBB. Bruksområdene på Herøya inkluderer flere applikasjoner for å automatisere fabrikk og lasteanlegget. 5G brukes til automatisering av autonome kraner, AMR-er og fjernstyring av et autonomt skip som frakter kunstgjødsel fra Herøya til en terminal i Brevik. De autonome kranene brukes til å laste kunstgjødsel over til skipet. Et teknisk problem de støttest på for kranene og båten gjaldt styringsalgoritmene. De autonome kranene lastet kun en side av skipet og det kunne føre til kantring (Intervju A.3, Telenor, 2022). Og det derfor viktig å planlegge alle prosesser nøye. Videre blir AMR-flåten brukt til intralogistikk mellom produksjonslokalet og kranene. For å oppnå full autonomi er AMR-ene utstyrt med kamera, der det foreløpig testes for å optimalisere flåten (Inside Telecom,

2022). Denne applikasjonen tok over to år å ferdigstille på grunn av omfattende testing før de offisielt åpnet det industrielle 5G-nettet i mai 2022 (Inside Telecom, 2022).

## 4.2 Investeringskostnader

For å sette opp og operere er det noen nødvendige funksjoner som krever såpass høye kostnader at ikke alle aktører har råd til det. Derfor kan et nettverksalternativ være teknologisk gjennomførbart, men økonomisk ikke utførbart. Investeringskostnadene kan deles opp i kapitalutgifter (*Capital expenditure*, CAPEX) og driftsutgifter (*Operational expenditure*, OPEX). CAPEX og OPEX for et privat 5G nettverk utenom industriaktørens utstyr som maskiner, roboter, etc. kan splittes opp i flere kategorier som burde tas inn i betraktning før man investerer. I 5G-ACIA identifiserte de åtte CAPEX kategorier og fire OPEX kategorier som er vist i Tabell 4.1 (5G-ACIA, 2019). Både kategoriene og kostadene er avhengig av hvilke nettverksalternativ og assosiasjonsmodeller man går for. Der for eksempel delt kjernenett eller RAN kan få ned kostnadene for maskinvare, programvare og integrasjon. Samtidig er det forutsett at prisnivået på 5G-utstyr skal synke. Tidligere nettverkskostnader falt voldsomt etter de første årene og etterhvert som antall industrielle applikasjoner økte. På samme måte forventes 5G kostnader å halveres allerede neste år (Intervju A.1, Ericsson, 2022).

CAPEX		OPEX	
<b>5G brukerenheter</b>	Modem, rutere, smarttelefoner og simkort	Drift og vedlikehold	Personell for vedlikehold, enhetsadministrasjon, drift og overvåking av programvare, rådgivning ved feil og maskinvare
<b>5G RAN</b>	Antenne, radio, celler, baseband, integrasjonspersonell	Leie	For området med nettverksutstyr
<b>5G Kjernenett</b>	Servere, programvare funksjoner og integrasjonspersonell	Strøm	For nettverksutstyr
<b>5G Frekvensbånd</b>	Avhengig av nasjonale reguleringer	Leie for backhaul	Kun hvis backhaul blir leaset
<b>Fronthaul fiber</b>	Kabling mellom RAN og baseband		
<b>Backhaul fiber</b>	Kabling mellom RAN og kjernenett		
<b>Lokal skyløsning</b>	Servere og programvare		Personell
<b>Nettverksadministrasjonssystem</b>	Switcher, rutere, brannmurer og programvare		Personell

**Tabell 4.1: Investeringskostnader knyttet til nettverk.**

På toppen av nettverkskostnadene kommer kostnadene knyttet til maskinvare og programvare for industrielle applikasjoner av bruksområder. Disse kostnadene vil også stå for den største delen av

investeringene (Intervju A.1, Ericsson, 2022). I tillegg er ikke 5G modent nok til at det finnes mange leverandører som leverer ferdige løsninger til for eksempel en 5G-tilkoblet AMR-flåte. Priser og tilbud på løsninger krever at man snakker med leverandøren og ber om anmodning om tilbud (Intervju A.1, Ericsson, 2022). For å lettere navigere leverandører og for å akselerere industri 4.0 transformasjonen har Ericsson dannet partnerskap med en rekke selskap innen maskinvare og enheter, programvare og profesjonelle tjenester. Det kan være en god plass å starte for industriaktører når de skal lete etter leverandører (Intervju A.1, Ericsson, 2022). Prisen på investeringskostnadene krever tilgang på prisen på de enkelte komponentene og mye av det er ikke vidt tilgjengelig eller i prototype stadiet enda (5G-SMART D1.3, 2021). I tillegg kan det være vanskelig å estimere pris på programvareutvikling, radioplanlegging, rådgivning, drift og vedlikehold. Videre er slike priser ofte konfidensielle, sensitive eller rett og slett utilgjengelig på grunn av konkurranse og høy individuell tilpasning. Likevel, er det viktig å vite hvilke økonomiske faktorer som er relevante for investeringen slik at det blir enkelt å gjennomføre økonomiske analyser når man får tilgang på prisinformasjon.

### 4.3 Reguleringer av frekvenser i Norge

En annen viktig faktor for private nett i Norge er nasjonale reguleringer. 3,6 GHz-båndet er det primære frekvensbåndet for innføring av 5G og det er definert som pionerbånd for 5G av EU (Nkom, 2022a). I Norge er det den statlige etaten Nkom som allokere spektrum, og leier ut frekvensressurser i form av frekvensauksjoner. I frekvensauksjonen for 3,6 GHz-båndet inkluderte de tilrettelegging for industri- og næringslivsaktører som et viktig punkt. Nkom ba vinnerne av auksjonen om å legge til rette for industribedrifter og andre relevante næringslivsaktører i tilstrekkelig grad slik at de kan få dekket sine spesialbehov for særlig tilpassede 5G-nett og –tjenester (Nkom, 2022a). Dette innebærer at innehavere av frekvenser i 3,6 GHz-båndet har en plikt om å tilby tilgang eller leie et geografisk avgrenset område til industriaktørene basert på rimelige anbudsforespørsler fra industriaktørene. Selv om det kun er tre MNO-er som tilbyr kommersielle nettverk i dag, kjøpte også Altibox frekvensressurser i 3,6 GHz-båndet. Dette kan bety at Norge kan ha fire tilbydere av PNI-NPN i nær framtid. Dette forsterkes av et mulig høyt avkastningskrav fra operatørene da operatørene gikk ut med store summer for tillatelsene. En oversikt over auksjonsprisene uten tildelt rabatt finnes i Figur 4.1. Rabatten innebar en utbyggingsplikt i distrikter med dårlig dekning, alle operatørene godtok forpliktelsen og fikk rabatten. Rabatten ble fordelt over auksjonen på 3,6 GHz og 2,6 GHz-båndene og ble totalt på NOK 560 000 000 fordelt på operatørene. Figur 4.1 viser innplasseringen de fire operatørene kjøpte i auksjonen.

3400 MHz		3800 MHz	
ICE	Altibox	Telenor	Telia
80 MHz	100 MHz	120 MHz	100 MHz
NOK 553 964 000	NOK 780 946 000	NOK 1 007 928 000	NOK 780 946 000

**Figur 4.1: Innplassering i 3,6 GHz-båndet.**

I tillegg til frekvensressursene i 3,6 GHz-båndet ble også 700 MHz-båndet delt ut i denne auksjonen. Disse frekvensene skal hovedsakelig brukes for utbygging i de offentlige kommersielle landsdekkende mobilnettene, men på grunn av oppfordringene fra Nkom og de høye auksjonsprisene ser man også en satsning på PNI-NPN fra operatørene i disse frekvensbåndene (Lorentzen, 2022).

Videre har Nkom åpnet for bruk av lokale nett i 3,8-4,2 GHz-båndet (Nkom, 2021) for å muliggjøre SNPN. I motsetning til 3,6GHz-båndet er disse frekvensene kun ment for lokale nett. I tillegg, skal bolker av dette båndet leies direkte av Nkom uten særskilte begrensninger på hvem som kan søke om tillatelser til bruk. De eneste begrensningene Nkom har satt er at nettverksressursene ikke skal

brukes til å utvide de offentlige landsdekkende mobilnettene, eller brukes til å dekke større dekningsflater (Nkom, 2022a). Dette betyr at industriaktører selv kan søke om å få tillatelser for frekvenser til egne private 5G nettverk. Dette muliggjør at aktører kan gå utenom operatører som Telia og Telenor, og lage sin egen løsning så lenge Nkom godkjenner bruken. Nkom planlegger å tildele to typer tillatelser for lokale nett i løpet av første halvår av 2022 (Nkom, 2021). Den første er laveffektstillatelse, denne gir aktører fleksibilitet til å plassere basestasjoner som de selv vil innenfor et definert geografisk område. Dette er tiltenkt mindre private mobilnettsløsninger innendørs. Denne tillatelsen innebærer bruken innenfor en radius på 50 meter fra en forhåndsgodkjent senterlokasjon hvor basestasjonene kan settes opp. Den andre tillatelsen er høyeffektstillatelse, denne gir godkjenning av en eneste basestasjon med høyere utstrålt effekt. Dette er tiltenkt utendørs bruk for å dekke større områder som havner, flyplasser og industriparker.

Det er også mulig å få en tillatelse som inkluderer både laveffektstillatelser og flere høyeffektstillatelser. For industriaktører er dette den mest naturlige måten å gjøre det på fordi en enkel høyeffektbasestasjon kun vil dekning i området rundt den. Dekningen vil også variere med hvor bra sikt det er mellom basestasjonen og områdene som trenger dekning. Større tillatelser vil ha større krav for innvilgelse. For eksempel må Nkom sørge for at frekvenstillatelser ikke overlapper, laveffektssystemene bruker mindre områder og har mindre utstrålt effekt og dermed kan de plasseres tett. Og motsatt, må høyfrekvenssystemer ha større plass. Søknaden om disse tillatelsene må være godt gjennomtenkt å inkludere bruk og geografisk område til en så stor grad som mulig. Videre er det også Nkom som forvalter mobile nettverkskoder (MNC). Vanligvis tildeles disse kodene mobiloperatører, som allokeres ressursene til brukerne sine via simkort som kreves for å koble til de forskjellige mobilnettverkene. Nå planlegger Nkom å dele ut MNC-ressurser og underliggende serier med mobile abonnentsidentifikasjonsnummer etter søknad til aktører som trenger dedikerte internasjonale mobile abonnentidentitets ressurser for bruk til private nett. Dette gjør at IoT-enheter kan kobles til egne løsninger på private 5G nett, uten å gå via operatør. Inndelingen i 3,8-4,2 GHz-båndet er forskjellig fra 3,6GHz-båndet ved at det er delt opp i 4 ulike båndbredder som kan gjenbrukes på forskjellige geografiske plasseringer. De ulike båndbreddene går fra 20 MHz til 80 MHz og kan brukes til både laveffekt og høyeffektssystemer. Aktører som får tildelt tillatelser i båndet til lokale nett må også betale årlig sektoravgift til Nkom. Sammenlignet med prisene mobiloperatørene betalte for innplassering i 3,6 GHz-båndet er prisnivåene for 3,8-4,2 GHz-båndet mikroskopiske. Den årlige sektoravgiften til Nkom går fra 100 NOK til 3200 NOK i året avhengig av båndbredde og effekt (Nkom, 2021). Tabell 5.2 viser oversikt over prisnivå for de årlige sektoravgiftene. Varigheten på de ulike tillatelsene varer 5 år, med mulighet for fornyelse.

Båndbredde	Laveffekt	Høyeffekt
20 MHz	100 NOK	200 NOK
40 MHz	400 NOK	800 NOK
60 MHz	900 NOK	1800 NOK
80 MHz	1600 NOK	3200 NOK

**Tabell 5.2: Sektoravgifter for ulike båndbredder i 3,8-4,2 Ghz-båndet.**

Det siste frekvensbåndet som er aktuelt for private 5G nettverk i Norge er milimeterbåndet, eller 26 GHz-båndet som er mellom 24,25-27,5 GHz. Båndet er foreløpig ikke under tildeling bortsett fra særskilte tilfeller på lab, og industrielt under testtillatelser som Telenor sin tillatelse på Yara Herøya (Nkom, 2022b, Inside Telecom, 2022). Båndet ble harmonisert i EU for mobilkommunikasjon av ITU-R i 2019, og det er planlagt frekvenstilldeling i Norge i løpet av de nærmeste årene (Nkom, 2022b). 26 GHz-båndet brukes i dag til radiolinjer og til satellitt-tjenester, men radiolinjene skal fases ut. Satellitt-tjenestene må beskyttes mot interferens fra bruk av 5G i båndet (Nkom, 2022b). Det betyr at bruk

av frekvensressurser i dette området må sikre fortsatt drift og utvikling av satelitt-tjenester som opererer innenfor frekvensbåndet når Nkom allokere frekvensbåndet.

Om Nkom velger å tildele frekvenstillatelser er både avhengig av bruk og geografisk plassering. For å godkjenne søknad om frekvenstillatelser til Nkom må dette tas hensyn til. Geografisk plassering er viktig for å ikke skape interferens med kommersielle landsdekkende nett, eller andre faktorer. De kommersielle nettverkene til Telenor og Telia er tilgjengelig på deres respektive nettsider i form av dekningskart. Samtidig finnes det en database på Nkom sine nettsider med oversikt over nasjonal frekvensplan. Dette kan brukes til å undersøke hvilke frekvenser som er brukt på en gitt plassering. Men detaljerte beskrivelser av plasseringer av basestasjoner, kjernenettverk og videre utbygging er konfidensielle, og kan dermed ikke undersøkes. Siden Ice ikke har påbegynt utbyggingen av 5G-nettverket sitt enda er det vanskelig å finne ut om deres nettverk overlapper en spesifikk plassering på nåværende tidspunkt.

#### 4.3 Prosedyrer og framgangsmåter for applikasjoner av private 5G nettverk

På grunn av kompleksiteten av å knytte sammen OT og kommunikasjons-IT i en fabrikk bør det individuelle produksjonsmiljøet analyseres sammen med industriaktøren (Intervju A.3, Telenor, 2022). Basert på intervju er det viktigst å starte med å analysere prosessene i fabrikkene for å finne bruksområder. Etter spesifikasjonene til bruksområdet er funnet kan nettverket planlegges.

I 5G-SMART leveranse D1.2 foreslo forfatterne en generell modell for å evaluere ett bruksområde med 5G teknologi for produksjonsbedrifter uavhengig av forretningsmodell og nettverksalternativ (5G-SMART D1.2, 2021). Denne modellen var basert kun på forskningslitteratur og inkluderte fire steg der de brukte databasert kvantifisering for teknisk og økonomisk evaluering. I steg 1 velger produksjonsbedriften ett bruksområde fra fem alternativer. Bruksområdes krav sammenlignes med 5Gs kommunikasjonstjenester for å forhåndsevaluere gjennomførbarheten opp mot trådløse kommunikasjonsteknologier. I steg 2 velges tekniske mål og produksjons KPI-er. Syv tekniske mål ble definert ut i fra literaturgjennomgang og arbeidsgrupper med industripartnerne; Fleksibilitet, mobilitet, produktivitet, kvalitet, trygghet, bærekraft og utnyttelse. Ulike produksjons KPI-er fra fabrikkene ble brukt for å beregne effekten av 5G implementering på de tekniske målene. I steg 3 blir data innhentet fra produksjonsfabrikken, fire ulike kategorier med økonomisk og bruksområde spesifikk data innhentes; Produktdata, prosessdata, sviktdata og fasilitetsdata. I steg 4 kvantifiseres de tekniske målene fra steg 2 med dataen fra steg 3. Dette gir informasjon om hvor mye bruksområdene påvirker de tekniske målene og verdien av investeringene.

Partene involvert i et privat nettverk inkluderer MNO, industriaktør og tredjepart. Rollene til de ulike partene i et privat nett (PN) kan deles inn ut i fra eierskap, nettverksalternativ, drift og administrasjon; PN operatør, Integrator, frekvensseier og PN eier vist i Tabell 5.3 (5G-SMART D1.3, 2021). Tredjepartende selskapene som ikke kan kategoriseres som verken mobilnettoperatør eller industriaktør, som for eksempel en nettverks eller programvareleverandør. De ulike partene kan ha mellom ingen og alle rollene avhengig hvilket alternativ industriaktøren går for når de skal installere det private nettet. RAN-eieren er den som eier eller har bygd ut basestasjoner med RAN til det private nettet. Vanligvis gjøres dette ved at RAN-integratoren er den parten som konfigurerer og installerer det private nettet til en valgt arkitektur for å gjøre nettet klart til bruk. Denne rollen henger vanligvis sammen med hvem som leverte utstyr til basestasjonen. For eksempel integreres basestasjoner med utstyr levert av Ericsson av Ericsson. På samme måte vil KN-integratoren også mest sannsynlig være den samme som leverte utstyret til kjernenettet. Frekvensseieren er den som har kjøpt frekvenstillatelsen av Nkom. Et eksempel på hvordan rollene vanligvis ser ut kan tas fra Telenor sitt kommersielle nett i Norge. Der planlegger MNO-en infrastrukturen med basestasjoner

og kjernenett, og bestiller utstyr fra en tredjepart som tar rollen som integrator mens MNO fyller de andre rollene

I 5G-SMART identifiserte tre ulike forretningsmodeller for SNP, to for operatørstyrte SNI-NPN og fire for PNI-NPN med delt RAN eller kjernenett oppsummert i Tabell 5.3 (5G-SMART D1.3, 2021). I PNI-SNP med delt RAN eller kjernenett er som regel mesteparten av infrastruktur og kontroll funksjoner eid og styrt av MNO-en, men det bygges ut ekstra basestasjoner eller eget kjernenett for industriaktøren.

	<b>PN operatør</b>	<b>Integrator</b>	<b>Frekvensier</b>	<b>PN eier (RAN/KN)</b>
<b>SNPN alternativ 1:</b>	Industriaktør	Industriaktør	Industriaktør	Industriaktør
<b>SNPN alternativ 2:</b>	Tredjepart	Tredjepart/Industriaktør	Industriaktør	Industriaktør
<b>SNPN alternativ 3a:</b>	MNO	MNO/Industriaktør	Industriaktør	Industriaktør
<b>SNPN alternativ 3b:</b>	MNO	MNO	MNO	Industriaktør
<b>MNO PNI-NPN alternativ 1a:</b>	MNO	MNO/Tredjepart	MNO	MNO
<b>MNO PNI-NPN alternativ 1b:</b>	MNO	MNO/Industriaktør	MNO	MNO
<b>MNO PNI-NPN alternativ 2:</b>	MNO/Tredjepart	MNO/Tredjepart	MNO	MNO
<b>Delt PNI-NPN alternativ 1</b>	MNO	MNO	MNO	Industriaktør
<b>Delt PNI-NPN alternativ 2</b>	MNO	MNO	MNO	MNO/Industriaktør
<b>Delt PNI-NPN alternativ 3</b>	MNO	MNO	MNO	Industriaktør/MNO
<b>Delt PNI-NPN alternativ 4</b>	MNO	MNO	MNO	MNO

**Tabell 5.3: Nettverksalternativ fra 5G-SMART D1.3 (2021).**

I 5G-SMART fant de at nettverksalternativ i kombinasjon med forretningsmodell kan ha stor effekt på ulike aspekt ved et privat 5G nettverk (5G-SMART D1.3, 2021). Videre kan ulike faktorer som frekvenstillatelser påvirke hvilke forretningsmodeller som er tilgjengelig. Derfor burde forretningsmodell planlegges nøye ved å vurdere følgende kriterier (5G-SMART D1.3, 2021):

- **Fleksibilitet:** Til å tilpasse seg flere bruksområder.

- **Ytelsestilpasning:** Til å optimalisere spesifikke ytelseskrav på et senere tidspunkt.
- **Interferensbarrierer mellom parter:** Relatert til (1) ekstra barrierer nødvendig for å beskytte det private nettet mot interferens, og (2) ansvarsfordeling mellom offeret til barrierer og kilden.
- **Sømløst grensesnitt mellom parter:** Kriteriet rangerer til hvilken grad assosiasjonsmodellen fasiliteter dialog og samhandling mellom parter, eller hvor enkelt det er for industriaktøren å kjøpe tjenesten i stedet for å lage den selv.
- **Forretningsmidighet:** Kriteriet måler i hvor stor grad industriaktøren kan kontrollere hvilke andre parter som er involvert og hvor enkelt forretningsmodellen kan endres.
- **Skalerbarhet og dekningsutvidelser:** Kriteriet måler i hvor stor grad det private nettet kan skaleres opp eller få utvidet dekning.
- **Basestasjon administrasjon:** Kriteriet måler hvor lett det er å sette opp og administrere fysiske basestasjoner i området.
- **Datasikkerhet:** Kriteriet måler hvor tilgjengelig verktøy, metoder og strategier for datasikkerhet er.
- **CAPEX:** Kriteriet måler hvor høy investeringskostnaden er.
- **OPEX:** Kriteriet måler hvor høy drift og vedlikeholdskostanden er.
- **Enkelhet:** Kriteriet hvor enkelt det er for industriaktører og ta steget til forretningsmodellen ved hovedansvaret ligger på de andre aktørene

Valgene som må tas dreier seg i stor grad rundt avveiningen mellom å kjøpe tjenestene eller utvikle kompetansen og ha full kontroll selv, samtidig kan CAPEX/OPEX være avgjørende. Funnene fra 5G-SMART viser at SNPN forretningsmodellene gir størst fleksibilitet for industriaktøren, men kan variere basert på hvor mye nettverkskontroll som gis til en tredjepart/MNO (5G-SMART D1.3, 2021). På den andre siden, kan en kompetent MNO/tredjepart kan også gi stor grad av fleksibilitet samtidig som industriaktøren slipper å utvikle egen ekspertise. For ytelsestilpasning kan det være en ulempe å bruke det offentlige nettverket for industriaktører som ønsker full kontroll. Det største skillet mellom forretningsmodellene gjelder interferens, og samhandling mellom andre nett i nærheten. Her er det en stor fordel å ha en MNO med på laget da de har erfaring med å administrere overlappende frekvensbånd fra kommersielle nett, der de i tillegg ofte har kjøpt store frekvensbåndtillatelser som kan brukes for det private nettet. Når det gjelder grensesnittet mellom partene er det fordelaktig å ha en integrator som kan håndtere både de industrielle tjenestene og nettverksrelaterte tjenester. På den andre siden kan avtalene som gjøres mellom partene gi lange *lock-in* perioder mellom kunder og leverandør som gjør det vanskeligere å endre leverandør (5G-SMART D1.3, 2021). Forretningsmidigheten er høyest for et MNO PNI-NPN med skivedeling der forholdet mellom MNO-en og industriaktøren er relativt kort. Den lave CAPEX-en for dette alternativet gjør at industriaktøren lett kan komme seg ut, men det kan være vanskeligere å bytte ut MNO-en hvis det er lite konkurranse. Selv om industriaktøren har full kontroll til å velge alle leverandører selv i SNPN, kan de store CAPEX summene gjøre det vanskelig å endre leverandør. Når det gjelder oppskalering og utvidelse av dekning kommer PNI-NPN best ut. Dette er fordi MNO kan bruke sine eksisterende frekvenstillatelser og basestasjoner. På den andre siden kan SNPN-brukere måtte danne nye avtaler og partnerskap for å skalere opp. På samme måte er det ofte vanskeligere for en industriaktør å administrere basestasjoner enn for en MNO, så på dette kriteriet kommer også PNI-NPN best ut. Når det kommer til datasikkerhet er SNPN i de fleste tilfeller tryggest fordi all trafikk og data holder seg hos industriaktøren. Likevel, er det tilfeller som gjør at PNI-NPN kan være tryggere. Dette er blant annet fordi at MNO-er kan innehave kompetanse og løsninger for ekstra datasikkerhet i nettverk, men dette krever ekstra tillit fra industriaktøren. Det er viktig for industriaktøren å vurdere risikoen ved at data forlater fabrikken (5G-SMART D1.3, 2021). Videre er

en av de største fordelene med PNI-NPN lavere CAPEX og OPEX. Dette gjelder for de fleste PNI-NPN alternativ bortsett fra der industriaktøren deler noe av infrastrukturen med MNO-en. Generelt blir CAPEX og OPEX redusert ved å involvere flere parter i designet, utbygging og drift av det private nettet. Til slutt er det enkleste og mest attraktive for en industriaktør å gå for PNI-NPN fordi de slipper egen ekspertise.

#### 4.4 Gjennomgang av bruksområder i 5G-SMART forskningsprosjektet

Applikasjonsområdene til smart produksjon inneholder en overflod av bruksområder med forskjellige krav til IT-infrastrukturen som må bli utfylt av den underliggende 5G-infrastrukturen. I 5G-SMART prosjektet undersøkte de syv 5G-støttede bruksområder (BO) for produksjon som vist i Tabell 5.4 (5G-SMART D1.1, 2020). Blant hovedfunnene i analysene gjort på krav og nøkkeltallsindikatorer fant de et klart behov for pålitelige, lave tidsforsinkelser og høye ytelser i den trådløseinfrastrukturen. Dette gjelder både for forsøkene i fabrikken og for fremadstrebbende bruksområder der det private 5G nettet må samarbeide med offentlige mobile nettverk. Videre fant de at 5G teknologi som lokal databehandling var en viktig driver for AI-applikasjoner ved rask lokal utførelse.

Fabrikk	Betegning	Applikasjon
Kista	BO1	5G-tilkoblede roboter og fjernsamarbeid
Kista	BO2	Menneske-maskin sanntids interaksjon ved maskinsyn over 5G
Kista	BO3	Visualisering av fabrikkgulvet med 5G
Aachen	BO4	5G for trådløs akustisk verktøy overvåking
Aachen	BO5	5G anvendelig multisensor plattform for digital tvilling
Reutlingen	BO6	Skybaserte mobile roboter
Reutlingen	BO7	TSN/Industriell LAN over 5G

**Tabell 5.4: Bruksområder undersøkt i 5G-SMART.**

BO1-3 ble evaluert på fabrikken i Kista (5G-SMART D2.3, 2022). BO1 og BO2 ble evaluert samtidig. Der fokuserte de på samarbeid mellom to stasjonære roboter og en AMR for å øke produktivitet og fleksibilitet. De stasjonære robotene skulle overlevere et objekt til den AMR-en, som igjen fraktet den til den andre stasjonære roboten. Samtidig gikk det et menneske rundt som av og til skulle blokkere veien til roboten. Maskinsynet ble realisert ved kameraer montert på veggene som fulgte markeringstagger på de bevegelige partene. De fleste funksjonene til robotene ble gjort ved lokal databehandling på basestasjonen. Dette inkluderte alle bevegsplanleggingsfunksjoner og SLAM-funksjoner. BO3 fokuserte på AR-basert visualisering av informasjon fra fabrikkgulvet for enklere trening av personell og raskere innhenting av prosessdata. Forskjellig informasjon om statusen til både de stasjonære robotene og AMR-en ble samlet inn av og visualisert i AR-headsetet. Dette var informasjon som batterinivå og planlagt bevegelse for AMRen, og tid i produksjon og estimert levetid for de stasjonære robotene. Innsamling og innledende prosessering av informasjon for visualisering ble gjort ved lokal databehandling på basestasjonen. Bruksområdene satte krav til drift, funksjon og ytelse som er oppsummert nedenfor (5G-SMART D1.1, 2020).

Driftskrav for BO1, BO2 og BO3:

- *Nettverkskonfigurasjonsadministrasjon* for å spesifisere applikasjonstjenster som ytelseskav, for å samle inn nettverksdata og for å installere programvare i lokal data behandling.
- *Feilstyring*, for å overvåke nettet og administrere problem raskt.
- *Støtte for bevegelighet*, slik at det er mulig å bevege seg rundt i fabrikken.



- *Sikkerhetsadministrasjon* for kommunikasjonstjenestene for å sikre konfidensialitet og data integritet.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO1, BO2 og BO3:

- *Ende-til-ende tjenestekvalitet* for kommunikasjonstjenester i form av tidsforsinkelser, pålitelighet og gjennomsnittlig datahastighet som dekker både RAN og kjernenett.
- *Energieffektivitet* for brukerenheter med begrenset batterikapasitet. Forskjellig maskinvare komponenter i AMR-en og AR-headsetet krever energi og derfor er det essensielt at 5G systemet minimerer energiforbruk.

Kommunikasjons ytelseskrav for BO1, BO2 og BO3 er beskrevet i Tabell 5.5 (5G-SMART D1.1, 2020).

Lokal databehandling kommunikasjonsflyt	Kommunikasjonstjenester pålitelighet/tilgjengelighet	Maksimum ende-til-ende tidsforsinkelser	Gjennomsnittlig datahastighet	Melding størrelse
Bevegelsesfunksjon til stasjonær robot	> 99.99%	< 5-40 ms	DL < 1Mbit/s UL < 1Mbit/s	500 byte
Bevegelsesfunksjon til AMR	> 99.99%	< 10-50 ms	DL < 0.5Mbit/s UL < 0.5Mbit/s	500 byte
Sensordata fra AMR	Ikke utforsket	Ikke utforsket	DL < 2Mbit/s UL < 2Mbit/s	500 byte
Status rapportering fra stasjonær robot	Ikke relevant	Ikke relevant	DL < 1Mbit/s UL < 1Mbit/s	
Status rapportering fra AMR	Ikke relevant	Ikke relevant	DL < 1Mbit/s UL < 1Mbit/s	
Status rapportering til AR-headset	> 99.99%	< 100-200 ms	DL < 5Mbit/s UL < 1Mbit/s	

**Tabell 5.5: Ytelseskrav for BO1, BO2 og BO3.**

Forsøkene på Kista fabrikken resulterte i at 5G basert på eMBB kan støtte BO1 og BO2 ved å flytte funksjonalitet over til lokal databehandling (5G-SMART D2.3, 2022). I tillegg ble AR visualisering og opplæring av personell bekreftet ved subjektive evalueringer av konsortiet. Samtidig ble det konkludert med at 5G dekningen og ytelsen var utmerket, og at bruksområdene hadde en positiv effekt på produktivitet og fleksibilitet. På den andre siden var det vanskelig å gi lave tidsforsinkelser på grunn av at 5G-nettverket var basert på eMBB, og at operasjoner på 3.7GHz båndet ga vesentlige forskjellige resultater grunnet antennekonfigurasjon. I tillegg var valg av brukerutstyr kritisk.

BO4 og BO5 ble evaluert på fabrikken i Aachen (5G-SMART D3.4, 2022). BO4 fokuserte på å måle tilstanden til skjæreverktøyene i en femdimensjonal freser i en fabrikk. En akustisk emisjonssensor (AE-sensor) ble utviklet og integrert i freseren til en jetmotor komponent. Akustisk verktøy overvåking er en teknologi som bruker AE-sensorer for å samle relevant data for monitoreringssystemet. I BO4 brukte de den 5G-tilkoblede sensoren til å overvåke verktøylitasje, oppdage ødelagte verktøy, oppdage kollisjoner i maskinaksene og for å oppdage inhomogenitet i maskinmaterialet. Og ved kritiske hendelser ble freseren automatisk stoppet av funksjonene. Dataprosesseringsfunksjoner ble gjort i lokal databehandling ved basestasjonen. BO5 fokuserte på å overvåke flere maskiner og verktøy på fabrikken samtidig. Over 10 multisensorplattformer (MSP) ble utviklet og integrert med maskiner og bevegelige deler i fabrikken. I tillegg ble lokaliseringsteknologien i 5G brukt til å utløse enkelte prosesser. Sensorene målte mange forskjellige ting og ble satt sammen til en digital tvilling i lokal data behandling ved basestasjonen.

Bruksområdene satte krav til drift, funksjon og ytelse som er oppsummert nedenfor (5G-SMART D1.1, 2020).

Driftskrav for BO4 og BO5:

- *Nettverkskonfigurasjonsadministrasjon* for å spesifisere applikasjonstjenster som ytelseskrav, for å samle inn nettverksdata og for å installere programvare i lokal data behandling.
- *Feilstyring*, for å overvåke nettet og administrere problem raskt.
- *Sikkerhetsadministrasjon* for kommunikasjonstjenestene for å sikre konfidensialitet og data integritet.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO4 og BO5:

- *Tidssynkronisering* mellom sensoren/MSP og maskinen den opererer i for å plassere sensordata på riktig sted.
- *Deterministiske tidsforsinkelser* for å kunne reagere på kritiske hendelser som ødelagt verktøy eller kollisjoner.
- *Konstant UL hastighet* for å kontinuerlig overføre data.
- *Lavt energiforbruk* for lengre battertid for sensoren/MSP.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO5:

- *Skivedeling* for å kategorisere forskjellige sensorplattformer med forskjellige sikkerhetskrav.
- *Nettverkskapasitets eksponering* slik at vær sensor har riktig kapasitet i forhold til konfigurasjonen.
- *Lokaliseringsmulighet* for å spore bevegelige deler i fabrikken og i maskiner.

Kommunikasjons ytelseskrav for BO4 er beskrevet i Tabell 5.6 (5G-SMART D1.1, 2020).

Lokal databehandling kommunikasjonss-flyt	Kommunikasjonstjenester pålitelighet/tilgjengelighet	Maksimum ende-til-ende tidsforsinkelser	Gjennomsnittlig datahastighet	Melding størrelse
Måledata fra sensoren	> 99.999%	< 10 ms	> 8 Mbit/s	1-1024 Byte
Konfigurasjonsdata til sensoren	> 99.999%	Ikke relevant	Lav	>1204 Byte
Måledata fra MSP	> 99.9% - 99.999%	< 10-100 ms	Avhengig av sensordata	1024 byte
Konfigurasjonsdata til MSP	> 99.9%	Ikke relevant	Lav	1

**Tabell 5.6: Ytelseskrav for BO4 og BO5.**

Forsøkene på teststedet i Aachen viste at både BO4 og BO5 kunne realiseres over 5G (5G-SMART D3.4, 2022). Det ble også realisert flere fordeler knyttet opp mot industrielle mål som fleksibilitet, produktivitet og bærekraft. På den andre siden identifiserte de tekniske begrensninger knyttet til energiforbruk på sensorerene, der omfattende industrielle applikasjoner trenger utvikling på 5G-sensorenes energiforbruk.

BO6 og BO7 ble evaluert på fabrikken i Reutlingen (5G-SMART D1.1, 2020). BO6 fokuserte på å frakoble AMR styringssystem fra det innebygde systemet på roboten og flytte det over til en skyløsning ved lokal databehandling samtidig som KPI-er blir overholdt. AMR-ene er utstyrt med

kamera og sensorer for lokalisering og sikkerhet. Tre ulike AMR-er ble testet der forskjellen på de var at flere og flere funksjoner på flyttet over på skyen ved lokal databehandling plassert ved kjernenettet. Funksjonene til AMR-en inkluderer blant annet flåtekontroll, kurskontroll, SLAM, IPC og sikkerhet. Ingen av AMR-ene var utstyrt med en robotarm. BO7 fokuserte på å realisere TSN/I-LAN for maskin-til-maskin kommunikasjon med trådløs 5G-teknologi. Systemet som ble testet bestod av tre industrielle automasjonsdelsystem som alle inneholdt to komponenter. 5G ga tilkobling mellom hvert delsystem og de korresponderende komponentparene. Komponentene var kontrollere for industrielle maskiner som trenger å kommunisere med andre kontrollere og maskiner. Bruksområdene satte krav til drift, funksjon og ytelse som er oppsummert nedenfor (5G-SMART D1.1, 2020).

Driftskrav for BO6 og BO7:

- *Brukervennlighet* for enkel onboarding av mange AMR-er slik at intralogistikk ikke blir mer kompleks enn før onboardingen. Og for at fjerning av Ethernetkabler ikke øker kompleksiteten kommunikasjonssystemet.
- *Tjenestegaranti og 24/7-brukerstøtte* for å sikre veldig høy pålitelighet og minst like høy tilgjengelighet som et kablet system.
- *Integrasjon med eksisterende IT-infrastruktur* som for eksempel sikkerhetssoner i fabrikk.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO6:

- *IP forbindelse* mellom AMR-flåten og fjernstyringen.
- *Energieffektivitet* for brukerenheter med begrenset batterikapasitet. Forskjellig maskinvarekomponenter i AMR-en krever energi og derfor er det essensielt at 5G systemet minimerer energiforbruk.
- *Miljøkrav* i henhold til Boschs retningslinjer. For eksempel streng beskyttelse mot partikler i luften og elektrostatisk utladning.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO7:

- *Lag-2 LAN Switching* for TSN/I-LAN.
- *Tidssynkronisering* med overliggende TSN/I-LAN.
- *Skivedeling* for å transportere forskjellig TSN trafikk med forskjellig tjenestekvalitetskrav.
- *Nettverkskapasitets og status eksponering* slik at det underliggende 5G-systemet kan konfigureres gjennom API.

Funksjonelle krav for 5G-infrastrukturen for BO6 og BO7:

- *Sømløs mobilitet* slik at AMR-ene kan bevege seg mellom dekningsområder.
- *Ende-til-ende tjenestekvalitet* for kommunikasjonstjenester i form av tidsforsinkelser, pålitelighet og gjennomsnittlig datahastighet som dekker både RAN og kjernenett.
- *Sikkerhetsbeskyttelse* i tråd med industrisikkerhetskrav i IEC62443.

Kommunikasjons ytelseskrav for BO6 og BO7 er beskrevet i Tabell 5.7 (5G-SMART D1.1, 2020).

Lokal databehandling kommunikasjons-flyt	Kommunikasjonstjenester pålitelighet/tilgjengelighet	Maksimum ende-til-ende tidsforsinkelser	Gjennomsnittlig datahastighet	Melding størrelse
Sensordata fra AMR og	> 99.999%	< 10-100 ms	DL < 10 Mbit/s UL 1-100 Mbit/s	~500 Byte

<b>kontrollfunksjon til AMR</b>				
<b>Kontroller til</b>	99.9% - 99.999%	< 4-10 ms	DL > 1 Mbit/s	~500
<b>kontroller trafikk</b>			UL > 1 Mbit/s	Byte

**Tabell 5.7: Ytelseskrav for BO6 og BO7.**

Forsøkene i AP4 på Bosch fabrikken i Reutlingen viste at både BO6 og BO7 kunne realiseres over 5G (5G-SMART D7.4, 2022). Kontroller til kontroller trafikk hadde en positiv effekt på de industrielle mål som fleksibilitet, mobilitet og bærekraft, mens skybaserte AMR-er hadde en positiv effekt på fleksibilitet, produktivitet, mobilitet og trygghet. AMR-ene bestod alle valideringsscenarioer som oppdragstid, og effektiviteten økte ved sanntidsoptimalisering av kjørerutene over 5G. På den andre siden utkonkurrerte det kablede Ethernet nettverket 5G på grunn av kortere tidsforsinkelser. I tillegg hadde bakgrunnstrafikk en negativ effekt på kontroller trafikken som økte tidsforsinkelser, men dette påvirket ikke maskineffektiviten. Konklusjonen var at trafikkprioritering måtte undersøkes avhengig av andvelsen til 5G-nettet.

#### 4.6 Oppsummering av funn

Funnene viser en økende interesse blant industrien for private 5G nett globalt og i Norge. 5G kan støtte en rekke bruksområder. Dette understrekes blant annet av at Nkom åpner 3,8-4,2 GHz-båndet til industrien, økende engasjement blant telekommunikasjonsselskap og søkelys i media rundt implementeringen av 5G på Yara sitt anlegg på Herøya. Globalt har allerede store aktører som Ford implementert 5G i sine fabrikker. Likevel er det vanskelig å vite detaljer rundt implementeringene. Tekniske og økonomiske evalueringer på eksisterende implementasjoner i selskap er ikke tilgjengelige, og detaljer rundt implementeringene er mangelvare. Samtidig er det mange faktorerer som må adresseres for å implentere et privat 5G-nettverk. Prosesser i industrimiljøet må analyseres for å finne aktuelle bruksområder. Og det er mange kostnadsposter i CAPEX og OPEX, og de varierer ut i fra forretningsmodell, nettverksmodell og bruksområder. Valget av nettverksalternativ er også viktig for karakteristikken til nettverk. Til slutt er det mulig å måle verdien av investeringene ved å bruke tekniske og økonomiske modeller. Samtidig ble det bevist positiv effekt på industri 4.0-trender av bruksområdene som fleksibilitet i 5G-SMART prosjektet.

## 6 Rammeverk for industrielle applikasjoner av private 5G nettverk

Dette kapitlet presenterer litteraturgjennomgangen bak utviklingen av modeller for hvert av de tekniske målene ved 5G implementasjon og foreslår et rammeverk for industriaktører for valg av bruksområde og nettverksalternativ. I Kapittel 7 er modellene sammen med rammeverket testet på et produksjonsmiljø i en fabrikk i Norge for å analysere verdien av investeringene. Dette kapitlet starter med å diskutere de ulike produksjons KPI-ene og økonomiske modellene funnet i litteraturgjennomgangen. Deretter er de syv ulike tekniske målene sammen med deres korresponderende matematiske modeller presentert. Tilslutt knyttes funnene fra Kapittel 5 sammen til et rammeverk som kan brukes i industrien.

### 6.1 Litteraturgjennomgang av produksjons KPI-er, økonomisk evaluering, matematisk og kostnadsmodellering

Tradisjonelle investeringsbeslutninger er ofte evaluert basert på diskonterte kontantstrømmer (*Discounted cashflows*, DCF) (Demmel og Askin, 1992). Diskonterte kontantstrømmer beregner framtidige kontantstrømmer generert av en investering basert på en diskonteringsrente som reflekterer risikoen knyttet til investeringen (Van Triest og Vis, 2007). Økonomiske formler basert på dette prinsippet er nettonåverdi (*Net Present Value*, NPV), avkastning på investering (*Return on investment*, ROI) og internrente (*Internal rate of return*, IRR) (Demmel og Askin, 1992). De følgende betegnelsene er brukt for økonomiske modeller:

$$NPV = \text{Nåværende verdi}$$

$$CF_t = \text{Kontantstrøm i periode } t$$

$$i = \text{Diskonteringsrente}$$

$$T = \text{Antall perioder}$$

NPV metoden er basert på tidsverdien til penger der den framtidige verdien til penger tilsvarer den nåværende verdien til penger investert i en spesifikk rente (Sambasivarao og Deshmukh, 1997). NPV-formelen er gitt i Formel 6.1 (Schuh et al., 2012):

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (6.1)$$

For å regne ut kontantstrømmene (*Cash flow*, CF) i investeringene brukes CAPEX og OPEX som diskutert i 4.3.1 og 4.3.3. De første investeringene skjer ved periode  $t=0$  og er gitt ved Formel 6.2:

$$CF_{t=0} = -CAPEX \quad (6.2)$$

Investeringer etter periode  $t=0$  beregnes ved Formel 6.3:

$$CF_{t>0} = \text{Omsetning}_t - \text{OPEX}_t \quad (6.3)$$

IRR brukes til å beregne diskonteringsrenten og er anvendbar når investeringer med fleksible kontantstrømmer er sammenlignet (Sambasivarao og Deshmukh, 1997). I dette rammeverket er det antatt at kontantstrømmer er konstante over livstiden til applikasjonen basert på funnene i 4.3.3 (5G-SMART D1.2, 2021). Derfor er IRR ikke vurdert. ROI er uttrykt i prosent og beregner driftskostnadsbesparelser som kan bli brukt til å enten forbedre bruttofortjeneste, drift eller energi

forbruk (Bouras et al., 2018). ROI består av innledende investering, estimering av årlig omsetning og årlig prosjektkostnad og er gitt ved Formel 6.4 (Sambasivarao og Deshmukh, 1997):

$$ROI = \frac{\text{Avkastning}}{\text{Total kapital}} = \frac{NPV_{\text{Omsetning}} - NPV_{\text{Kostnad}}}{CAPEX} \quad (6.4)$$

NPV og ROI er valgt som økonomiske indiktorer til rammeverket. For å virkelig forstå verdien 5G kan bringe og for å svare på forskningsspørsmål 3 er også tekniske evalueringer i produksjonsmiljøet nødvendig (5G-SMART D1.2, 2021). Dette er for å kompensere for ulempene med tradisjonelle økonomiske modeller som ikke reflekterer immatrielle fordeler med implementeringen.

KPI-er er et utbredt instrument for å måle endringer i produksjonsmiljøet både i litteraturen og bransjen (Stricker et al., 2017). KPI-er er kritiske for å adressere administrasjon av produksjonsmiljøet og kontinuerlige forbedringer. I moderne produksjonssystem er KPI-er definert som et sett med indikatorer som reflekterer operasjonssytelse. Eksempler på slike indikatorer er effektivitet, gjennomstrømming og tilgjengelighet som måles fra produktivitet, kvalitet eller vedlikeholdsperspektiver (Kang et al., 2017). De kvantifiserer i hvor stor grad et kritisk mål blir nådd og er en utbredt metode for å kommunisere mål i en organisasjon (Pantke og Herzog, 2014). KPI-er er brukt på alle nivå, enten strategisk, taktisk eller operasjonelt (Tokola et al., 2016), i tillegg til forutsigbar produksjonskontroll (Mousavi og Siervo, 2017). Mange av produksjons KPI-ene som finnes i litteraturen er delvis overflødig, overlappende eller vanskelig å måle. Innen automasjonssystem og integrasjon spesifiserer standarden ISO22400 flere kriterier for at en KPI kan regnes som en tilstrekkelig KPI, som kvantifiserbarhet og nøyaktighet (DIN ISO 22400, 2014). For å ha et kompakt sett med KPI-er som reflekterer de tekniske målene med 5G ble det i 5G-SMART leveranse D1.2 identifisert KPI-er basert på denne standarden.

For å kvantifisere de tekniske målene i rammeverket trenger man en del selskapsesifikk informasjon. Slik informasjon er data definert på følgende måte (5G-SMART D1.2, 2021):

1. Dataen kan bli fastsatt av en numerisk verdi større eller lik null.
2. Enheten til dataen er gitt og er unik.
3. Dataen er ikke overlappende med andre data.
4. Dataen har en direkte eller indirekte effekt på KPI-er. Effekten er direkte når data representerer et KPI element. Effekten er indirekte når dataen påvirker et KPI element.

Dataen brukes til å kvantifisere hver KPI, og hver KPI brukes som for å evaluere tekniske mål. Følgende er notasjonen for selskapsesifikk data som behøves for å kvantifisere KPI-ene i de matematiske modellene. Der  $X$  er den spesifikke posten.

**Antall:**

$$Q_X = \text{Antall av } X$$

**Kostnadsdata:**

$$C_X = \text{Kostnad per } X$$

De syv tekniske målene består av fleksibilitet, mobilitet, produktivitet, kvalitet, trygghet, bærekraft og utnyttelse. Formlene består både forhold som det er ønskelig å minimere eller maksimere. Følgende er formler for å kvantifisere KPI-er i de syv tekniske målene. Det finnes veldig mange flere formler for å kvantifisere de tekniske målene, men av praktiske årsaker og tilgjengelighet på data ble

disse brukt basert funn i kapittel 5.3 (5G-SMART D1.2, 2021). På den andre siden er det vanskelig å dekke spesifikke effekter i en fabrikk med et generelt rammeverk, derfor kan det inkluderes andre KPI-er eller formler ved behov. Følgende er formlene hentet fra 5G-SMART (5G-SMART D1.2, 2021).

Fleksibilitet beskriver produksjonssystemets egenskap til å prosessere mange forskjellige deler med minimal innsats og overgangstid.

$$\text{Maskin fleksibilitet} = \frac{\text{Antall produkt}}{\text{Antall maskiner}} \quad (6.5)$$

$$\text{Oppsettsforhold} = \frac{\text{Oppsettstid}}{\text{Prosesseringstid}} \quad (6.6)$$

Mobilitet beskriver egenskapen til å bevege ting på fabrikkgulvet.

$$\text{Materialflyt} = \frac{\text{Antall ruter støttet av systemet}}{\text{Totalt antall ruter}} \quad (6.7)$$

$$\text{Leveranser på tid} = \frac{\text{Antall leveranser på tid}}{\text{Totalt antall leveranser}} \quad (6.8)$$

Produktivitet måler produksjonen per input over tid og betegner derfor produksjonseffektiviteten.

$$\text{Effektivitet} = \frac{\text{Planlagt oppetid} * \text{Antall produkt}}{\text{Faktisk oppetid}} \quad (6.9)$$

$$\text{Gjennomstrømming} = \frac{\text{Antall produkt}}{\text{Faktisk oppetid}} \quad (6.10)$$

$$\text{Arbeidereffektivitet} = \frac{\text{Produktiv arbeidstid}}{\text{Total arbeidstid}} \quad (6.11)$$

Kvalitet rangerer til hvilken grad produksjonen møter forskjellige produksjonskrav.

$$\text{Skrapfohold} = \frac{\text{Antall produkt kastet}}{\text{Antall produkt}} \quad (6.12)$$

Trygghet er et system sin egenskap til å beskytte seg selv og operatører fra skade og ulykker.

$$\text{Ulykkeforhold} = \frac{\text{Antall ulykker}}{\text{Antall arbeidertimer}} \quad (6.13)$$

$$\text{Mean time between failure} = \frac{\text{Tid i drift}}{\text{Antall failures}} \quad (6.14)$$

$$\text{Mean time to repair} = \frac{\text{Reparasjonstid}}{\text{Antall failures}} \quad (6.15)$$

Bærekraft beskriver til hvilken grad produksjonen skjer ved prosesser som er lite forurensende, og konserverer energi og naturressurser. Strømforbruket forventer

$$Karbonavtrykk = Strømforbruk * Konvergens_{(kWh \rightarrow CO_2)} \quad (6.16)$$

$$Strømforbruksforhold = \frac{Strømforbruk}{Antall produkt} \quad (6.17)$$

$$Råvareforbruk = \frac{Råvareforbruk}{Antall produkt} \quad (6.18)$$

Utnyttelse er forholdet mellom brukt tid og teoretisk tilgjengelig tid.

$$Tilgjengelighet = \frac{Produksjonstid}{Planlagt produksjonstid} \quad (6.19)$$

Direkte innvirkning av 5G applikasjonen på bruksområdet og korresponderende data er analysert basert på litteraturen. Forskjellen fra før og etter 5G applikasjonene på KPI-ene blir målt på total endring i det korresponderende tekniske målet. For fleksibilitet vil effekten av 5G applikasjonen på bruksområdet bli gitt ved:

$$\Delta Fleksibilitet = \frac{\Delta Maskin fleksibilitet - \Delta Oppsetsforhold}{2} \quad (6.20)$$

Effekten av 5G applikasjoner er basert på litteratursøket i 5G-SMART D1.2 (2021), og den realistiske situasjonen i fabrikken. Tabell 6.1 viser den foreslåtte effekten av 5G applikasjoner på de ulike tekniske målene. I tillegg til disse effektene kan 5G som teknologi ha effekt ved for eksempel å fjerne kabler og annet gammelt utstyr. Disse effektene brukes videre i de økonomiske modellene for å beregne kontantstrøm (5G-SMART D1.2, 2021).

	MPS	AMR
<b>KWh forbruk</b>	-2 %	
<b>Antall produkt</b>	10-15 %	
<b>Oppsettstid</b>	-50%	
<b>Fullføringstid</b>	-35% til -50%	
<b>Antall arbeidstimer</b>		Basert på antall logistikk arbeidere
<b>Antall feil</b>	-10 %	
<b>Nedetid</b>	-6% til -8.7 %	
<b>Antall produkt</b>	10 %	
<b>Antall produkt kastet</b>	-10 %	

**Tabell 6.1: Effekt av 5G applikasjoner på tekniske mål, basert på 5G-SMART D1.2 (2021).**

Implementering av private 5G nett innebærer en rekke valg som påvirker både kostnaden, fordelene og avkastningen på investeringen. Nettverket kan skreddersys for spesifikke bruksområder og miljø, eller bli bygget opp mot skalerbarhet for framtidige innovasjoner. Derfor er det viktig for aktører å



forstå sitt eget behov og hva de vil oppnå med et privat nettverk. I tillegg, vil det være lurt å vurdere helhetlighet av løsningen som blir tilbudt av leverandøren. Dette inkluderer hvordan nettverket skal administreres, vedlikeholdes og eventuelt oppgraderes. En for stor avhengighet av leverandøren kan føre til synkroniseringseffekter ved betydelige omkostninger hvis man skifter leverandør. Selve kostnadene på nettet drives av flere faktorer. Først og fremst er det kostnadene for selve maskinvaren i nettverket som radioer/antenner, kontrollere, kjernenettet, moduler og sim til enhetene, og en eventuell skyløsning som lokal databehandling. Disse kostnadene kommer an på området som skal dekkes, og hvilke krav til forsinkelser, hastighet og kapasitet som settes av fabrikken i form av nettverksalternativ. I tillegg kommer kostnadene for spektrum og radio-løsningen, og eventuelle tilleggskrav som ekstra datasikkerhet. Alt dette blir tilbudt av operatører i form av servicenivåavtaler. Som betyr at hver kontrakt kommer an på kravene på det enkelte stedet, det vil si at en ende-til-ende løsning kommer til å ha forskjellig pris fra fabrikk til fabrikk. På den andre siden er det mulig å gjøre alt selv, noe selv eller kjøpe teknologien. Ulike forretningsmodeller har forskjellige styrker og svakheter både når det kommer til tekniske og økonomiske faktorer. Utenom dette vil kostnader knyttet til IoT-enhetene som kamera, sensorer eller AMR-er og kontrollsystemer gjøre en stor del av investeringen. Slike bruksområder er individuelle for fabrikken, og her må aktører sette seg inn i det individuelle produksjonsmiljø for å forstå hvilke prosesser som kan dra nytte av 5G-teknologier. Fellesnevneren for alle kostnadspostene er at de er vanskelige å estimere uten konkrete tilbud, og selv med flere tilbud kan det være vanskelig å sammenligne basert på tekniske og økonomiske faktorer. Flere av kostnadspostene inkluderer konfidensielle, sensitive eller utilgjengelige priser, derfor blir det tatt antagelser eller gitt omtrentlige verdier for de faktiske kostnadspostene.

Når det gjelder kostnadene til et privat 5G nett kan det splittes opp i CAPEX og OPEX (5G-ACIA, 2019). Begge kommer an på hvilket nettverksalternativ og forretningsmodell man går for. Det kan være vanskelig å vurdere tilbud fra leverandører fordi det er mange faktorer som kan splittes opp. Samtidig kan forretningsmodellene inneholde unike avtaler, der CAPEX og OPEX kan reduseres og økes avhengig av avtalen. Av praktiske årsaker inkluderes kun SNPN med forretningsmodell der industriaktør leier inn en MNO eller tredjepart som integrator, men gjør resten selv. I denne modellen antas det at MNO eller tredjepart planlegger nettverksarkitekturen og planlegger radioløsningen. CAPEX for denne typen SNPN er:

$$\begin{aligned} CAPEX_{5G_{SNPN}} = & C_{5G \text{ brukerenheter}} + C_{5G \text{ RAN}} + C_{5G \text{ kjernenett}} \\ & + C_{\text{frekvensbånd}} + C_{\text{fronthaul fiber}} + C_{\text{backhaul fiber}} \\ & + C_{\text{Nettverksadministrasjon}} + (C_{\text{Lokal skyløsning}}) \end{aligned} \quad (6.21)$$

Siden flere av komponentene må gjøres av industriaktøren i denne forretningsmodellen må formelen brytes ned videre til hver enkelt kostandspost.  $Q$  betegner korresponderende antall for hver kostandspost.

$$\begin{aligned} C_{5G \text{ brukerenheter}} & \\ = & Q(C_{\text{Modem}}) + Q(C_{\text{Rutere}}) + Q(C_{\text{Smarttelefoner}}) \\ & + Q(C_{\text{Simkort}}) \end{aligned} \quad (6.22)$$

Alle bruksområdene som skal kobles til 5G trenger tilkobling. Derfor må det installeres modem eller rutere, og eventuelle simkort på brukerenhetene. Hvis man ønsker dekning for samtaler må det også avtales med MNO-en, i slike tilfeller må også smarttelefoner støtte 5G. Simkortkostnader kan forekomme dersom industriaktøren velger 5G-AKA eller EAP-AKA' som autentikasjonsmekanisme.

Hvis dette ikke tilbys av en MNO eller tredjepart må industriaktøren kjøpe MCC, MNC og MSIN ressurser av Nkom for å identifisere enhetene (Nkom, 2022a). Dersom MNO-en er operatør av nettet kan det være sannsynlig at det inngås en avtale med abonnement med simkort.

$$C_{5G\ RAN} = Q(C_{planlegging}) + Q(C_{Antenne}) + Q(C_{Radio}) + Q(C_{Baseband}) + Q(C_{Integrator}) \quad (6.23)$$

Siden MNO-en tar seg av planleggingen av arkitektur og radio vil dette også komme inn som en kostnad.

$$C_{5G\ kjernenett} = Q(C_{Servere}) + Q(C_{Programvare\ funksjoner}) + Q(C_{Integrator}) \quad (6.24)$$

Fornyelsen av lisensen skjer i henhold til reguleringer satt av Nkom (Nkom, 2022a). Varigheten av frekvenstillatelsen er avhengig av hvilket frekvensbånd som skal brukes.

$$C_{5G\ frekvensbånd} = C_{Frekvensbånd} * Fornyelser\ av\ lisens \quad (6.25)$$

$$C_{fronthaul\ fiber} = Q_{Kabler} * C_{Kabler} \quad (6.26)$$

$$C_{backhaul\ fiber} = Q_{Kabler} * C_{Kabler} \quad (6.27)$$

I denne modellen må industriaktøren og MNO eller tredjeparten avtale sikkerhetsretningslinjer, autentikasjonsmekanisme og krypteringsmekanismer. Valget handler i stor grad om hvem som skal styre enhetstilgang og hvor mange nivå med kryptering som behøves. Enkelte administrasjonskostnader som autentikasjonsmekanisme må være med uansett. Kostnaden kan deles med eller kjøpes av MNO-en eller tredjepart. Det kan også utvikles eller kjøpes ekstra funksjoner som fjernattestering og transittbevis, i tillegg til sikkerhetsløsninger relatert til enhet-til-nettverk kommunikasjon. Ytterligere kostnader kan forekomme dersom det ønskes ekstra autentikasjon av enheter, kryptering på forskjellige nivå eller legitimeringskontroll. Slike valg er vanskelig å vurdere kostnaden av da det inneholder programvareutviklere, programvare og sikkerhetsekspert, der det kan være vanskelig å sammenligne tilbud fordi det kreves spesielløsninger. Nettverksadministrasjonskonstader kan deles opp slik, der  $Q$  betegner alle enheter som trenger enhetsautentikasjoner.

$$C_{Nettverksadministrasjon} = C_{Administrasjon} + Q(C_{Enhetsautentikasjon}) + (C_{Kryptering}) + (C_{Legitimering}) + (C_{Fjernattestering}) + (C_{Transittbevis}) \quad (6.28)$$

I de fleste applikasjonene av 5G finnes det en lokal skyløsning. Lokal skyløsning kan leveres av MNO-en eller en tredjepart som en ferdig løsning, eller kun servere der funksjoner utvikles selv.

$$C_{fronthaul\ fiber} = Q_{Kabler} * C_{Kabler} \quad (6.29)$$

Siden MNO eller tredjeparten er operatør for nettverket antas det at disse drifter og vedlikeholder deler av det. Dette kan innebære personell for fysisk vedlikehold, drift og oppdatering av programvare, enhetsautentikasjons og rådgivning ved feil. I tillegg kommer kostnadene for elektrisiteten SNPN-et bruker. I dette alternativet antas det at backhaul fiberen ikke leases. Dersom MNO-en eller tredjeparten står for driften kan det være med å redusere OPEX-en fordi ekstern rådgivning eller utvikling av kompetanse internt kan være dyrt (5G-SMART D1.3, 2021):

$$OPEX_{5G_{SNPN}} = C_{Drift} + C_{Strøm} \quad (6.30)$$

Kostnadene til drift varierer avhengig av hvem som tildeles hvilke roller, men kan likevel deles opp:

$$C_{Drift} = C_{Vedlikehold} + C_{Programvare} + (C_{Rådgivning}) \quad (6.31)$$

Av praktiske årsaker er kun AMR og sensorer for overvåking av prosess data med i evalueringen av rammeverket, selv om andre applikasjoner har lignende kostnadsstruktur. I likhet med private 5G nett er det mange faktorer som må adresseres før AMR-er implementeres, uansett om det er med eller uten 5G. For AMR-en kan kostnader bli delt opp mellom CAPEX, OPEX og tilleggsutstyr. Og i likhet med private 5G nett kan evaluering av tilbud fra leverandører være vanskelig på grunn av mangelen på standardisering og erfaring med teknologien (Schneier og Bostelman, 2015). Derfor kan kostnadsspørsmålet være misledende samtidig som det er viktig. ROI-en må være basert på reduksjon i arbeidstimer og potensielle fordeler med automasjon (e.g., høyere presisjon, mindre menneskelige feil, bedre ergonomi), samt forbedrede arbeidsforhold, effektivitet, produktivitet og anvending. Når relevante faktorer er lagt til ROI formelen må resultatet sammenlignes den finansielle situasjonen, prioriteringer og retningslinjer til selskapet. På grunn av vanskeligheten med å sammenligne tilbud fra leverandører kan dette være nyttig (Čech et al., 2020). Andre faktorer inkluderer kundeservice og finansiell situasjon fra leverandøren. Kort oppsummert spiller kostnaden en stor rolle i investeringsbeslutninger, men det kan være vanskelig å måle og sammenligne tilbud. Samtidig mangler det en basis i forskningslitteraturen (Winkelhaus og Grosse, 2020).

CAPEX-en til AMR-en består av antall AMR-er, eller flåtestørrelse, og kostnad per AMR. Avgjørelsen om flåtestørrelse er en kompleks avgjørelse og et godt utforsket område i litteraturen. Flåtestørrelsen går ut i fra mange faktorer som type produksjonsmiljø, AMR og distanser (Fragapane et al., 2020), og kan beregnes ved en rekke metoder som *queuing theory* (Koo et al., 2004), lineære programmeringsmodeller (Choobineh et al., 2012) og *discret event simulation* (Kousi et al., 2019). Av praktiske årsaker antas kostnaden til AMR-en å inkludere sensorer og kameraer for navigasjon. Av samme grunn vil flåtestørrelsen og OPEX baseres på antagelser i evalueringen.

$$CAPEX_{AMR} = Q_{AMR} * C_{AMR} \quad (6.32)$$

OPEX-en til AMR-en består av enhver medvirkende kostnad etter første investering. Den inkluderer blant annet ladekostnader, oppdateringer, flåte og rute funksjonsstyring, reparasjoner og annet vedlikehold.

$$OPEX_{AMR} = C_{Lading} + C_{AMR-ingeniør} + C_{Vedlikehold} \quad (6.33)$$

Kostnaden til tilleggsutstyret avhenger av hvilken type AMR som velges, men anses her til å være relatert til kontrollerfunksjon på lokal skytjeneste og toppmodul:

$$C_{AMR} = C_{EU-Topp} + C_{EU-Programvare} \quad (6.34)$$

Når det kommer til trådløse sensorer for overvåking av prosessdata deles også investeringskostnaden inn i CAPEX og OPEX (5G-SMART D1.2, 2021). CAPEX-en til statusbasert overvåking drives av de trådløse sensorene. De trådløse sensorene må også ha en unik identifikasjon for alle tilknyttende maskiner og objekter ved for eksempel radiofrekvensidentifikasjons-teknologi (RFID). I tillegg behøves det skjermer eller lignende for å gjøre sensordata tilgjengelig for arbeidere. CAPEX-en til statusbasert overvåking er derfor gitt ved (5G-SMART D1.2):

$$CAEX_{CBM} = C_{Trådløst\ sensor\ nettverk} + C_{RFID} + C_{Skjermer} \quad (6.35)$$

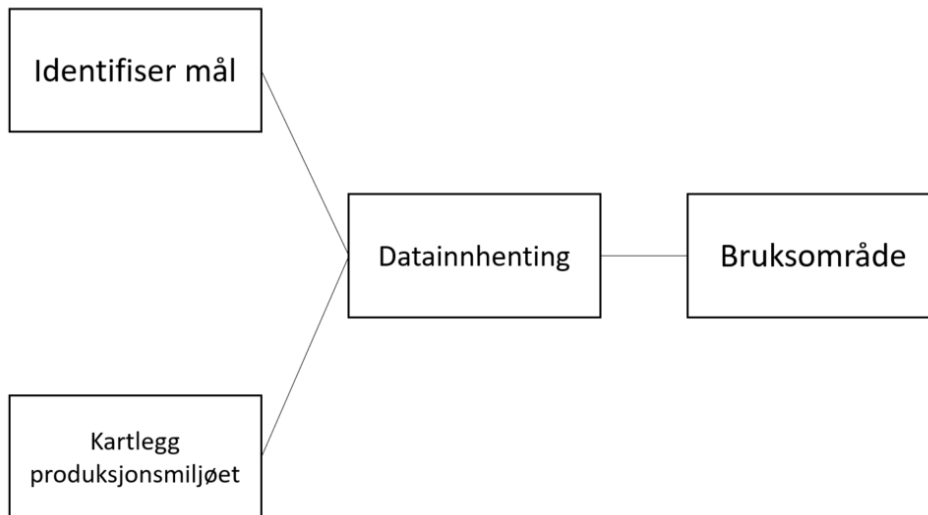
Når de trådløse sensorene er montert vil en stor mengde data bli tilgjengelig. Og for å gjøre dataen nyttig må den analyseres og bli satt i riktig kontekst slik at maskinlæringsalgoritmer kan anvendes (5G-SMART D1.3, 2021). Dette er som regel gjort av menneskelige arbeidere, og markedsundersøkelser viser at det er mest lønnsomt for industriaktører å ha egne dataingeniører over levetiden til applikasjonen (Mehl et al., 2021). I tillegg kan batteritid være et problem (5G-SMART D3.4, 2022). OPEX-en til statusbasert overvåking er dermed gitt ved:

$$OPEX_{CBM} = Lønn_{Dataingeniør} * Antall\ dataingeniører + C_{Batteri} \quad (6.36)$$

## 6.2 Rammeverk

Identifisering av riktig teknologi og bruksområder er en av de største utfordringene både for industri 4.0 og private 5G nett. Basert på funnene i Kapittel 4 ble det utviklet et rammeverk for norske fabrikker og forskningsspørsmål 2 kan adresseres. Rammeverket består av to deler, den første er en intern gjennomgang av fabrikken for å identifisere bruksområde og den andre er en ekstern gjennomgang av nettverkskrav for identifisere riktig privat-5G nettverksalternativ.

Målet med den interne gjennomgangen er å finne 5G-bruksområder som kan gi avkastning. Det gjøres først ved å identifisere målene til industriaktøren og ved å kartlegge produksjonsmiljøet i fabrikken. Målene ble basert på D1.2 i 5G-SMART (2021) og består av fleksibilitet, mobilitet, produktivitet, kvalitet, trygghet, bærekraft og utnyttelse. Samtidig kartlegges produksjonsmiljøet med flyten av materiell i fabrikken, aktuelle flaskehals og smertepunkt. Her ser man etter prosesser som kan automatiseres for eksempel ved hjelp av AMRer. Eller operasjoner med høy og dyr nedetid som kan reduseres ved forutsigbart vedlikehold for eksempel ved hjelp av MSP. For å knytte målene og produksjonsmiljøet opp mot relevante bruksområder må det hentes inn relevant data fra fabrikken (e.g., produktdata, prosessdata, sviktdata og fasilitetsdata). Dataen brukes senere i prosessevalueringen, men kan også brukes til å verifisere mål og prosesser som kan forbedres. Det ønskede bruksområdet eller bruksområdene (e.g., AMR, MSP, skybasert prosesskontroll) identifiseres basert på denne dataen. Figur 6.1 illustrerer den interne analysen i rammeverket.



**Figur 6.1: Intern analyse.**

For at store teknologiske investeringer skal gi mening må de samsvare med selskapets strategiske og tekniske mål. Basert på konseptutprøving og forsøk i 5G-SMART gjennomgått i Kapittel 4.3 vil de tekniske målene peke mot 5G bruksområder. De tekniske målene er beskrevet i Kapittel 5.1, men det kan også være noen unike strategiske mål som selskapet sitter med som bør tas inn i betraktning. Dette kan for eksempel være et mål om å vokse i et forretningsområde eller marked. Da kan 5G være med i planleggingen av vekststrategien.

Paralelt med målsettingen kartlegges produksjonsmiljøet. Kartleggingen er viktig både for å bestemme bruksområde og for å avgjøre hvilke nettverksalternativ som er tilgjengelige. Produksjonsmiljø og intralogistikk kan kartlegges basert på karakteristikk som går på materialer, bevegelser og metoder (Tompkins et al., 2010). Det krever svar på følgende aspekter (5G-SMART D1.2, 2021, Stavroulaki og Davis, 2010, Nicholas, 2011, Custodio og Machado, 2020):

#### **Kartlegging for bruksområdet:**

- **Produkt:** Hva produseres? Hvordan er formen og vekten til det som skal fraktes?
- **Mengde:** Hva er total mengde produkt som produseres? Dette nummeret kan brytes ned videre til forskjellige produkt og basert på hvordan de transporteres.
- **Produktblanding:** Hvor mange ulike produkt produseres? Hvor fleksibelt er produksjonssystemet? Dette bør si noe om hvor store forskjeller i volum som kan produseres når etterspørsel varierer. I tillegg til hvor mye inaktiv tid koster ved oppsettstid for maskiner. Og hvordan defekte produkt bearbeides.
- **Produksjonsmiljø:** Består fabrikk hovedsakelig av produksjonslinjer med sekvensielle steg, flere avdelinger med forskjellige maskiner eller er maskiner og produksjonsutstyr gruppert i celler med sekvensielle steg?
- **Transportruter:** Hvordan transporteres materiell og produkter? Hvor går rutene og hvor lange er de? Finnes det flaskehals eller steder med flere hindringer som varme, rene soner eller miljøavfall?
- **Maskiner og utstyr:** Omfanget av utstyr og maskiner kan være stort og fragmentert. Er det noe som kan erstattes med 5G-baserte roboter som AMR-er? Eller kan multisensorplattformer bli utplassert i eksisterende utstyr for å forutsi vedlikehold og forhindre defekter?

### Kartlegging for nettverksalternativ:

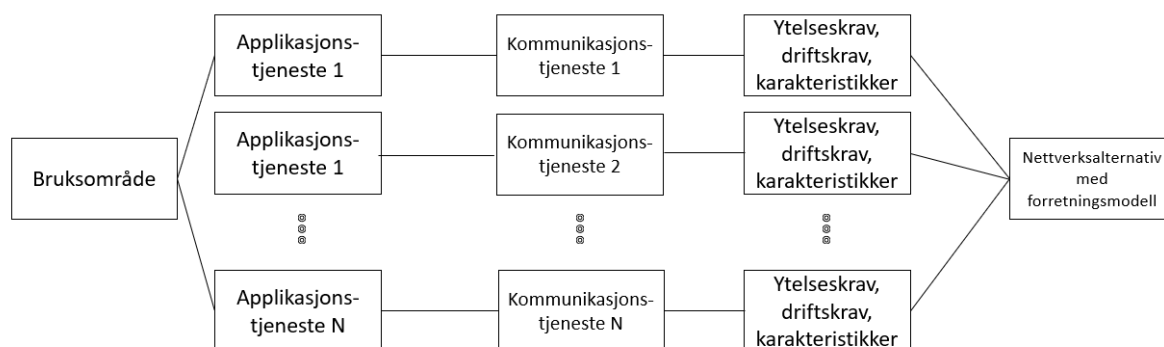
- **Oppsett:** Skal det private nettet settes opp i en enkel bygning eller innen et industricampus med flere bygninger og utendørs områder? Finnes det sikkerhetssoner? Hvor stort er arealet?
- **Dekningsbehov:** Er det kun nødvending med dekning inne, ute eller begge deler?
- **Fabrikkoppsett:** Hvordan ser fabrikken ut? Finnes det plantegninger? Hva er gjennomsnittlig utstyrsstørrelse, -tetthet og -høyde, samt indre og ytre veggtype eller penetrasjonstap.
- **Overlappende nett:** Finnes det offentlige eller andre private nett i området, eller området isolert? Hvordan er nabolettet satt opp, er det satt opp i en singel bygning eller innenfor et industricampus?
- **Makronett oppsett:** Industrielle miljø er typisk innenfor dekningsområde til et eller flere makronett. Hva er basestasjonstørrelsen eller hvor langt er det til de nærmeste basestasjonene? Hvilke frekvensbånd blir brukt og hvilke er tilgjengelige?
- **Miljø:** Hvordan ser miljøet rundt fabrikken ut, er det urbant, forstad eller landsbygd?

Basert på de tekniske målene som ble identifisert hentes all relevant data for kvantifisering av KPI-ene beskrevet i seksjon 5.1. Tekniske mål som fleksibilitet og produktivitet kan brukes til å identifisere et bruksområde for 5G basert på om produksjonsmiljøet tillater det. Økt fleksibilitet og trygghet kan for eksempel løses med AMR-er i fabrikker med store avstander der menneskelige ressurser gjør mye lasting manuelt. På den måten kan oppsetttid reduseres. I andre tilfeller kan produksjonslokalet gjøre applikasjon av bruksområder vanskelig. Applikasjoner av AMR-er kan være vanskelig hvis for eksempel miljøet er for komplekst for dagens AMR-er å navigere, eller hvis vekten/formen til produktene ikke egner seg til å bli fraktet av AMR-er. Videre kan økt bærekraft kan nås ved å redusere strømforbruk, eller å redusere sløsing av naturressurser ved å øke kvaliteten. 5G kan for eksempel støtte statusbasert overvåking ved hjelp av trådløse sensorer for å forutsig vedlikehold eller hindre defekter i produksjon. Samtidig kan man ved hjelp av sensorer overvåke strømforbruk i sanntid også kan man kutte forbruk deretter. Siden de fleste fabrikker og produksjonsmiljø er unike er det vanskelig å nevne alle eksempler. Derfor er det viktig at både tekniske mål og det spesifikke produksjonsmiljøet tillater applikasjonen til bruksområdet. Dette må vurderes individuelt for vært produksjonsmiljø, fabrikk og selskap.

Etter de foregående stegene er fullført bør det begynne å dannes et bilde av hvilke(n) bruksområde som er aktuelt. For å implementere det ønskede bruksområdet må leverandører av enheter, maskinvare og nettverksutstyr til applikasjonen identifiseres. Leverandørsøket i rammeverket begrenses til Ericssons industri 4.0-økosystem partnere, diskutert i seksjon 4.1.

Målet med den eksterne gjennomgangen er å identifisere riktig 5G nettverksalternativ. Det baseres på at teknologien i bruksområdet vil beskrive applikasjonstjenesten(e), kommunikasjonstjenestene og krav for det ønskede nettverksalternativet. Et bruksområde (e.g., skybaserte AMR-er, MSP) består av en eller flere applikasjonstjenester (e.g., sanntidskontroll, ultra-høy definisjonsvideo, lokal databehandling), og hver applikasjonstjeneste kan kartlegges til en korresponderende kommunikasjonstjenester med spesifikke ytelseskrav og egenskaper. En kommunikasjonstjeneste kategori (e.g., eMBB, mMTC og URLLC) representerer et sett med kommunikasjonstjenester som deler noen egenskaper med tanke på forbindelse. Hver kommunikasjonstjeneste har sine egne ytelseskrav (e.g., tidsforsinkelser, pålitelighet og yteevne) som må støtte applikasjonstjenestene. Samtidig kan applikasjonstjenester ha et sett med driftskrav og funksjonelle krav som må korrespondere med nettverksalternativet. Industriaktøren ha krav om karakteristikk (e.g.

fleksibilitet, ytelsestilpasning, skalerbarhet, datasikkerhet). Disse kravene og karakteristikkene gir grunnlaget for å velge nettverksalternativ basert på tilgjengelige forretningsmodeller som vist i Figur 6.2.



**Figur 6.2: Ekstern analyse, basert på 5G-SMART (2020).**

Applikasjonstjenesten er teknologien som anvendes i bruksområdet. Spørsmål som besvares er hvilke teknologier blir anvendt til bruksområdet? Disse varierer fra bruksområde til bruksområde, og det kan være flere applikasjonstjenester for et bruksområde. For eksempel kan en AMR-flåte være et bruksområde for intralogistikk og håndtering av materiell. For å oppnå tekniske mål må bruksområde bruke riktig applikasjonstjenester. For en AMR som i eksempelet kan applikasjonstjenestene være 3D kamera-sensor som støtter SLAM for navigasjon og sanntidsfunksjoner i lokal skyløsning for flåtekontroll og styring. For statusbasert overvåking av produksjonsmaskiner for å øke kvalitet, trenger man trådløse sensorer innebygd i maskinen som måler f.eks. slitasje, inhomogenitet i produksjonsmaterialet, temperatur, fuktighet, utslipp og strømforbruk. Sensordataen må også kompiles i for eksempel en database i en lokalskyløsning der AI-funksjoner kan brukes for å gjøre forutsigbar vedlikehold. Disse applikasjonstjenestene identifiseres for det valgte bruksområdet før man går videre. Applikasjonstjenesten avgjøres ut i fra spesifikasjoner på teknologiene til bruksområdet.

Kommunikasjonstjenesten avgjør arkitekturen til nettverket ved å enten fokusere på eMBB, M-MTC eller URLLC. Hvis applikasjonstjenesten krever høy pålitelighet som for statusbasert overvåking vil det kreve arkitektur basert på URLLC. På samme måte vil en stor AMR-flåte kreve både eMBB og URLLC på grunn av store mengder data mengder fra mange forskjellige enheter (eMBB) og for å hindre kollisjoner (URLCC). Kommunikasjonstjenesten avgjøres basert på type applikasjonstjeneste og/eller antall tilkoblede enheter. Kommunikasjonstjenesten er oftes intuitiv, hvis ikke bør leverandørspesifikasjoner til applikasjon som UL/DL, pålitelighet og forsinkelser gi et hint. Spørsmål som må besvares inkluderer bruksområdet applikasjonstjenester som krever mest maskin-til-maskin kommunikasjon, store datamengder eller lave tidsforsinkelser med høy pålitelighet?

De ulike kommunikasjonstjenestene må tilfredstille ytelseskrav som tidsforsinkelser, pålitelighet, UL/DL-hastighet og kapasitet. For at applikasjonen av bruksområdet skal fungere må disse møtes. Samtidig vil bruksområdene sette et sett med driftskrav og funksjonelle krav. Driftskrav beskriver hva som kreves for driften av bruksområdet og inkluderer faktorer som muligheten til å overvåke alarmer på nettverket. Funksjonelle krav er de kravene som settes til 5G-infrastrukturen og inkluderer faktorer som beskriver bakgrunnen til ytelseskravene. Disse kravene kan hjelpe industriaktøren å besvare hvilke karakteristikk kommunikasjonstjenesten trenger, som fleksibilitet, ytelsestilpasning, skalerbarhet og datasikkerhet. Spørsmålene som må besvares på disse faktorene bestemmer forholdet mellom forretningsmodell og nettverksalternativ. Skal

kommunikasjonsstjenesten være fleksibel mot å støtte flere bruksområder i fremtiden? Er det viktig at industriaktøren kan optimalisere spesifikke ytelseskrav på et senere tidspunkt? Har industriaktøren behov for å utvide dekningen utover den første utbyggingen av nettverket? Og til slutt, i hvor stor grad er det viktig å beskytte informasjonens data? Må absolutt alt av data holdes på området eller kan en MNO eller tredjepart stoles på til å håndtere dette? Dette gjelder både konfidensialitet under overføring og lagring av data. Når disse faktorene er adressert bør det begynne å dannes et bilde av hvilket nettverksalternativ som passer best. Likevel kan nettverksalternativ være begrenset av tilgjengelige forretningsmodeller. Hvilke MNO-er eller tredjeparter kan tilby et privat nett i området og hvilket type nett kan de tilby? Er det mulig å kjøpe egne frekvenstillatelser i området? I enkelte situasjoner er kun PNI-NPN tilgjengelig på grunn av manglende ledige frekvensressurser i området. De tilgjengelige forretningsmodellene og nettverksalternativene baseres på de beskrevet i 5G-SMART D1.2 og D1.3 (2021).



## 7 Investeringsanalyse for implementering av privat 5G nett i produksjonsmiljø

Dette kapitlet presenterer gjennomgang av rammeverket utviklet i Kapittel 6.2 på en norsk fabrikk. Siden denne analysen krevde en del informasjon ble det valgt et selskap med mye data og informasjon åpent på internett. Fabrikken som ble valgt er Hydro Karmøy. Dette kapitlet startet med en kort introduksjon av Hydro og aluminiumbransjen. Før rammeverket ble vurdert opp mot tilgjengelig data og informasjon om selskapet steg etter steg. Til slutt ble verdien av nettverksalternativ og applikasjonen av bruksområdet estimert ved de teknologiske og økonomiske analyse beskrevet i Kapittel 6.1.

### 7.1 Hydro

Hydro er en av de største industribedriftene i Norge med fem fabrikker for aluminiumsproduksjon (Hydro, 2022). Hydro er et globalt konsern, og har operasjoner i store deler av verden. Produksjonen av aluminium består av to prosesser, primærproduksjon og støping. Primærproduksjon skjer ved en kjemisk reaksjon i en elektrolysecelle, der alumina reduseres til flytende aluminium ved hjelp av anoder og elektrisitet under enormt høye temperaturer (Aluminum Association, 1984). Støping skjer ved at det flytende aluminium støpes til de forskjellige aluminiumsproduktene som pressbolter, aluminiumtråd eller valseblokker. Typisk blir disse behandlet videre av kunder som lager profiler som er spesialtilpasset et bruksområde.

Kostnadsdriverne for produksjon av primærproduksjon av aluminium er alumina, strøm og karbonanoder, som sammen stod for opp mot 75-80 prosent av kostnadene i 2021 (Hydro, 2022). Det brukes omtrent to tonn alumina for å produsere ett tonn aluminium, som representerer 35-40 prosent av kostnadene for primær aluminium. Strøm representerer i gjennomsnitt 25-30 prosent av kostnadene, og karbonanoder som blir konsumert i smelteprosessen står for 15-20 prosent (Hydro, 2022). I tillegg er bransjen en av de mest forskningsintensive i Norge. Hver dag gjøres det forskningsarbeid ved så vel fabrikkene som ved egne forskningsanlegg, og ved NTNU og Sintef.

#### 6.1.1 Analyse av Hydro Karmøy

##### Identifiser mål

Først ut i rammeverket er identifisering av tekniske og strategiske mål. Det første tekniske målet foreslått for Hydro Karmøy er bærekraft. Tidligere har Hydro satset stort for å få ned antall kWh per kg aluminium ved å investere tungt inn i en ny elektrolyseprosess i anodene (Hydro, 2022). I tillegg satser de på fornybar energi fra vannkraft, vindkraft og solenergi. Dette resulterte i Hydro REDUXA som er en produktserie med lavkarbonaluminium som produseres på norske fabrikker. I dag operer 48 av 60 celler i teknologipiloten på Karmøy med denne teknologien. Denne produktserien er den mest karbonnøytrale aluminiumet i verden med et maksimalt karbonavtrykk på 4,0 kg CO<sub>2</sub> per kg produsert aluminium (Hydro, 2022). Hydro har også som mål å bli helt karbonnøytrale innen 2050, og gjør aktive valg og investeringer for å levere på denne strategien (Hydro, 2022). Økt bærekraft i form av overvåking av energiforbruk for å optimalisere energiforbruket er derfor foreslått.

Det andre tekniske målet foreslått for Hydro Karmøy er trygghet. På grunn av den ekstreme varmen, manuelle prosesser og størrelsen på maskineriet i aluminiumsproduksjon er det en vedvarende risiko for helse, miljø og sikkerhet (HMS). I 2021 hadde Hydro i Norge en skaderate per million arbeidstimer på 4,7. Dette har ført til at Hydro har et strategisk mål om å øke sikkerheten for arbeiderne sine (Hydro, 2022). I tillegg til HMS har Hydro identifisert store dataangrep som en risiko

for selskapet. I dag er Hydros informasjon system og teknologi kritisk for alle operasjoner, fra prosesskontroll til produksjonslokaler og system for ekstern finansiell rapportering. Et vellykket dataangrep kan resultere i HMS ulykker, driftsavvik og lekkasje av konfidensiell data. Samtidig peker Hydro på utilstrekkelig integritet av eiendeler som en risiko i driften (Hydro, 2022). Dette inkluderer maskineri i fabrikken på Karmøy. I dag gjøres det oppdateringer og utskiftninger på kritisk utstyr som likerettere, smeltedigel kontrollsystem og smelteovner. I tillegg gjøres regelmessige inspeksjoner og vedlikeholdsaktiviteter for forebygge og motvirke forstyrrelser i driften. Økt trygghet i form av å redusere arbeidernes eksponering mot varme og manuelle prosesser er derfor foreslått for å redusere risikoen for ulykker. På samme måte er økt trygghet i form av økt datasikkerhet foreslått for å redusere effekten av dataangrep. Til slutt er økt trygghet i form av høyere integritet på maskineri foreslått for å redusere nedetid ved vedlikehold.

De siste målet foreslått for Hydro Karmøy er kvalitet. I likhet med mange andre bransjer er aluminium i stor grad drevet av tilbud og etterspørsel, og forstyrrelser i verdikjeden eller markedet kan ha stor påvirkning for selskapet og produksjonen på Karmøy. Hydro har identifisert svakheter i forsyningskjeden som den aller største risikoen i årsrapporten for 2021. Nesten all aluminaen kommer fra Hydro-eide operasjoner i Brasil (Hydro, 2022). På grunn av flere utfordringer med fysiske klima hendelser, integritet i eiendeler og et komplekst politisk og sosialt miljø har stabiliteten i forsyninger vært presset de siste årene. Og problemer i driften i Brasil påvirker aluminiumsproduksjon blant annet på Karmøy (Hydro, 2022). På samme måte kan anspente geopolitiske forhold og restriksjoner på handel skape problemer ved å ramme tilgangen og kostnadene for råvarer. Samtidig kan salg bli påvirket av introduksjonen av handelsbarrierer. Derfor er geopolitiske forhold og handelsbarrierer identifisert som en risiko i årsrapporten til Hydro (2022). I tillegg har økte kostnader på strøm og karbonanoder gitt en ekstra utfordring. Økt kvalitet i produksjonen på Karmøy i form av færre defekter er derfor foreslått for å øke utnyttelsen av råvarer og redusere forbruk av kritiske ressurser.

### Kartlegging av produksjonsmiljø

Paralelt med målsetting kartlegges produksjonsmiljøet på Karmøy. På Karmøy produserer Hydro årlig 270 000 tonn primæraluminium og 220 000 tonn med støperiprodukter. De har et forskning og utviklingssenter som er også kjent for en teknologipilot for elektrolysecellene som reduserer elektrisitetsbehovet per kg aluminium produsert. Aluminiumsproduksjonen er kraftintensiv, og fabrikk bruker 12 mWh per tonn aluminium. Det er totalt 518 ansatte som går på helkontinuerlige skift for produksjon døgnet rundt, hele året (Hydro, 2022).

**Produkt:** Det produseres pressbolter og alumiumtråd. Alumina blir brukt til å produsere primæraluminium som støpes til alumiumtråd og pressbolter. Karbonanoder blir brukt til elektrolyseprosessen og gjenbrukes i anodeverkstedet. Alumina fraktes i løsvekt, primæraluminium blir fraktet i smeltedigler fra smelteverket og anoder blir fraktet i esker med kronene på. Aluminiumtråd samles i spoler med spesifikasjoner gitt i Tabell 6.2 (Hydro, 2019b). Pressboltene støpes først med lengde på 7 meter og diameter fra 152 mm til 405 mm. Videre blir de de kuttet ned til to kategorier av lengder som vist i tabell 6.3. Begge produkt blir produsert med gitte toleranser på opp till 6 mm for de største produktene (Hydro, 2019a).

Spolevekt	1900-2900 kg
Spolehøyde	865 mm
Ytre diameter	1300-1600 mm
Indre diameter	540 mm

**Tabell 6.2: Aluminiumtråd**

Vekt per bolt	140-2500 kg
Diameter	152-405 mm
Korte lengder	400-1499 mm
Lange lengder	2000-7000 mm

**Tabell 6.3: Pressbolter**

**Mengde:** Det produseres årlig 270 000 tonn primæraluminium som brukes til å produsere 220 000 tonn støperiprodukter (Hydro, 2022). Nøyaktige tall på antall pressbolter og paller med aluminiumtråd er ikke tilgjengelig, men estimeres ved enkel geometri. Det blir maksimalt 90 000 paller aluminiumstråd, eller maksimalt 300 000 lange pressbolter, eller maksimalt 1 500 000 korte pressbolter. Med 33% tildeling av total støperiproduksjon på hver av produktene blir det 500 000 korte og 100 000 lange pressbolter, samt 30 000 paller aluminiumstråd. Siden produksjonen er døgnkontinuerlig tilsvarer dette omtrent 1400 korte pressbolter, 250 lange pressbolter og 85 paller med aluminiumtråd hver dag. Videre antas det at en AMR kan bære en palle med 18 korte pressbolter, en palle med 4 lange pressbolter eller en palle med aluminiumstråd. Basert på estimatene på daglig produksjon (Appendiks B.2), blir dette omtrent 80 paller med korte pressbolter, 70 paller med lange pressbolter og 85 paller med aluminiumstråd hver dag. Fordelingen med 33% av total støperiproduksjon per produkt, men siden annen informasjon ikke er tilgjengelig antas det lik fordeling mellom produktene. På samme måte er antall produkt per palle også en tilfeldig antakelse, men basert på total vekt per palle kan det være en rimelig antagelse. Dersom faktiske tall er tilgjengelig kan analysen oppdateres.

**Produktblanding:** Det er hovedsakelig to ulike produkt som selges og fraktes fra fabrikk, pressbolt og aluminiumstråd som leveres i forskjellige dimensjoner etter forespørsel fra kunder. Etterspørselen etter disse produktene har stor innvirkning på pris fordi aluminiumsproduksjonen er kapitalintensiv (Hydro, 2022). Prisen på produktene kan følges på London Metal Exchange (LME), der kontrakter blir satt mange måneder fram i tid. Trådprodukter selges hovedsakelig til bruk i høyspentkabler, og pressbolter selges hovedsakelig til bruk i bilindustri, transport, bygg og anlegg, generell teknikk og elektronikk (Hydro, 2022). Produksjonen ble reflektert av fallende etterspørsel i 2020 på grunn av pandemien med primærproduksjon på 268 000 tonn og støperiproduksjon på 198 000 tonn (Hydro, 2022). Og på samme måte ble økt etterspørsel i 2021 ved gjenåpning reflektert med primærproduksjon på 266 000 tonn og støperiproduksjon på 230 000 tonn (Hydro, 2022). Når det kommer til bearbeiding av defekte produkter blir de sendt til resiurkelingsanlegg på en annen Hydro fabrikk.

**Produksjonsmiljø:** Produksjonsmiljøet er på Karmøy er et industricampus som består av flere avdelinger med forskjellige maskiner. Det inkluderer (Hydro, 2013):

- Kai og lagersiloer for mottak av alumina fra Brasil.
- 1.2 km langt smelteverk for primærproduksjon av aluminium med totalt 60 elektrolyseceller.
- Pressboltstøperi med støperiform, kvalitetskontroll og sag.
- Trådstøperi.
- Anodeservice.
- Katodeverksted.
- Utendørs lager for videre transport av produkter.

**Transportruter:** Lengden på rutene er ikke tilgjengelig, likevel er materialflyten beskrevet på følgende måte (Hydro, 2013). Alumina fraktes med båt til kaien, derfra blir det løftet med en kran over til siloer for lagring. Fra siloene fraktes alumina på samlebånd til smelteverket der kraner løfter det over i elektrolysecellene. Etter elektrolyseprosessen suger en lastebil opp flytende aluminium fra

elektrolysecellene over til en smeltedigel. Deretter kjører lastebilen smeltedigelen til enten trådstøperiet eller pressboltstøperiet for å støpes. I støperiene er det flere bevegelige hindringer i form av arbeidere, gaffeltrucker og kraner som må tas hensyn til ved applikasjon av AMR-er. I pressboltstøperiet transporteres pressboltene fra post til post via kraner i taket og samlebelter. Til slutt fraktes produktene til lageret utendørs på paller med gaffeltrucker.

Siden støperimaskinene og elektrolysecellene har begrenset kapasitet og lang prosesseringstid kan det antas at det går en viss tid mellom hvert parti med produkt må fraktes.

**Maskiner og utstyr:** På fabrikken i Karmøy er det maskiner og utstyr spesifikt designet for primærproduksjon og støping av aluminium. Det er allerede en rekke sensorer og måleutstyr for å overvåke prosesser. I kvalitetskontroll bruker de blant annet ultralydtest for å sjekke for interne sprekker i produktene. Uten direkte innspill og prosessdata fra fabrikken er det vanskelig å gi konkrete tekniske forslag for forbedring av prosesser. Likevell er det foreslått to prosesser som muligens kan forbedres, nemlig toleransene på produktene og intralogistikk til lageret. For å redusere toleransene kan det foreslås bruk av trådløse akustiske sensorer for verktøy overvåking i prosessen der pressboltene blir kuttet opp i mindre biter, og en allsidig multisensor platform for digital tvilling. Ved å overvåke sagens tilstand eller inhomogenitet i aluminiumen kan maskin-til-maskin kommunikasjon til sagen brukes for å minimere toleransene på produktene, og for å hindre defekter på samme måte som i Aachen forsøkene i 5G-SMART prosjektet (5G-SMART D3.4, 2022). Trådløse sensorer kan muligens også utplasseres på annen kritisk infrastruktur for sanntidsovervåkning som kan minimere nedetid og forutsi vedlikehold. For å forbedre intralogistikken kan gaffeltruckerne byttes ut med tilsvarende mobile roboter for å frigjøre personell til andre oppgaver. På den måten kan helkontinuerlige skift reduseres og risikoen for uhell med manuell styring av gaffeltrucker kan reduseres.

#### **Kartlegging for nettverksalternativ:**

**Oppsett:** De foreslåtte bruksområdene befinner seg i begrensede områder i industricampuset. Det er hovedsakelig to områder som behøver 5G-dekning, nemlig pressboltstøperiet og trådstøperiet. Nøyaktig areal er ikke tilgjengelig, men baseres på kart fra 2013 (Hydro, 2013). Pressboltstøperiet har et areal på 50 000 kvadratmeter og trådstøperiet har et areal på 33 000 kvadratmeter. Totalt har industricampuset et areal på 170 000 kvadratmeter med flere bygninger og store utendørs områder. Det betyr at områdene som skal dekkes er ganske store, og vil kreve flere basestasjoner.

**Dekningsbehov:** For de foreslåtte bruksområdene er det behov for dekning innendørs i trådstøperiet, og både innendørs og utendørs i pressboltstøperiet for å dekke lageret utendørs. Det betyr at det må være basestasjoner med RAN både innendørs og utendørs som legger til på investeringskostnaden.

**Fabrikkoppsett:** Fabrikken har et langt smelteverk og flere lengre støperihaller. Det er 60 elektrolyseceller og flere maskiner med reflekterende overflater eller tykke materialer som kan skape intereferens på signalene. Plantegninger eller informasjon om som trengs for 3GPP Indoor Factory Channel Mode er ikke tilgjengelig. Det betyr at radioplanlegging og konfigurering av nettverket kan være en stor utfordring, og kan kreve ekspertise.

**Overlappende nett:** Informasjon om private nett på industricampuset til Hydro på Karmøy er ikke tilgjengelig. Til tross for det antas det at eventuelle private nett i området er eid av Hydro siden de okkuperer et veldig stort område. I følge dekningskartene til Telenor, Telia og Ice har alle de tre MNO-ene overlappende dekning på sine kommersielle nettverk (Telenor, u.å., Telia, u.å., Ice, u.å.). Dette inkluderer overlappende 5G-dekning på deler av industricampuset. Telenor dekker deler

havnen med 5G, og ifølge Telia sitt kart er det fragmentert 5G-dekning på enkelte deler av industricampuset.

**Makronett oppsett:** Nøyaktig informasjon om de kommersielle basestasjonene i området er ikke tilgjengelig, men basert på dekningskartene går det an å finne omtrentlig plassering. RAN på basestasjonene belyser områder med dekning, og disse områdene er synlige på kartene. Basert på dette ser det ut til at både Telenor og Ice har en basestasjon inne på industricampuset, men kun Telenor sin gir 5G-dekning. På samme måte ser det ut som om Telia sin basestasjon for 5G er et godt stykke unna industricampuset siden det hovedsakelig belyser fjorden med dekning. Derfor ser det ut til at kun Telenor har en basestasjon på området som er relevant for analysen. I likhet med selve plasseringen til basestasjonene er informasjon rundt hvilke frekvensressurser MNO-ene har brukt i området ikke tilgjengelig. Til tross for dette er det mulig å anta hvilke frekvensbånd som er brukt basert på dekningskartene og Nkom sine tildelinger av frekvensbånd. De kommersielle båndene bruker 700 MHz og 3,6 GHz-båndene for 5G, og 700 MHz-båndet har både dårligere ytelse og lengere rekkevidde enn 3,6 GHz-båndet (Nkom, 2022). Siden Telenor antas å ha den eneste basestasjonen som kan påvirke nettverket kan det ut i fra dekningskartet deres antas at kun 700 MHz-båndet er brukt. Siden det antas det ikke er et privat 5G-nettverk i området allerede antas det at 3,8-4,2 GHz-båndet er tilgjengelig. Av samme grunn kan det også være mulig å søke om en testlisens for 26 GHz-båndet.

Dette betyr at PNI-NPN ved skivedeling krever ekstra utbygging av basestasjoner og implementering av 3,6 GHz-båndet, og at Telenor er kan være den billigste tilbyderen siden de allerede har en basestasjon i området. Både PNI-NPN med delt kjernenett/RAN og SNPN er mulig, men krever samhandling med Telenor på grunn av den eksisterende basestasjonen på området.

**Miljø:** Miljøet rundt Hydro Karmøy ligner mest på en landsbygd siden det er omringet av sjø og det er et stykke til forstadene til Karmøy. Likevel er fabrikk og industricampuset veldig tilgjengelig både fra båt og bil. Det betyr at risikoen for naboklager rundt utbygging eller interferens fra andre kilder er liten.

## Datainnhenting

For å måle oppnåelse av de foreslåtte tekniske målene og effekten av bruksområdene behøves det innhenting av relevant data. I likhet med andre deler av analysen var tilgjengeligheten av data også her et problem. Derfor ble noen antagelser tatt basert på tilgjengelig informasjon. De tre tekniske målene som ble foreslått på Hydro Karmøy var bærekraft, trygghet og kvalitet. I kapittel 5.1 ble de ulike KPI-ene for hver av de tekniske målene foreslått. For de foreslåtte tekniske målene i denne analysen behøves kun data for de korresponderende KPI-ene.

Først ut er bærekraft med to korresponderende KPI-er, nemlig karbonavtrykk og strømforbruchsforhold. Siden aluminiumsproduksjon er veldig kraftintensiv og fabrikk på Karmøy allerede har den mest effektive elektrolyseprosessen i verden antas det at 5G ikke kan redusere karbonavtrykk. På den andre siden antas at det er mulig å redusere strømbruket i støperiet ved å optimalisere strømforbruket (5G-SMART D1.3, 2021)). Før 5G applikasjonen har Hydro Karmøy et karbonavtrykk på 1970 kg CO<sub>2</sub> per tonn aluminium i Norge (Hydro, 2022). I tillegg har de et strømforbruk på 12000 kWh per tonn aluminium (Hydro, 2022).

Det neste målet er trygghet som reflekteres av nedetid ved reparasjoner, vedlikehold og maskinerifeil, samt antall ulykker. Før 5G applikasjonen har Hydro en ulykkesrate per million

arbeidstimer på 4,7 i Norge (Hydro, 2022). Basert på begrenset tilgjengelig informasjon og av praktiske årsaker antas total nedetid før applikasjonen å være på 5,33% av tilgjengelig tid. Det antas også at både antall ulykker og total nedetid kan reduseres (5G-SMART D1.3, 2020).

Det siste tekniske målet er kvalitet som reflekteres av totalt antall produkt og forholdet mellom dårlige og gode produkt. Siden primæraluminiumen som produseres allerede bruker en av de mest effektive metodene i verden fokuserer dette målet på støperiproduksjonen (Hydro, 2022). Av praktiske årsaker antas kvalitetsforholdet i begge støperiene å være 93,03% før 5G applikasjoner.

For de to økonomiske evalueringene NPV og ROI behøves en tidshorisont og en diskonteringsrente. Tidshorisonten til investeringen antas å være kort basert på at teknologien er ny, og at teknologiske fremskritt kan gjøre teknologiene enda bedre i nær framtid. Renten bør reflektere Hydro Karmøy sitt avkastningskrav og risikoen på investeringen (Demmel og Askin, 1992). Siden de foreslåtte bruksområdene er i en tidlig fase og de estimerte fordelene er basert på et svakt forskningsgrunnlag anses risikoen å være høy. Foreslått tidshorisont og diskonteringsrente på investeringene er 5 år med 30% diskontering.

### **Valg av bruksområde**

Basert på de tekniske målene foreslått for Hydro Karmøy og kartleggingen av produksjonsmiljøet er tre bruksområder foreslått, sanntidsovervåking av støperimaskineri for å redusere toleransene på pressbolter, allsidige MSP for å redusere strømforbruk, vedlikehold og nedetid, og AMR-flåter for intralogistikk. Teknologien bak bruksområdene baseres på de konseptutprøvde oppsettene i 5G-SMART funnet i Kapittel 5.3 (5G-SMART D3.4, 2022, 5G-SMART D4.3, 2021).

Det første bruksområde foreslått er et AE-sensor system som et høyt pålitelig instrument for å måle og karakterisere interaksjonen mellom maskineriets sag og pressboltene i pressboltstøperiet. Informasjonen gitt av sensoren brukes til å reaktivt kontrollere sageprosessen med veldig lave reaksjonstider. Det kan brukes til å for eksempel stoppe sagen ved inhomogeniteter eller forutsi når sagen bør byttes ut. I tillegg til å gi såpass nøyaktige kutt at toleransen på dimensjonene til pressboltene kan reduseres. Av praktiske årsaker antas det i den økonomiske og tekniske analysen at toleransen kan reduseres til null, slik at en hver pressbolt får perfekte dimensjoner. Ikke nok informasjon er tilgjengelig om denne prosessen til at det går an å gå i mer detalj om potensielle fordeler. Detaljer om lignende konseptutprøvd applikasjon som dette forslaget er basert på er tilgjengelig i 5G-SMART D3.4 (2022).

Det andre bruksområdet foreslått er en allsidig MSP for sanntidsovervåking av forskjellige prosesser, maskineri og miljø på fabrikken. Forskjellige antall og typer sensorer av MSP kan brukes og konfigureres fleksibelt basert på applikasjonen. Dette kan brukes til å lage en digital tvilling av fabrikkprosessene, der ulike prosesser og data kan ses i sanntid. Her kan også data fra AE-sensoren brukes. Forslag til prosesser som kan dra nytte sensorer er overvåking av strømbruk på forskjellige maskiner i støperiene, temperaturmålere i varme soner for arbeidernes trygghet, og i smelte eller støperiprosessene for å ha nøyaktig overblikk over aluminiumen, og til slutt for å vurdere livstiden til for eksempel støperipressene og elektrolysecellene. Ikke nok informasjon er tilgjengelig om de spesifikke prosessene på Hydro Karmøy. Av den grunnen antas det at det er mulig å optimalisere strømbruken i enkelte områder for å få ned energibruken, selv om det er usannsynlig i elektrolysecellene da de allerede vært forsket mye på (Hydro, 2022). Videre antas det at antall ulykker kan gå ned dersom arbeiderne har tilgang på mer informasjon om varme soner og status på ulike maskiner. Til slutt antas det at nedetid, antall feil og antall kastede produkter kan reduseres ved funksjoner i en lokal skyløsning som kan forutsi optimalt vedlikehold (5G-SMART D3.4).

Det tredje bruksområdet foreslått er for AMR-ene er ved to ulike plasser på Hydro Karmøy. Den første er mellom pressboltstøperiet og utendørslageret, og den andre mellom trådstøperiet og utendørslageret. Disse flåtene frakter paller med ferdige pressbolter og aluminiumstråder til oppmerking, og videre til utendørs lager der de blir lastet opp til båter eller lastebiler. Det betyr totalt to AMR-flåter de ulike områdene. Det meste av kontrollfunksjoner til AMR-ene foreslås å utføres i en lokal skyløsning. Det antas at dette kan redusere antallskiftarbeidere ved å frigjøre logistikk arbeidere, slik at total lønnskostnad reduseres. Flåtesestørrelsene ble estimert basert på praktiske antagelser. Der antall paller per dag og prosesseringstid per part avgjør flåtestørrelsene. Prosesseringstiden per parti antas å være lang nok til at de samme AMR-ene rekker å levere pallene til lageret, og deretter returnere til støperiene før neste parti er ferdigstilt. Med fire parti daglig blir det en total flåtestørrelse på 51 AMR-er. Derfor foreslås det 28 AMR-er i pressbolt flåten og 18 AMR-er i aluminiumstråd flåten. Størrelsen på flåtene burde likevel være fleksibel, både på grunn av antagelsene, framtidige bruksområder (e.g., AMR-flåte på kaien som på Yara Herøya) og fordi AMR-ene må ha tid til å lade opp batteriene sine.

### **Applikasjonstjenester**

Basert på funnene i Kapittel 5.3 er krever bruksområdene følgende applikasjonstjenester. For AE-sensoren kreves det maskin-til-maskin kommunikasjon, men siden bruksområde antas å kun bestå av en maskin behøves ikke nettverket å konfigureres etter mMTC. Dette bruksområde krever to applikasjonstjenester (5G-SMART D1.1, 2020):

1. Måledata fra AE-sensoren til maskinkontrolleren.
2. Konfigurasjonsdata fra lokal skyløsning og maskinkontroller til AE-sensor.

For en allsidig MSP kreves forskjellige applikasjonstjenester ut i fra applikasjon og bruksområde. Likevel setter ikke applikasjonstjenestene til MSP de strengeste kravene siden de for det meste brukes til overvåkning, og ikke kontroll i motsetning til AE-sensoren. Derfor har de foreslåtte sensorene følgende krav til applikasjonstjenester (5G-SMART D1.1, 2020):

3. Måledata fra forskjellige MSP sensorer til lokal skytjeneste.
4. Konfigurasjonsdata fra lokal skytjeneste til MSP sensorer.

For AMR-flåtene og en autonom lastebil med kontrollfunksjonen på lokale servere kreves det to applikasjonstjenester (Intervju A3, Telenor, 2022, 5G-SMART D1.1, 2020):

5. Sensordata fra AMR til lokal skyløsning. Sensordata foreslås å være basert på SLAM og LiDAR i stedet for kamera for å redusere kravet for UL/DL-hastigheter i form av eMBB.
6. Kontrollfunksjon fra lokal skyløsning til AMR.

Totalt sett er det seks ulike applikasjonstjenester. MSP applikasjonstjenestene kan brytes ned ytterligere, men siden de uansett ikke setter strenge krav til kommunikasjonstjenester ble ikke det gjort (5G-SMART D3.4, 2022).

### **Kommunikasjonstjenester**

Hver av de seks applikasjonstjenestene kan samsvare mot en spesifikk kommunikasjonstjeneste for 5G, nemlig eMBB, URLLC eller mMTC. Følgende er foreslåtte kommunikasjonstjenester presentert for de seks applikasjonstjenestene i rekkefølgen de ble presentert:

1. Applikasjonstjenesten setter høye krav til pålitelighet og tidsforsinkelser for at kontrolleren til maskinen skal kunne reagere lynrask på sensordata. Siden dette er maskin-til-maskin

kommunikasjon vil flere applikasjoner kreve mMTC, men siden det er snakk om en applikasjon er kommunikasjonstjenesten URLLC (5G-SMART D1.1, 2020).

2. Konfigurasjonsdataen som sendes til AE-sensoren består for eksempel av nye programvare oppdateringer eller tilpasning av målekonfigurasjoner. Dette krever verken store datahastigheter eller lave tidsforsinkelser, men det setter fortsatt krav om pålitelighet (5G-SMART D1.1, 2020). Derfor er kommunikasjonstjenesten URLLC.
3. Måledata fra MSP sensorene kan kreve høyere DL/UL-hastigheter eller lavere tidsforsinkelser basert på applikasjonen. Ved høyere antall sensorer vil det også kreves større kapasitet av nettet (Intervju A.3, Telenor, 2022). Basert på de foreslåtte bruksområdene og siden antall sensorapplikasjoner antas å være begrenset krever denne applikasjonstjenesten mest URLLC-tjenester (5G-SMART D1.1, 2020).
4. På samme måte som applikasjonstjeneste nummer 2, settes det ikke store krav til kommunikasjonstjenesten. I tillegg settes det ikke like høyt krav til pålitelighet for denne applikasjonstjenesten (5G-SMART D1.1, 2020). Kommunikasjonstjenesten er derfor ikke relevant for denne applikasjonstjenesten.
5. I motsetning til de forrige applikasjonstjenestene krever sensordataen fra AMR-ene større båndbredde og UL-hastighet (5G-SMART D1.1, 2020). Samtidig krever de relativt lave tidsforsinkelser og høy pålitelighet slik at AMR-ene kan reagere raskt nok på hinder og obstruksjoner i veibanen. Av denne grunnen ble foreslått AMR-er basert på SLAM og LiDAR-sensordata. Dette setter lavere krav til båndbredde og hastigheter enn for eksempel bruk av 3D-kameraer (5G-SMART D4.3, 2021). Likevell setter denne applikasjonstjenesten krav til både URLLC og eMBB-tjenester.
6. Denne applikasjonstjenesten har akkurat samme krav til kommunikasjonstjenester som nummer 5 av samme årsaker. Forskjellen er at kravet er på DL-hastigheter i stedet for UL-hastigheter (5G-SMART D1.1, 2020). Derfor krever applikasjonstjenesten både URLLC og eMBB-tjenester.

### **Ytelseskrav og karakteristikker**

I dette trinnet identifiseres først spesifikke ytelseskrav som kreves av kommunikasjonstjenesten for at bruksområdet skal fungere. Deretter foreslås nettverkskarakteristikker basert på bruksområdene og funnene i analysen. Basert på dette foreslås til slutt et nettverksalternativ for Hydro Karmøy.

Ytelseskravene til de forskjellige applikasjonstjenestene er basert på forsøkene av korresponderende bruksområdet i 5G-SMART prosjektet (5G-SMART D1.1, 2020).

Karakteristikkene til nettverket bestemmes både av driftskrav og funksjonelle krav fra bruksområdene, og ønsker fra industriaktøren. Driftskravene beskriver hovedsakelig krav til ulik programvare og IT-løsninger, mens funksjonelle krav beskriver krav som 5G-infrastrukturen må oppnå. Krav relevant for de foreslåtte bruksområdene ble basert på resultater på forskning på tilsvarende bruksområder i forskningsprosjektet 5G-SMART (D1.1, 2020).

Siden det kun er tre spesifikke bruksområder foreslått til å begynne bør kommunikasjonstjenesten være fleksibel mot å støtte flere bruksområder i fremtiden. Derfor er det også viktig at Hydro har muligheten til å optimalisere ytelseskrav på et senere tidspunkt. Ytelseskrav kan også endres dersom flere sensorapplikasjoner i MSP-en settes opp. Videre kan det være viktig at dekningen og nettverket kan skaleres opp utover den første utbyggingen. Grunnen til dette er at de foreslåtte bruksområdene kun befinner seg på spesifikke deler av industricampuset. Dersom det er ønskelig med bruksområder i flere deler av industricampuset må dekningen utvides. I tillegg vil enkel skalerbarhet være viktig dersom Hydro har lyst til å implementere private 5G nettverk på flere av



fabrikkene sine i Norge. Dette kan bidra til å oppnå skalafordeler (5G-SMART D1.3, 2021). Til slutt vil det være veldig viktig å beskytte prosess/informasjonsdata og kontrollerfunksjoner av flere grunner. For det første kom det fram i analysen at Hydro anser dataangrep som en stor trussel, og vil gjøre tiltak for å hindre angrep. For det andre er de foreslåtte bruksområdene kritisk for driften, dersom et dataangrep forstyrrer kontrollfunksjonen til AMR-flåtene eller maskineriet kan det få store konsekvenser økonomisk, miljømessig eller for tryggheten til arbeiderne (IEC, 2018). For det tredje har Hydro Karmøy et stort konkurransefortrinn i form av den mest energieffektive og karbonnøytrale produktserien Hydro REDUXA (Hydro, 2022). Informasjonen om teknologien bak denne er strengt konfidensielt, og derfor er det kritisk at prosessdata som inneholder informasjon om dette holdes på lokalet. Dette gjelder både når det kommer til overføring og lagring av data.

Det siste punktet i analysen går ut på evaluere tilgjengelige nettverksalternativ opp mot tilgjengelige forretningsmodeller. RAN må bygges ut til å belyse to områder, både innendørs og utendørs. Det må være basert på URLLC innendørs og eMMB utendørs, og må samsvare med de spesifikke funksjonelle kravene og ytelseskravene presentert i Tabell 5.6 og Tabell 5.7. Basert på funnene i analysen er det kun ett nettverksalternativ som kan møte alle kravene, med to forskjellige forretningsmodeller å velge mellom (5G-SMART D1.3, 2021). Enten SNPN der Hydro gjør alt selv, eller SNPN der en MNO eller tredjepart er integrator og nettverksoperatør. Dette er basert på forskjellene mellom de ulike nettverksmodellene funnet i 5G-SMART D1.3 (2021). Denne oversikten over nettverksalternativene er tilgjengelig i Appendiks B, og det spesifikke nettverksalternativet som anbefales for Hydro er SNPN alternativ 3a. På grunn av krav om sikkerhet der data ikke skal forlate industricampuset utelukkes PNI-NPN alternativ (5G-SMART D1.3). I tillegg er SNPN best på framtidig ytelsestilpasning, og fleksibelt nok til å støtte flere bruksområder i fremtiden (5G-SMART D1.3). Og siden Telenor allerede har en basestasjon på området, og for å spare kostnader relatert til å bygge egen kompetanse og infrastruktur, anbefales det et samarbeid med Telenor. Der Telenor er integrator og operatør. Dette er også i tråd med krav om kommunikasjonstjenestens skalerbarhet og fleksibilitet. Telenor kan også støtte driftskravene til de ulike bruksområdene. Videre anbefales det at Telenor kjøper flere frekvenstillatelser i 3,8-4,2 GHz-båndet av Nkom. Først en høyeffektsbasestasjon på området til utendørslageret for å støtte eMBB, og flere laveffektsstillatelser for innendørsdekning for å støtte URLLC (Nkom, 2021). Grunnen til at Telenor kan eie frekvensressursene er at det kan bli lettere å skalere nettverket, og for å unngå konflikter med Telenors eksisterende basestasjoner. Til slutt kan det også være mulig å søke om en testlisens for 26 GHz-båndet for å forbedre forsinkelsene. Siden Telenor allerede har fått innvilget dette på Herøya kan det være lettere å få dette til på Karmøy også (Intervju A.3, Telenor, 2022). Dette nettverksalternativene er en av de dyreste, men på grunn av Hydros størrelse og tidligere investeringer i teknologi antas det å være et rimelig forslag (Hydro, 2022).

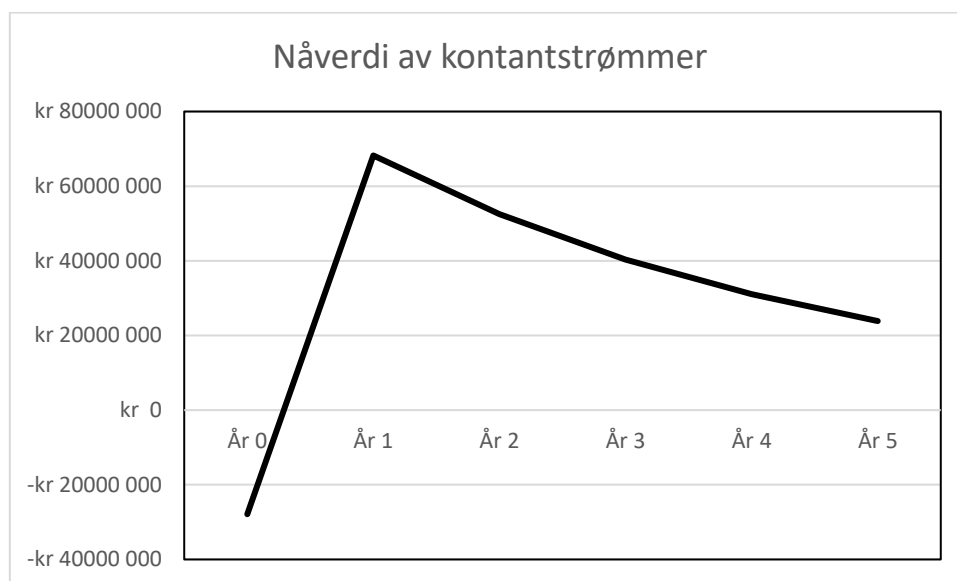
## 6.2 Resultater fra teoretisk analyse på Hydro Karmøy

I denne seksjonen besvares forskningsspørsmål 3 ved å måle verdien av nettverksalternativet og bruksområdene fra analysen på Hydro Karmøy basert på to økonomiske modeller og tre tekniske mål. Metoden for å måle dette er beskrevet i Kapittel 5.1, likevel måtte spesielle hensyn tas til den spesifikke applikasjonen. Antagelser og beregninger er diskutert i Kapittel 8.3. Først presenteres resultatene av de tekniske målene bærekraft, trygghet og kvalitet. Deretter presenteres kostnadsmodelleringen, og til slutt resultatene fra de to økonomiske modellene. Input for KPI-ene og regnskap som reflekterer de tekniske målene er tilgjengelig i Appendiks B.1 og B.2. Direkte effekt på kontantstrømmer er tilgjengelig i Appendiks B.3. Kostnadsmodellering og økonomisk modellering er vist i Appendiks B.4 og Appendiks B.5.

De undersøkte bruksområdene i analysen av Hydro Karmøy resulterte i en forbedring av alle foreslåtte tekniske mål, og nesten alle korresponderende KPI-er. Det ble funnet en liten økning på 1.09% for bærekraft, der det var null forskjell i karbonavtrykk, 1% reduksjon i strømforbruk og 0.27% reduksjon i råvarer brukt. Videre ble en økning på 5.67% for trygghet funnet, med en 6% reduksjon i total nedetid, en 1% økning i levetid for maskineri og en 10% reduksjon i antall ulykker per million arbeidstimer. Tilslutt ble det funnet en økning på 10% i kvalitet, der det var en 10% reduksjon i antall kastede produkt.

Den totale CAPEX-en basert på bruksområdene og nettverksalternativet foreslått for Hydro Karmøy ble 27 874 450 NOK. Dette inkluderte nettverkskostnader på 5 420 700 NOK, samt applikasjonskostnader på 460 000 NOK for sensorsystemet og 21 993 750 NOK for AMR-flåtene. Total årlig OPEX for investeringene ble 2 540 376 NOK. Dette inkluderte nettverkskostnader på 1 641 600 NOK, samt kostnader på 2 540 000 NOK for sensorsystemet og 898 776 NOK for AMR-flåtene. Det er verdt å nevne at kostnadene ikke er representative og brukes kun i sammenhengen med denne teoretiske analysen for å besvare forskningsspørsmål 3. Detaljer rundt kostnadsposter er beskrevet i Kapittel 6.1 og av andre faktorer beskrevet i denne rapporten. Faktiske kostnader må innhentes fra leverandører.

Resultatene fra de to økonomiske modellene viste en stor avkastning for de foreslåtte bruksområdene. NPV av investeringene ble på 188 151 402 NOK og ROI ble på 575%. Nåverdi av kontantstrømmene er vist i Figur 7.1.



**Figur 7.1: Nåverdi av kontantstrømmer fra analysen på Hydro Karmøy.**

Totalt sett er resultatene fra analysen utelukkende positive for de foreslåtte bruksområdene basert på rammeverket utviklet i denne oppgaven. Investeringene tjenes inn etter ett år, og utgjør positive effekter på bærekraft, trygghet og kvalitet som igjen påvirker driften og finansielle resultater positivt.

## 8 Diskusjon

Denne oppgaven har så langt gjennomgått aktuelt teknisk nivå for bruksområder og private 5G nettverk. Samt identifisert relevante faktorer for applikasjoner av private 5G nettverk, i tillegg til å utvikle et rammeverk som ble brukt i en analyse av en norsk fabrikk. Dette kapittelet diskuterer resultatene i lys av forskningsmålet og forskningsspørsmålene, samt begrensninger og svakheter med det foreslåtte rammeverket og analysen. Videre introduseres synspunkter på framtidige forskning på private 5G nettverk, samtidig diskuteres bidragene og de generelle begrensningene i studien.

### 8.1 Kvalitativ gjennomgang

I praksis består private 5G nettverk av en rekke teknologiske og praktiske hensyn. Industriaktører står ovenfor utfordringen med å vite hvordan man utnytter denne nye teknologien for å oppnå ønskede produktivets og fleksibilitets forbedringer. Som identifisert i forskningslitteraturen finnes det et gap mellom utviklingen av passende applikasjoner og teknologiske spesifikasjoner til nettverket for å skape verdi. Få forskere har fokusert på knytte dette sammen. Klare definisjoner og oversikt over faktorer som må adresseres for både valg av bruksområder og nettverksalternativ er enten fragmentert eller manglende fra litteraturen. Derfor ble relevante felt gjennomgått under private 5G netts verdi og aktuelt teknisk nivå for bruksområder ved litteraturgjennomgang og markedsundersøkelser basert på intervju, alternative kilder og forskning. Dette for å identifisere faktorene som påvirker nettverksalternativ og bruksområde, og for knytte feltene sammen.

Resultatene fra gjennomgangen viser stadig flere industriaktører investerer i private 5G nettverk, men at teknologiene fortsatt er i startfasen og det er store usikkerheter knyttet til investeringene. Bruken av private 5G-nettverk i Norge enda og globale applikasjoner er lite åpne om resultater, derfor er det vanskelig å bevise verdien til industriaktører. I tillegg er det fortsatt vanskelig å identifisere hvilke behov et 5G-nettverk kan dekke og hvordan man skal gå fram for å implementere et privat 5G-nett. Det ble identifisert tre kategorier private 5G nettverk som alle kunne realiseres med forskjellige forretningsmodeller.

Et spennende funn som denne studien ikke gikk så mye innpå var bruken 5G for TSN og industrielt LAN, der man bytter ut alle kabler med trådløs 5G infrastruktur. Selv om kablede løsninger fortsatt utkonkurrer 5G på ytelse er det fullt mulig å bruke. Men det krever videre forskning på trafikk prioritering og nøye radioplanlegging.

På grunn av den raske utviklingen i feltet til private 5G-nettverk og andre fagfelt innen bruksområder er det også utfordringer knyttet til nomenklaturen (5G-SMART report, 2020). Forskjellig terminologi blir brukt i forskjellige selskap og på tvers av landegrensler. I tillegg blir flere uttrykk blandet sammen og brukt om hverandre, eller i enkelte tilfeller rett og slett brukt i feil kontekst. Dette skyldes at det er mange nye konsept og korresponderende begrep der de fleste har løse eller manglende definisjoner. Dette opplevdes av forfatteren både under intervju og litteratursøk, samt i andre alternative kilder. Dette reflekteres også gjennom oppgaven der det burde blitt brukt mer tid på å definere enkelte begrep og konsept, slik at uttrykk gjennom studien var konsistent og bestod av bredt akseptert nomenklatur. I tillegg henger oversettelsene av nøkkelkonsept fra engelsk til norsk langt bak utviklingen i teknologien. Totalt sett har dette vært en kilde til forvirring både for forfatteren, industrien og i forskningsprosjekt som 5G-SMART. I 5G-SMART ble dette adressert med en egen rapport der konsept og terminologi ble definert og forklart basert på den mest aksepterte bruken i økosystem mellom industri, institusjoner og telekommunikasjonsselskap (5G-SMART report, 2020). Andre forskningsartikler har også prøvd å adressert dette (Suleiman et al., 2022, O'Connell et

al., 2020, Marcon et al., 2018). Og ved videre forskning i Norge burde slik nomenklatur bli utviklet eller tatt hensyn til i større grad.

Ofte er det selve implementasjonen og drift som er det vanskelige, derfor er det viktig med å gå i dybden på vært enkelt bruksområde. Blant annet må man velge styringssystem for bruksområder og nett. Det er også stort fokus på de tekniske problemene fra MNO-siden. Radioplanlegging, optimalisering, nettverksadministrasjon og tidsforsinkelser. Manglende konseptbevis, antenne konfigurering på brukerneheten som diskutert i 5G-SMART D2.3 (2022). Og ved analysere slike faktorer kan det kan avsløres faktorer som denne studien ikke fikk gått inn på.

## 8.2 Utviklingen av rammeverket

På grunn av den store bredden i antall fagfelt denne studien tar for seg måtte en del faktorer ekskluderes fra analysen og rammeverket. Private 5G nett omhandler flere fagfelt innenfor både kommunikasjonsteknologi, robotikk, produksjon og logistikk. I kommunikasjonsteknologi alene er det flere forskningsfelt innenfor ulike standarder, skyløsninger og optimalisering. Hvert av disse fagfeltene er under kontinuerlig forskning og utvikling. I tillegg, er det mulig å gå veldig dypt inn i hvert enkelt punkt. Og alle faktorene spiller inn i et privat 5G nett. En slik analyse som går i dybden på hvert enkelt punkt ville vært veldig omfattende, og krevd flere ressurser enn det forfatteren hadde tilgjengelig. På den andre siden var ikke poenget med denne studien å lage et detaljert beslutningsverktøy for industrien, men heller en oversikt over faktorer som industrien selv kan velge å gå dypere inn i. Og rammeverket dekker noen av de mest moderne funnene fra forskning på feltet. Noen av faktorene forfatteren ekskluderte er diskutert under.

Denne studien fokuserte i stor grad på et begrenset antall bruksområder for private 5G nettverk av enn rekke grunner. Den første grunnen var arbeidsmengden det hadde påført å inkludere flere. Ericsson identifiserte over 200 ulike bruksområder for industri allerede i 2019, og mange av disse er helt egne forskningsfelt med egne tekniske spesifikasjoner og krav (Ericsson, 2019). En slik analyse hadde krevd flere forfattere og mer tid. Den andre grunnen er manglende konseptbevis, konseptutprøving, eller gjennomførbarhetsbevis i industrielle applikasjoner på bruksområder. Veldig mange av de foreslåtte bruksområdene krever store investeringer og omfattende integrering for å komme i gang. Derfor kunne det rettferdiggjøres å ikke ta de med i rammeverket. Likevel er rammeverket designet på en måte som gjør at det går an å inkludere flere bruksområder etterhvert som flere industriaktører tar de i bruk og man får konseptbevis. Samtidig ble de valgte bruksområdene tatt med fordi de ble validert i 5G-SMART forskningsprosjektet og ved andre industrielle applikasjoner. Og dermed er de veldig aktuelle for nye industrielle 5G applikasjoner i tråd med forskningsmålet til denne studien.

Innen det generelle begrepe industri er det utallige prosesser som analyseres som et potensielt bruksområde. Derfor er vanskelig å lage et rammeverk som identifiserer nøyaktige bruksområder. I tillegg er lite forskning å gå på i dette området. I tillegg har industriaktører mye bedre innsikt i egne prosesser enn en ekstern person kan ha. Derfor var rammeverket basert på å stille de riktige spørsmålene slik at industriaktørene selv kan identifisere bruksområde, deretter er det mye enklere å begrense søket etter applikasjonstjenester som kan realisere det. De bruksområdene som er undersøkt i denne studien kan brukes som en start. Samtidig er det lettere å hyre eksperter til å identifisere applikasjonstjenester når bruksområde allerede er identifisert.

For å dekke et bredere spekter av industriaktører kunne rammeverket inkludert flere tekniske mål. De tekniske målene brukt i rammeverket stammet fra 5G-SMART. Da forfatterne identifiserte

målene var de basert på et litteratursøk og objektive meninger fra konsortiumet. De identifiserte først 45 unike tekniske mål funnet i litteraturgjennomgang, deretter rangerte de disse basert på siteringer før de til slutt fikk ekspert meninger fra konsortiumet. Denne framgangsmåten kan rettfærdiggjøre bruken i denne studien fordi ledende bedrifter som Ericsson, ABB, Orange, T-Systems og Bosch var inkludert. I tillegg, har forskningen vært nyttig for selskapene selv. På den andre siden er det vanskelig å måle hvor relevante disse tekniske målene er for norske bedrifter av en rekke grunner. For det første finnes det veldig få norske bedrifter som kan sammenlignes med størrelsen til de som ble vurdert i 5G-SMART. Industrien i Norge består for det meste små og mellomstore bedrifter (SSB, 2022), kontra de tidlige adopterne globalt som består av store internasjonale konsern.

En annen svakhet med rammeverket er at det ekskluderer noen ytelseskrav til kommunikasjonstjenesten. Dette var også hovedsakelig på grunn av kapasiteten til forfatteren. Den første er antall tilkoblede enheter per kvadrat meter, denne er først og fremst viktig for større fabrikker der det kan være mange tilkoblede enheter. I Norge er det mest små og mellomstore bedrifter, og derfor ble den ekskludert. Den andre er lokaliseringspresisjon. Den tredje er kommunikasjonsrekkevidde. Og den siste er mobilitet. Likevel er 5G som kommunikasjonstjeneste best på alle disse ytelseskravene. Hvis man derimot ville gjort en vurdering på flere ulike kommunikasjonsteknologier bør disse kravene inkluderes. Dette er fordi andre kommunikasjonstjenester som Wi-Fi er billigere å kan fungere for enkelte bruksområder. Uansett burde videreutvikling av rammeverket inkludert disse ytelseskravene da de er essensielle for enkelte bruksområder.

Siden private 5G nett fortsatt er i utviklingsstadiet kan ikke forfatteren garantere at han valgte å ekskludere de rette faktorene. For å sikre at forfatteren ekskluderte riktige faktorer kunne det blitt gjort en Delphi-studie med nettverksleverandørene Ericsson og Telenor. En slik studie prøver å oppnå konsensus blant eksperter på et spesifikt område, og prosedyren burde resultere i en god approksimasjon på grunn av kompetansen til deltakerne og fordelene med Delphi prosessen (von der Gracht, 2012). Delphi prosessen består av de fire elementene anonymitet, iterasjon, kontrollerte tilbakemeldinger og statistisk grupperespons (Rowe og Wright, 2001). I første runde kunne deltakerne gitt en karakter på viktigheten på hver faktor, ved for eksempel en Likert skala (Likert, 1932). I andre runde får deltakerne tilbake gjennomsnittlig karakter på hver faktor før de skal diskutere seg fram til et konsensus på endelige karakterer. På denne måten kunne faktorene med høyest karakter blitt med videre i rammeverket. En Delphi studie kunne blitt valgt fordi det muliggjør en bred studie på private 5G nett faktorer på kort tid og med tilgjengelig ekspertise fra Ericsson og Telenor. Grunnen til at dette ikke ble gjort var usikkerhet knyttet til tilgjengeligheten til eksperter og forventet lang respons tid blant potensielle deltakere. Likevel kunne en slik studie blitt planlagt fra starten og gitt større vitenskapelig kredibilitet til rammeverket.

Siden mye av tiden gikk til å identifisere faktorer og framgangsmåte ble det mindre tid til å utvikle og evaluere rammeverket. Dette var delvis på grunn av årsaker utenfor forfatterens kontroll som tilgjengelighet, forsinkelser og kapasitet. På den andre siden kunne mye tid blitt spart med en mer strukturert framgangsmåte med for eksempel et mer begrenset litteratursøk eller strukturerte intervju i begynnelsen. For forskningsmålet til denne studien kunne litteratursøket vært begrenset til 5G-SMART da dette forskningsprosjektet oppsummerer mye av eksisterende litteratur og aktuelt teknisk nivå på bruksområdene og nettverksalternativene, tillegg til at det er et av de mest moderne prosjektene på feltet. I stedet for å starte med et bredt litteratursøk hadde det vært fordelaktig å hatt et startpunkt som 5G-SMART som adresserer dagsaktuelle faktorer. Eventuelle andre supplementerende artikler kunne blitt oppsøkt ved et bredere litteratursøk. På samme måte kunne

innledende intervju besvart kritiske spørsmål tidlig og på den måten spart mye tid. I tillegg kunne forfatteren brukt ressursene fra Ericsson og Telenor hyppigere ved for eksempel den nevnte Delphi studien, flere intervju for å styrke studiens kredibilitet eller etterspørsel av mer kvantitativ data for å underbygge logiske argument. Slike tiltak kunne ha frigjort mer tid til å gå dypere i analysen og til å finpusse rapporten til en høy akademisk standard. På den andre siden har det vist seg vanskelig å få tilgang til sensitiv data og forsinkelser har vist seg å vært et problem. Denne kunne vært delvis løst med sterkere taushetsplikter til involverte eksterne parter fra universitet og båndlegging av studien. Større fokus på dette under planleggingsfasen kunne gitt tilgang på mer informasjon og større utnyttelse av ressursene. Samtidig er det vanskelig å si noe om hvordan det hadde påvirket tilgjengeligheten til ressurser i selskapene siden de ofte har mye å gjøre fra før.

Datagrunnlaget til forretningsmodellen er basert på 5G-SMART og meninger fra Telenor og Ericsson. Og funnene fra 5G-SMART er ikke ment som en omfattende håndbok for valg av forretningsmodell, men likevel oppsummerer det en rekke viktige aspekter industriaktører må vurdere for å gjøre et informert valg (D1.3). I tillegg, gir det en bredere oversikt fordi mange av valgene kommer an på lokale reguleringer, eksisterende økosystem, størrelsen på MNO-ene og industribedriften, samt de individuelle bruksområdene for produksjonsmiljøet. Videre krever mange av de tekniske funnene videre forskning for å finne ut nøyaktig hvilken forretningsmodell som passer. Og hvilken verdi de kan bringe. Generelle mål er bra for å øke interessen i starten, men industriaktører burde tilpasse fordelene mot nøyaktige prosesser i fabrikken.

### 8.3 Analyse av Hydro

Målet med analysen var både å besvare forskningsspørsmål 3 og teste ut rammeverket i en norsk fabrikk. Resultatene fra analysen hadde en stor positiv effekt på Hydro Karmøy. Det var forbedring på alle tekniske mål og investeringen ga avkastning. Likevel var analysen basert på for mange antagelser til at den kan konkludere med noe.

Siden prisene og kostnadene for de ulike teknologiene innen nettverk og applikasjoner ikke er nødvendig for å besvare forskningsspørsmål 3 ble det besluttet å ikke analysere de ulike kostnadspostene. Verdien 5G applikasjoner kan bringe er godt beskrevet av bruksområdene i analysen, resultatene og i den kvalitative gjennomgangen. Prisene og kostnadene ble heller satt basert på estimat fra lignende studier eller eksempler, selv om det kan diskuteres at de burde blitt satt høyere. Nøyaktige priser hadde krevd tilgang på informasjon som ikke kan offentliggjøres per dags dato, og hadde krevd ressurser som heller kunne blitt brukt på å besvare forskningsspørsmålene. I tillegg kan kostnadene enkelt endres i de økonomiske modellene dersom de blir tilgjengelig. På den andre siden er investeringskostnadene fundamentalt viktig for de valgte økonomiske modellene, og en stor faktor for investeringsbeslutninger generelt (STL Partners, 2021). Ved høye investeringskostnader blir avkastningskravet høyere, men med framgangsmåten foreslått i rammeverket ville det krevd urealistiske summer for å resultere i en negativ NPV eller ROI. Rammeverket har likevel en del svakheter og begrensinger som diskutert i seksjon 8.2, og på samme måte er heller ikke analysen perfekt. Svakheter og begrensinger i analysen er diskutert under.

I de økonomiske modellene var det antatt at de tekniske effektene av 5G applikasjonene ikke inntraff i det samme året som investeringene ble gjort. Dette var basert på at det tok to år med testing før Yara Herøya ble åpnet (Intervju A3, Telenor, 2022), og at det derfor kommer til å ta minst ett år før Hydro Karmøy vil se full effekt. Og siden Telenor ble foreslått som operatør og integrator kan de ta med seg noen av erfaringene fra den applikasjonen til Karmøy, slik at det tar kortere tid før effekten oppnås i forhold Herøya. Økningen i bærekraft var basert på endring i karbonavtrykk og

strømforbruk. Siden den mest kraftintensive delen av Hydro Karmøy er primærproduksjonen, og data var basert på hele fabrikken ble effekten av strøptimalisering redusert til 1% i forhold til det generelle estimatet funnet av Wang og Gao (2020). Videre ble det estimert at effekten på karbonavtrykket ikke kunne gjøres noe med basert på bruk av karbonanoder i prosessen ved aluminiumsproduksjon (Aluminium Association, 1984). Samtidig bruker Hydro mye av sin egen fornybar energi produksjon til fabrikkene i Norge (Hydro, 2022).

Siden det antas AE-sensoren har muligheten til å redusere toleransene kan dette drive kostnadene ned (5G-SMART D3.4, 2022). På den andre siden ble det ikke antatt at omsetning av dette bruksområdet økes fordi salgsummen er den samme innenfor de gitte toleransene. I utregningene ble det satt tre ulike scenarier basert på toleransene gitt for pressbolter. Scenariene regnet ut forskjellen i kostnad mellom å produsere pressbolter ved de høyeste og laveste toleransene. Effekten av AE-sensoren ble målt basert på at AE-sensoren kunne muliggjøre perfekt produksjon av hver eneste pressbolt. Forskjellen i kostnader av å produsere perfekte pressbolter kontra å produsere pressbolter innenfor toleransen ble kalkulert, og viste at AE-sensoren kunne produsere en årlig CF på 5 666 741 NOK.

Antall antagelser gjort svekker analysen. Verdien av datagrunnlaget er svakt, men målet var å illustrere hva verdien til 5G kan være. En analyse som viser faktisk verdi er ute av sikt til studien og krever tilgang på ekte data fra fabrikken, og skreddersydde estimater gjort på det aktuelle bruksområdet i stedet for effekter basert på litteratursøk.

Den største og mest åpenbare svakheten i denne delen ved evalueringen var at interne analysen ble gjort uten Hydro. Dette førte til en rekke utfordringer i kvantifiseringen av tekniske målene og KPI-ene. Og for at en slik evaluering virkelig skal kunne blitt brukt i en ekte applikasjon av 5G ville det kreve den dype innsikten og ekspertisen i fagfeltet kun de som jobber på fabrikken har. Uten fullstendig data og informasjon ble det tatt spekulative antagelser basert på den kvalitative gjennomgangen og den begrensede tilgjengelige informasjonen om Hydro Karmøy. For å virkelig kunne svare på spørsmålene i rammeverket ville det krevd dyp innsikt i forskningsfeltet rundt aluminiumsproduksjon og den spesifikke applikasjonen på Hydro Karmøy. På den andre siden ville en slik grundig gjennomgang inkludert sensitiv og konfidensiell informasjon som hadde gjort det vanskelig å publisere studien. Samtidig hadde en slik analyse vært utenfor sikt til denne studien. Målet var ikke en grundig analyse av et produksjonsmiljø, men heller et eksempel på hvordan 5G kan brukes med dagens teknologi og hvilken verdi det kan bringe. De spesifikke antagelsene er diskutert mer detaljert nedenfor. Basert på dette var det flere grunner til at akkurat Hydro Karmøy ble valgt. Den første var at Hydro har veldig mye informasjon tilgjengelig på nettsiden deres gjennom grundige årsrapporter, produktbeskrivelser og relevant fakta om aluminiumsproduksjon. Den andre grunnen var at Hydro sitt store fokus på forskning for å forbedre prosessene deres. De har historie med å investere både penger, tid og personell på forskning. Samtidig er fabrikken på Karmøy teknologipiloten til Hydro, der de tester ut nye teknologier. Noe som gjorde de høyst aktuell for en tidlig adaptasjon av 5G. Den siste grunnen var at Hydro er et stort nok selskap til å ha råd til de ulike investeringene implementasjon av 5G. I dag er investeringskostnadene en stor hindring for utbredte applikasjoner av private 5G nettverk, og globalt er det omtrent bare store og finansielt sterke selskap som bruker 5G. Totalt sett gjorde dette at Hydro hadde en profil for applikasjon av et privat 5G nettverk.

Det ble identifisert flere risikoer og strategiske mål i gjennomgangen av Hydro. Flere av disse målene pekte på problemer i forsyningskjeden og handelsbarrier, og for å møte dette i evalueringen av rammeverket ble økt kvalitet foreslått. Likevel kunne fleksibilitet blitt foreslått som et teknisk mål slik at produksjonen lett kan tilpasses på kort varsel når problemer oppstår i forsyningskjeden eller

handel. Grunnen til at dette ikke ble gjort var usikkerhet rundt kvantifisering av KPI-er relatert til produksjonen på Karmøy. Kvantifiseringen av fleksibilitet passet ikke til fabrikken på Karmøy av en rekke faktorer. På grunn av den rigide strukturen av fabrikker i aluminiumproduksjon er det vanskelig å øke produktvariasjonen. Og på grunn av manglende ekspertise på fagfeltet var det stor usikkerhet knyttet til hvilke 5G applikasjoner som kunne bistå med å respondere til endringer i forsyninger eller etterspørsel. Samtidig kan det argumenteres for at selve formelene ikke reflekterer fleksibilitet i et slikt miljø. Et utvidet litteratursøk på fagfeltet innen aluminium burde blitt gjort for å bedre reflektere hvordan fleksibilitet kunne blitt kvantifisert. Et annet teknisk mål som ble foreslått var bærekraft for optimalisere strømforbruk. Dette er også et område som krever ekspertise. Siden Hydro allerede investert tungt i forskning og utvikling på dette området er stor usikkerhet

I et steg av det foreslåtte rammeverket skal man kartlegge nettverksinformasjon om overlappende og makronett. På grunn av manglende informasjon om private nett i området ble informasjonen basert på dekningskartene til MNO-ene. Kartene kan være feil eller lite oppdatert, og i ekte applikasjoner burde man ha konkret informasjon på dette området. Feil informasjon på dette området kan føre til at man inkluderer eller ekskluderer nettverksalternativ på feil grunnlag.

Totalt sett ser det ut til at private 5G nettverk kan bringe stor verdi til industrien. Spesielt store selskap som Hydro kan dra store nytte ved å bruke teknologien gjennom hele organisasjonen. Siden Nkom har åpnet for bruk privat bruk av 3,8-4,2 GHz-frekvensbåndet kan det bli en konkurranse om å bli først.



## 9 Konklusjon

Denne studien satt av med et mål om å adressere gapet i litteraturen om faktorer som industrielle aktører for private nettverk i Norge ved å analysere forskjellige bruksområder en industrifabrikk i Norge kan benytte. Applikasjoner av 5G i Norge er få, men siden reguleringer åpner opp for mer omfattende bruk er det forventet at dette endrer seg i nær framtid. Studien fant en rekke faktorer industriaktører må vurdere før de investerer i et privat 5G nettverk. De viktigste funnene var at forretningsmodel kan ha stor påvirkning på blant annet datasikkerhet, framtidig tilpasning og kostnader. Og at verdien av 5G i stor grad er avhengig av riktig valg. For å hjelpe industrien i å navigere disse valgene ble det utviklet et rammeverk som ble testet på ved å analysere industrimiljøet på en norsk fabrikk. Basert på antagelsene i rammeverket viste resultatene en forbedring i Industri 4.0-trender som bærekraft og kvalitet, samt at nettverket ga stor avkastning. Likevel var analysen svekket av antagelser om industrimiljøet og effekten av 5G. Så selv om resultatene var positive, er det for tidlig å si hvor mye verdi en norsk industri bedrift kan få. Det kreves videre forskning på effektene av 5G med tilgang på faktiske data både fra leverandører og industriaktør for å validere den faktiske verdien.

## Referanser

- 3GPP. 2020. Study on management of Non-Public Networks (NPN) (Release 16).
- 5G PPP (2021), White Paper: 5G PPP Architecture Working Group – View on 5G Architecture, Version 4.0 – <https://zenodo.org/record/5155657>
- 5G-ACIA. 2019. 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios, Frankfurt, Germany, Jul. 2019.
- 5G-SMART, Deliverable 1.1. FORWARD LOOKING SMART MANUFACTURING USE CASES, REQUIREMENTS AND KPI'S, 2020.
- 5G-SMART, Deliverable 1.2. ANALYSIS OF BUSINESS VALUE CREATION ENABLED BY 5G FOR MANUFACTURING INDUSTRIES, 2021.
- 5G-SMART, Deliverable 1.3. OPERATOR BUSINESS MODELS FOR SMART MANUFACTURING, 2021.
- 5G-SMART, Deliverable 2.3. VALIDATION OF 5G CAPABILITIES FOR INDUSTRIAL ROBOTICS, 2022.
- 5G-SMART, Deliverable 3.4. REPORT ON 5G CAPABILITIES FOR ENHANCED INDUSTRIAL MANUFACTURING PROCESSES, 2022.
- 5G-SMART, Deliverable 4.3. REPORT ON DEVELOPEMENT OF THE 5G USE CASES, 2021.
- 5G-SMART, Deliverable 7.4. FINAL PROJECT REPORT, 2022,
- ADIB, D. 2019. 5G's Impact on Manufacturing - \$740BN of Benefits in 2030. STL Partners, London.
- Aijaz A. 2020. Private 5G: The future of industrial wireless, in IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 14, no. 4, pp. 136–145, Dec. 2020.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. 2015. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE communications surveys & tutorials, 17(4), 2347-2376.
- ALIZON, F., DALLERY, Y., ESSAFI, I. & FEILLET, D. 2009. Optimising material handling costs in an assembly workshop. International journal of production research, 47, 3853- 3866.
- Alliance, N. G. M. N. (2015). 5G white paper. Next generation mobile networks, white paper, 1.
- ANDERSEN, R. E., HANSEN, E. B., CERNY, D., MADSEN, S., PULENDRALINGAM, B., BØGH, S. & CHRYSOSTOMOU, D. 2017. Integration of a skill-based collaborative mobile robot in a smart cyber-physical environment. Procedia Manufacturing, 11, 114-123.
- ANDERSEN, V. J. 2021. Intralogistics System Design with Autonomous Mobile Robots. Master's thesis in Global Manufacturing Management.
- Budiyanto, Setiyo, Hakim, Erman, Rahayu & Fajar. 2021. Economic technology analysis of LTE advanced pro dual spectrum licensed and unlicensed access using discounted cash flow methods. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 22. 342. 10.11591/ijeecs.v22.i1.pp342-351.
- ČECH, M., WICHER, P., LENORT, R., MALČIĆ, T., DAVID, J., HOLMAN, D., STAŠ, D. & ZÁRUBA, J. 2020. Autonomous mobile robot technology for supplying assembly lines in the automotive industry. Acta Logistica, 7, 103-109.

- Cheng, J.; Chen, W.; Tao, F.; Lin, C.-L.; Da Xu, L. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *J. Ind. Inf. Integr.* 2018, 10, 10–19. [CrossRef]
- CHOOBINEH, F. F., ASEF-VAZIRI, A. & HUANG, X. 2012. Fleet sizing of automated guided vehicles: a linear programming approach based on closed queuing networks. *International Journal of Production Research*, 50, 3222-3235.
- CUSTODIO, L. & MACHADO, R. 2020. Flexible automated warehouse: a literature review and an innovative framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 533-558.
- DANG, Q.-V., NIELSEN, I. & STEGER-JENSEN, K. 2011. Mathematical formulation for mobile robot scheduling problem in a manufacturing cell. *IFIP international conference on advances in production management systems*, 2011. Springer, 37-44.
- Demmel, J. G.; Askin, R. G. 1992. A Multiple-Objective Decision Model for the Evaluation of Advanced Manufacturing System Technologies. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 1(3), p. 179-194.
- DIN ISO 22400-1. 2014. Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 1: Overview, concepts and terminology.
- ERICSSON. 2019. 5G for Business: A 2030 Market Compass. Setting a Direction for 5G Powered B2B Opportunities, Ericsson, Stockholm, Sweden, Oct. 2019.
- EU standard NACE rev.2 (2007). Statistical classification of economic activities in the European Community. Hentet fra: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902521/KS-RA-07-015-EN.PDF>
- FOTTNER, J., CLAUER, D., HORMES, F., FREITAG, M., BEINKE, T., OVERMEYER, L., GOTTWALD, S., ELBERT, R., SARNOW, T. & SCHMIDT, T. 2021. Autonomous Systems in Intralogistics–State of the Art and Future Research Challenges. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration.
- FRAGAPANE, G., DE KOSTER, R., SGARBOSSA, F. & STRANDHAGEN, J. O. 2021. Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*.
- FRAGAPANE, G., IVANOV, D., PERON, M., SGARBOSSA, F. & STRANDHAGEN, J. O. 2020. Increasing flexibility and productivity in industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Annals of operations research*, 1-19.
- Hassan N., Yau K. A. and Wu C. 2019. Edge Computing in 5G: A Review, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938534.
- Hydro. 2019a. Extrusion Ingots. Hentet fra: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20Extrusion%20Ingots%200918.pdf?docId=416541>
- Hydro. 2019b. Wire Rod. Hentet fra: <https://www.hydro.com/Document/Doc/Hydro%20Wire%20Rod%200918.pdf?docId=416347>
- Hydro. 2013. Melding om planlagt utvidelse av Hydro på Karmøy. Hentet fra: <https://www.karmoy.kommune.no/dokumenter/1087820>

Hydro. 2022. Annual report 2021. Hentet fra: <https://www.hydro.com/globalassets/06-investors/reports-and-presentations/annual-report/rdmar21/annual-report-2021-eng.pdf>

HU, S. J., KO, J., WEYAND, L., ELMARAGHY, H. A., LIEN, T. K., KOREN, Y., BLEY, H., CHRYSOLOURIS, G., NASR, N. & SHPITALNI, M. 2011. Assembly system design and operations for product variety. CIRP annals, 60, 715-733.

INDRI, M., LACHELLO, L., LAZZERO, I., SIBONA, F. & TRAPANI, S. 2019. Smart sensors applications for a new paradigm of a production line. Sensors, 19, 650.

International Labour Office. 2022. World Employment and Social Outlook: Trends 2022. (ILO Flagship Report). Hentet fra: [https://www.ilo.org/global/research/global-reports/weso/trends2022/WCMS\\_834081/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/global/research/global-reports/weso/trends2022/WCMS_834081/lang--en/index.htm)

Jerichow, A., Covell, B., Chandramouli, D., Rezaki, A., Lansisalmi, A., & Merkel, J. 2020. 3GPP non-public network security. Journal of ICT Standardization, 57-76.

Kang, N.; Zhao, C.; Li, J.; Horst, J. A. 2016: A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems. In: International Journal of Production Research. 54th Vol., Nr. 21, p. 6333– 6350.

Kelly, A., Nagy, B., Stager, D., & Unnikrishnan, R. 2007. Field and service applications-an infrastructure-free automated guided vehicle based on computer vision-an effort to make an industrial robot vehicle that can operate without supporting infrastructure. IEEE Robotics & Automation Magazine, 14(3), 24-34.

Kirsch, C., & Röhrig, C. (2011). Global localization and position tracking of an automated guided vehicle. IFAC Proceedings Volumes, 44(1), 14036-14041.

KOO, P.-H., JANG, J. & SUH, J. 2004a. Estimation of part waiting time and fleet sizing in AGV systems. International journal of flexible Manufacturing Systems, 16, 211-228.

KOREN, Y. & SHPITALNI, M. 2010. Design of reconfigurable manufacturing systems. Journal of manufacturing systems, 29, 130-141.

KOREN, Y. 2010. The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems, John Wiley & Sons.

KOUSI, N., KOUKAS, S., MICHALOS, G. & MAKRIS, S. 2019. Scheduling of smart intra– factory material supply operations using mobile robots. International Journal of Production Research, 57, 801-814.

LASI, H., FETTKE, P., KEMPER, H.-G., FELD, T. & HOFFMANN, M. 2014. Industry 4.0. Business & information systems engineering, 6, 239-242.

Leander, B., Čaušević, A., & Hansson, H. 2019. Applicability of the IEC 62443 standard in Industry 4.0/IoT. In Proceedings of the 14th International Conference on Availability, Reliability and Security (pp. 1-8).

Leung, Pok Yin Victor, Aleksandra Anna Apolinarska, Davide Tanadini, Fabio Gramazio, Matthias Kohler. 2021. Automatic Assembly of Jointed Timber Structure using Distributed Robotic Clamps. In PROJECTIONS - Proceedings of the 26th CAADRIA Conference - Volume 1, The Chinese University of Hong Kong and Online, Hong Kong, 29 March - 1 April 2021, pp. 583-592.

- MARKIS, A., PAPA, M., KASELAUTZKE, D., RATHMAIR, M., SATTINGER, V. & BRANDSTÖTTER, M. 2019. Safety of mobile robot systems in industrial applications. ARW & OAGM Workshop, 2019.
- Mehl, D.; Faruki, A.; Parthasarathy, A.; Anderson, N. 2021. A brave new world for manufacturing - The State of Industry 4.0. Operations and Performance. Chicago: Kearney, <https://www.kenarney.com/operations-performancetransformation/article/?/a/the-state-of-industry-4.0-article>.
- Mousavi, A.; Siervo, H. R.A. 2017. Automatic translation of plant data into management performance metrics: a case for real-time and predictive production control. In: International Journal of Production Research. 55th Vol., Nr. 17, p. 4862–4877.
- Mudrakola, S. Private 5G Networks. 2019. Available online: <http://techgenix.com/private-5g-networks/> (accessed on 10 June 2020).
- NICHOLAS, J. M. 2011. Lean production for competitive advantage, Taylor & Francis Group.
- Nkom. 2021. Høring av lokale 5G-nett i 3,8-4,2 GHz-båndet. Hentet fra: <https://www.nkom.no/hoeringer/horing-av-lokale-5g-nett-i-3-8-4-2-ghz-bandet>
- Nkom. 2022a. Auksjon av 2,6 GHz- og 3,6 GHz-båndene. Hentet fra: <https://www.nkom.no/frekvenser-og-elektronisk-utstyr/frekvensauksjoner/auksjon-av-2-6-ghz-og-3-6-ghz-bandene>
- Nkom. 2022b. Tildeling av flere frekvensbånd til mobilkommunikasjon og 5G. Hentet fra: <https://www.nkom.no/frekvenser-og-elektronisk-utstyr/frekvenser-til-mobilkommunikasjon-og-5g/tildeling-av-flere-frekvensband-til-mobilkommunikasjon-og-5g>
- O’Connell, E., Moore, D., & Newe, T. 2020. Challenges associated with implementing 5G in manufacturing. In Telecom (Vol. 1, No. 1, p. 5). MDPI.
- Ordonez-Lucena, J., Chavarria, J. F., Contreras L. M. & Pastor A., 2019. The use of 5G Non-Public Networks to support Industry 4.0 scenarios. IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/CSCN.2019.8931325.
- OYEKANLU, E. A., SMITH, A. C., THOMAS, W. P., MULROY, G., HITESH, D., RAMSEY, M., KUHN, D. J., MCGHINNIS, J. D., BUONAVITA, S. C. & LOOPER, N. A. 2020. A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications. IEEE Access, 8, 202312-202353.
- Pantke, F.; Herzog, O. .2014. Distributed Key Figure Optimization Approaches for Global Goal Coordination in Multi-agent Systems for Production Control. In: Procedia CIRP. 19th Vol., p. 180–185.
- Parkvall, S., Blankenship, Y., Blasco, R., Dahlman, E., Fodor, G., Grant, S., ... & Stattin, M. 2020. 5G NR release 16: Start of the 5G evolution. IEEE Communications Standards Magazine, 4(4), 56-63. Security Architecture and Procedures for 5G System (Release 16), document 3GPP TS 33.501, Version 16.0.0, Jul 2020
- PEDERSEN, M. R., NALPANTIDIS, L., ANDERSEN, R. S., SCHOU, C., BØGH, S., KRÜGER, V. & MADSEN, O. 2016. Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 37, 282-291.

PEI, S., ZHAO, J., ZHANG, N. & GUO, M. 2019. Methodology on developing an assessment tool for intralogistics by considering cyber-physical production systems enabling technologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32, 406-412.

Prados-Garzon, J., Ameigeiras, P., Ordonez-Lucena, J., Muñoz, P., Adamuz-Hinojosa, O., & Camps-Mur, D. 2021. 5G Non-Public Networks: Standardization, Architectures and Challenges. *IEEE Access*, 9, 153893-153908.

RANAWEERA, P. JURCUT, A & LIYANAGE, M. 2021. MEC-enabled 5G Use Cases: A Survey on Security Vulnerabilities and Countermeasures. *ACM Comput. Surv.* 54, 9, Article 186 (December 2022), 37 pages. DOI:<https://doi.org/10.1145/3474552>

RÜßMANN, M., LORENZ, M., GERBERT, P., WALDNER, M., JUSTUS, J., ENGEL, P. & HARNISCH, M. 2015. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, 9, 54-89.

Sambasivarao, K. V.; Deshmukh, S. G. 1997. A decision support system for selection and justification of advanced manufacturing technologies. In: *Production Planning & Control*, 8(3), p. 270-284

SCHNEIER, M. & BOSTELMAN, R. 2015. Literature review of mobile robots for manufacturing, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

Schuh, G.; Schubert, J.; Wellensiek, M. 2012. Model for the Valuation of a Technology Established in a Manufacturing System. In: *CIRP Conference on Manufacturing Systems*. 45th Vol. 3, p. 602–607

Shafi, M., Molisch, A. F., Smith, P. J., Haustein, T., Zhu, P., De Silva, P., ... & Wunder, G. (2017). 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE journal on selected areas in communications*, 35(6), 1201-1221.

Shahin M., Chen FF, Bouzary H & Krishnaiyer K. 2020. Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. *Int J Adv Manuf Technol*. 2020;107(5–6):2927–36.

Sharma P. 2013. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network, in *IJCSMC*, Vol. 2, Issue. 8, August 2013, pg.47 – 53

Statistisk Sentralbyrå. 2022. Arbeidskraftundersøkelsen. Hentet fra: <https://www.ssb.no/arbeid-og-lonn/sysselsetting/statistikk/arbeidskraftundersokelsen>

STAVRULAKI, E. & DAVIS, M. 2010. Aligning products with supply chain processes and strategy. *The International Journal of Logistics Management*.

STL-Partners. 2020. Evaluating the business potential of private 5G in manufacturing. Hentet fra: <https://stlpartners.com/wp-content/documents/packs/2022%20Private%205G%20ROI%20tool%20pitch%20pack%20-%20telecoms%20ecosystem.pdf>

Stricker, N.; Echsler Minguillon, F.; Lanza, G. (2017): Selecting key performance indicators for production with a linear programming approach. In: *International Journal of Production Research*. 55th Vol., Nr. 19, p. 5537–5549.

Teppo P. & Norrman K. 2020. Security in 5G RAN and Core deployments, Ericsson White Paper, April 2020.

Tokola, H.; Gröger, C.; Järvenpää, E; Niemi; E. 2016. Designing Manufacturing Dashboards on the Basis of a Key Performance Indicator Survey. In: Procedia CIRP. 57th Vol., p. 619–624.

TORRACO, R. J. 2005. Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples. Human resource development review, 4, 356-367.

Van Triest, S.; Vis, W. 2007. Valuing patents on cost-reducing technology: A case study. In: International Journal of Production Economics, 105(1), p. 282-292.

Varoutas D., Katsianis D., Sphicopoulos T., Cerboni A., Kalhagen K.O., Stordahl K., Harno J., Welling I. 2005. 3G MVNOs financial perspectives, Department of Informatics & Telecommunications, University of Athens, Panepistimiopolis, Ilisia, GR 157-84, Athens, GREECE.

WINKELHAUS, S. & GROSSE, E. H. 2020. Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. International Journal of Production Research, 58, 18-43.

Zhan, M., & Yu, K. 2018. Wireless communication technologies in automated guided vehicles: Survey and analysis. In IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 4155-4161). IEEE.

Inside Telecom, 2022. Yara og Telenor åpner industriell 5G på Herøya. Hentet fra:

<https://www.insidetelecom.no/artikler/yara-og-telenor-apner-industriell-5g-pa-heroya/519880>

Lorentzen, M. 2022. Telia åpner nytt segment i Norge: Vil selge lukkede, private mobilnett Hentet fra:

<https://e24.no/teknologi/i/rg5Wl8/telia-aapner-nytt-segment-i-norge-vil-selge-lukkede-private-mobilnett>

Telenor. u.å. Dekningskart. Hentet fra: <https://www.telenor.no/dekning/#dekningskart>

Telia. u.å. Dekningskart. Hentet fra: <https://www.telia.no/nett/dekning/>

Ice. u.å. Dekningskart. Hentet fra:

[https://www.ice.no/dekning/kart/?\\_gl=1\\*1n9ztqs\\*\\_up\\*MQ..&gclid=Cj0KCQjw8amWBhCYARIsADqZJoUnT7OVbPCI4JRfByGscGJzksvRvYRsu7qiKBw\\_SpGXQxFGdaFHVsaAnoKEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://www.ice.no/dekning/kart/?_gl=1*1n9ztqs*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw8amWBhCYARIsADqZJoUnT7OVbPCI4JRfByGscGJzksvRvYRsu7qiKBw_SpGXQxFGdaFHVsaAnoKEALw_wcB&gclsrc=aw.ds)

## Appendiks A

### A.1 Semi-strukturert intervju med Ericsson Device Director, INTERN Ericsson

Intervjuobjektet var en person med mange års erfaring med private nettverk og produksjonsmiljø fra Ericsson. Dette intervjuet ble strukturert mer som en samtale enn et intervju. Dette passet med det utforskende målet om å finne prisnivå, bruksområder for 5G og andre relevante faktorer.

Intervjueren hadde forberedt et sett med samtaleemner og spørsmål før intervjuet, men dessverre ble det ikke tid til å gå gjennom alt. Grunnen til dette var både at det var emner som ikke kunne snakkes om uten taushetsavtale og at intervjuobjektet hadde lite tid tilgjengelig. Det oppstod også noen problemer med språk og terminologi, og derfor ble det byttet språk midt i samtalen. Intervjuet ble ikke tatt opp, men notater og spørsmål som brukes i studien er presentert under.

#### **Q1: Manufacturing requirements?**

*I dag har Ericsson mest erfaring med bruk av LTE for private nettverk. LTE fungerer ok operasjonelt, med kort rekkevidde, overvåking og video strømming. Med en gang pålitelighet er viktig så man må få 5G. Kabelløsning er det som brukes i dag. Prisnivå på 5G er høyt, og LTE er billigere og fungerer bra. LTE tilbyr i dag ca 70% av use cases. Transformasjon går langsomt, både fra leverandør og aktører. Teknologien fokuserer nå veldig mye på utviklingen, og 5G imponerer på tester med ekstreme oppe tider.*

*Teknologiske problem med å bytte ut kabel: Høyere tidsforsinkelser ved bruk av 5G eller LTE, og det er veldig vanskelig å endre. LTE har typisk 40ms roundtrip, tid fram og tilbake til kontrolleren. Med 5G kan tidsforsinkelsen til en close loop robot bli 25 ms.*

*Frekvensbånd: Som regel veldig billige, EU har privatespektrum som kan kjøpes. Operatørene er pålagt å selge det for en viss i pris i EU, som en fixed cost av frekvenstillatelsen. USA har en spesiell modell.*

*3,35 –2,5 GHz-båndet er det som opereres mest med i dag. Høye frekvenser gir kortere avstander, og da behøves flere celler. Alternativt er det mulig med en radio-løsning som følger bevegelige maskiner.*

#### **Q2: How to find use case? Note, at this point in the interview we decided to switch from Norwegian and Swedish to English.**

*Examples on use cases are: Quality monitoring, precision cutting, intralogistics in heat zones, energy monitoring, sustainable commodity use through digital twins.*

*First thing, find anchor use case, ex: Safety and real time monitoring of AMRs, this cannot be done WiFi because of blind spot coverage. Doesn't always require mmWave. But scanning requires up to 4 GB DL and UL.*

*Another problem in manufacturing today is too many cables on robots, wireless communication will fix a big portion of this.*

#### **Q3: Tailoring devices to manufacturer**

#### **Q4: Navigating the IoT-vendor jungle**

#### **Q5: End-to-end industry 4.0 in manufacturing. Dedicated network, IoT-devices and hardware, Software.**

#### **Q6: Network capability, price points on Wi-Fi, LTE and 5G?**



*A: High end LTE modules: 100-300 USD, while a good gateway costs 500-700 USD. 5G Gateway, routers: 1200-2000 USD per unit. 5G has very good modems today, but devices drive up the costs. LTE equipment is about 50% cheaper, however 5G price will drop by 50% next year. Modem costs about 20 000 USD for 5G right now.*

*Two to three cells can cover roughly 10 000 square meters indoors. Outdoor is dependent on interference from buildings and obstacles. The range is up to 5km with high tower, and up to 500m on small tower on mid-band frequencies.*

**Q7: Capital expense, network costs**

**Q8: Operating expense, energy, maintenance and upgrades.**

**Q9: Avoiding vendor lock-in**

**Q10: Experience from real case?**

*Remote control of operations and machines in mines. Where real-time surveillance of the drilling machines kept track of tightness without interruption.*

## *A.2 Semi-strukturert intervju med Strategic Marketing Director INTERNT ERICSSON*

Intervjuobjektet var en av personene i Ericsson som utviklet en online kalkulator for å estimere ROI på et privat 5G nettverk. Personen har også flere års erfaring med private nettverk og teknologisk strategi. Dette intervjuet ble strukturert på samme måte som i A.2, mer som en samtale enn et intervju. Dette passet med det utforskende målet om å finne framgangsmåter for teknologiske og økonomiske evalueringer, prisnivå, bruksområder for 5G og andre relevante faktorer. Intervjueren hadde forberedt et sett med samtaleemner og spørsmål før intervjuet, men dessverre ble det ikke tid til å gå gjennom alt. Grunnen til dette var både at det var emner som ikke kunne snakkes om uten taushetsavtale og at intervjuobjektet hadde lite tid tilgjengelig. Intervjuet ble ikke tatt opp, men notater og spørsmål som brukes i studien presentert under.

### **Q1: How did you scale the CAPEX of gateways(router+modem), cells (radio unit), and modules with revenue, square feet, output, employees?**

*Based on input from CSPs (Customer service providers), and based on input from AWS, IoT hardware vendors, vendors of software licenses, as well as factory spend vs operator spend. In total connectivity costs are up to 10% of the total capex, hardware is the big contributor.*

### **Q2: How did you calculate and scale the CAPEX of the different use cases?**

*These tools are estimating the value, not the business case. The goal was to create a teaser tool, to gain interest from manufacturers.*

### **Q3: Which vendors did you base you base your calculations on? How did you select vendors?**

*OEM, hexagon, ABB has some public numbers. Reach out to OEM, google on OEM-solutions, get data points from OEM, and then reach out to factory to confirm.*

### **Q4: How can a digital twin generate revenue? What is needed for a digital twin?**

*Saving time, can run tests virtually rather than halting assembly line saving months or weeks of work. R&D on increased revenue. Could also do preventive outage, because halting production is expensive.*

### **Q6: How did you generalize the calculator given all the different manufacturing environments, with different costs and inputs, and different price for produced goods?**

### **Q7: Is the OPEX linear for all these use cases, does it include anything other than energy?**

*Most of CAPEX can be distributed over years, OPEX is yearly. Internal tool on network costs, budget tool. Network usually performs great and requires low maintenance.*

*We also found that most manufacturers require a ROI of 100%, this is based on estimations and interviews with different manufacturers.*

### *A.3 Semi-strukturert intervju med Business Innovation Lead, CSP EKSTERNT med Telenor*

Intervjuobjektet er sjef for innovasjon i Telenor og har fokusert mye på private 5G nettverk de siste årene. Personen var også mye av driveren bak applikasjonen på Herøya for Yara. Dette intervjuet ble strukturert på samme måte som i A.3, mer som en samtale enn et intervju. Dette passet med det utforskende målet om å finne framgangsmåter for fabrikker, prisnivå, bruksområder for 5G og andre relevante faktorer. Intervjueren hadde forberedt et sett med samtaleemner og spørsmål før intervjuet. Intervjuet ble ikke tatt opp, men notater og spørsmål som brukes i studien er presentert under.

#### **Q: Hvordan finner man bruksområder?**

*Man må starte med å se på prosessene i fabrikkene. Deretter finne ut hvilke prosesser er best å automatisere, optimalisere eller digitalisere. Her må man snakke med fabrikkene det gjelder og gjerne få en liste med en eller to områder som skal digitaliseres. Også må man beskrive prosessene, og finne eventuelle bruksområder som for eksempel AGVer eller kamera som man har lyst til å bruke. Med AGVer må man tegne opp rutene de skal kjøre og inkludere hva de skal ha med av last, og finne ut hvilket kontrollsystem de skal bruke. Hvor stort område trenger AGVene? Er det videokamera på de etc? Finn nøyaktig prosesser, med trinn, kjøreruter, som gir kommunikasjonskrav. Det kan hende man vil ha kontroll over alle varer til en vær tid, med enkle data som vekt og type. For kamera må man finne ut hvilke krav man stiller til hastighet og forsinkelse. Derfra kan man gå ut i fra dot.radio og begynne å tenke på dekning. Hvilke krav stiller man til nettet, forsinkelser, hastighet. Beskrive kommunikasjonsflytene ut i fra hvilke område i fabrikkene. Bestemme området, Access punkt, radioenheter, Controller, kjernenett. Også må man se på spektrum. Telenor er på en måte siste ledd.*

*Også er det viktig å tenke på kontroll av KPIer på fabrikkene. Alarmer og flaskehalsen må kontrolleres av kommunikasjonsinfrastruktur. Før var det kabler som tålte lite og var upraktiske, alt er mye greiere nå som det er trådløst.*

#### **Q: CAPEX oversikt?**

*Her kommer Access punkt, radioenheter, Controller, kjernenett og spektrum inn. I tillegg må man jo kjøpe inn bruksenheter og IoT-dingser fra andre leverandører. Til slutt har man ekstra tjenester som sky-løsninger, kryptering for datasikkerhet og andre tjenester/løsninger som kan komme i tillegg. Ekstra dekning etter hvert som det blir behov kan også komme inn.*

#### **Q: Spektrum/slicing-løsning og kostnad?**

*NR38-båndet, mellom 3800-4200 MHz er det båndet Telenor har kjøpt for private 5G-nett. Max 80 Hz per lokasjon. Har ingen planer om å selge eller leie ut spektrum til andre. Men vi tilbyr en ende-til-ende løsning med Nokia som leverandør.*

#### **Q: Edge/cloud-løsning og kostnad?**

*Kan være viktig hvis man skal ha kontroll over hele flåten med for eksempel AGVer og last. Dette gir lavere forsinkelser og det er der fordelene til edge ligger. Du sparer tiden det tar å nå serverhaller som ligger langt unna, og du får større prosesseringskraft.*

#### **Q: Radio/cell-løsning, dekning, kostnad? Tips til casestudien på Hydro Karmøy? Innendørs/utendørs?**

*Fokuser på dekning som belyser de områdene du trenger. Her vil det være dekning for de bruksområdene og områdene de operer på som gjelder. De må også møte krav til forsinkelser og*

*uplink/downlink hastighet. Deretter kan radioplanleggeren komme inn å finne ut hvor mange aksesspunkter man trenger, og tegne opp dekningskart.*

*For Hydro kan man for eksempel starte med dekning på støperiet, nettet kan skaleres opp og bygges ut videre når fabrikken skjønner at de kan gjøre flere ting nå enn tidligere. Men kan bli knotete. Derfor burde kommunikasjonsinfrastruktur ligge 2-steg foran. Kan også nevnes at et privat 5G nett med radio dot skal kunne dekke 1mill IoT- per kvadratmeter.*

**Q: Core-løsning, kostnad?**

*Man må ha en kjernenett-løsning.*

**Q: Moduler og sim-kort?**

*Alt trenger sim eller esim for å koble opp til nettet. Dette er veldig viktig for sikkerhet. Så kan man legge til egen kryptering i tillegg til det operatørene tilbyr. Forsvaret la til sin egen ende kryptering i tillegg med den ekstra sikkerheten da dette var bruksområdet de ville ha.*

*Kort om Yara Herøya: Autonome båter fra Herøya til en annen lokasjon. Autonome kraner som laster båtene. Ting de måtte tenke på var for eksempel at kranene ikke kunne laste kun en side av båtene siden de kan velte. Autonome guidede kjøretøy. Frakter gjødsel fra produksjonslokalet til kraner som laster videre til båten. Last. Ha full oversikt over alt av inventar, AGVer, kraner og båter.*

## Appendiks B

### B.1 Regnskap

<b>Karmøy, Sunndal, Årdal, Høyanger</b>					
<b>RESULTATREGNS</b>					
<b>KAPi hele 1000</b>					
	<b>2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>
Valutakode	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
Sum salgsinntekter	44900000	46406000	52570000	47187000	39927000
Annen driftsinntekt	0	2000	0	6000	8000
<b>Sum driftsinntekter</b>	<b>44900000</b>	<b>46408000</b>	<b>52570000</b>	<b>47193000</b>	<b>39935000</b>
Varekostnad	37350000	39429000	42243000	36613000	32631000
Beholdningsendringer	-	-	-	0	0
Lønnskostnader	2480000	2599000	2582000	2468000	2280000
Herav kun lønn	1972000	2022000	2021000	1941000	1830000
Ordinære avskrivninger	1455000	1357000	1350000	1066000	1042000
Nedskrivning	-	-	-	-	-
Andre driftskostnader	2970000	3304000	3239000	2791000	2582000
<b>Driftsresultat</b>	<b>645000</b>	<b>-281000</b>	<b>3156000</b>	<b>4255000</b>	<b>1400000</b>
Inntekt på invest. annet foretak i sm konsern	-	-	-	0	0
Inntekt på investering i datterselskap	-	-	-	0	0
Sum annen renteinntekt	-	-	-	0	0
Inntekt på invest. i tilknyttet selskap	-	-	-	0	0
Sum annen finansinntekt	-3490000	1880000	2971000	5108000	8063000
Sum finansinntekter	-3490000	1880000	2971000	5108000	8063000
Nedskrivning fin. anleggsmidler	-	-	-	-	-
Sum annen rentekostnad	-	-	-	0	0
Andre finanskostnader	-	-	-	-	-
Sum annen finanskostnad	-	-	-	0	0
Sum finanskostnader	-	-	-	0	0
<b>Resultat før skatt</b>	<b>-2845000</b>	<b>1599000</b>	<b>6127000</b>	<b>9363000</b>	<b>9463000</b>
Sum skatt	387000	56000	882000	1293000	480000
<b>Ordinært resultat</b>	<b>-3232000</b>	<b>1543000</b>	<b>5245000</b>	<b>8070000</b>	<b>8983000</b>
Ekstraordinære inntekter	-	-	-	-	-
Ekstraordinære kostnader	-	-	-	-	-
Skatt ekstraordinært	-	-	-	0	0
<b>Årsresultat</b>	<b>-3232000</b>	<b>1543000</b>	<b>5245000</b>	<b>8070000</b>	<b>8983000</b>
Ordinært utbytte	1600000	-	4700000	-	-
Ekstraordinært utbytte	-	-	-	-	-
Tilleggsutbytte	-	-	-	-	-
<b>Sum utbytte</b>	<b>1600000</b>	<b>-</b>	<b>4700000</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Konsernbidrag	154000	-175000	-	32000	-
<b>BALANSEREGNS</b>	<b>2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>
<b>KAPi hele 1000</b>					

## B.2 Input variabler

OEE (sammenlagt hele året)	Før	Etter	
Uptime	94,67 %	94,99 %	
Troughput	100 %	100 %	
Kvalitetsforhold	93,03 %	93,67 %	
OEE	88,07 %	88,98 %	
<b>Uptime Summary (siden sist start)</b>			
	Før	Etter	Antatt effekt
Available time	13,32		
Running time	12,61		
Down time	5,33 %	5,01 %	-6 %
<b>Production Summary</b>			
	Før	Etter	Antatt effekt
Good parts	111650	112494,2	
Scrap parts	8442	7597,8	-10 %
Total	120092	120092	
Skrapforhold	7,03 %	6,33 %	
<b>Skader</b>			
	Før	Etter	Antatt effekt
Skaderate per mill arbeidstimer i Norge	4,7	4,653	-10 %
Totalt utslipp Norge	2270000	2270000	
CO2/tonn produkt	1970	1970	

Economic inputs	Before	After	Antatt Effekt	
Primær aluminium/tonn	kr 19 819	kr 19 819		
Premium/tonn	kr 3 420	kr 3 420		
Aluminium alloy/tonn	kr 18 810	kr 18 810		
Alumina cost/tonn	kr 2 676	kr 2 676		
Electricity cost/tonn	kr 2 007	kr 1 987	-1 %	
Anode cost/tonn	kr 1 338	kr 1 338		
Labor cost/tonn	kr 1 866	kr 1 716	-8 %	Med -40 logistikkarbeidere
Avskrivninger/tonn	kr 1 089	kr 1 034	-1 %	

100 %	Antall produkt	Karmøy
Fordeling	Yearly (1000t)	220
per	Capacity (1000t)	270
Produkt	Ansatte	518
1,00	Ekstrusion ingot short	1554338
1,00	Extrusion ingot long	295169
1,00	Wire rod	91667

### B.3 Direkte effekt på omsetning og kostnader

Produkt split	Antall produkt	Med 5G			Uten 5G		
		Best case	Normal case	Worst case	Best case	Normal case	Worst case
0,33	Ekstrusion ingot short	512360	510742	509133	461026	459569	458122
0,33	Ekstrusion ingot long	97106	96990	96874	87377	87272	87168
0,33	Wire rod	29608	29608	29608	26642	26642	26642

Revenue	Med 5G			Uten 5G		
	Best case	Normal case	Worst case	Best case	Normal case	Worst case
Ekstrusion ingot short	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377
Ekstrusion ingot long	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377
Wire rod	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 651 347 029	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377	kr 1 485 894 377

Costs	Med alle bruksområder			Kun med og uten AE-Sensor			Kun med AMR			Kun med MSP		
	Best case	Normal case	Worst case	Best case	Normal case	Worst case	Best case	Normal case	Worst case	Best case	Normal case	Worst case
Ekstrusion ingot short	kr 616 561 052	kr 620 469 522	kr 624 402 767	kr 647 519 246	kr 651 623 964	kr 655 754 702	kr 636 751 763	kr 640 788 225	kr 644 850 274	kr 640 696 761	kr 644 758 230	kr 648 845 445
Ekstrusion ingot long	kr 618 982 180	kr 620 469 522	kr 621 960 438	kr 650 061 940	kr 651 623 964	kr 653 189 740	kr 639 252 176	kr 640 788 225	kr 642 327 964	kr 643 212 665	kr 644 758 230	kr 646 307 509
Wire rod	kr 620 469 522	kr 620 469 522	kr 620 469 522	kr 651 623 964	kr 651 623 964	kr 651 623 964	kr 640 788 225	kr 640 788 225	kr 640 788 225	kr 644 758 230	kr 644 758 230	kr 644 758 230

### B.4 Estimering av priser

Følgende kostnader representerer alle kostnadene diskutert i Kapittel 5.1, og er endret for å beskytte konfidensialitet. Tallene er basert på generelle estimater gjort av forfatteren og har ingen tilknytning til Telenor, Ericsson eller andre spesifikke leverandører sine faktiske priser. Prisen per AMR ble estimert til å være 431 250 NOK basert på kostnadene funnet av Andersen (2021). Prisen til en spesial AMR som trengs for å løfte pallene koster 375 000 NOK, og på grunn av tyngden til lasten blir prisen 15% dyrere. Programvaren og ekstrautstyr antas å være en del av disse kostnadene (Andersen, 2021). Både AMR-flåten i pressboltstøperiet og aluminiumtrådstøperiet antas å koste det samme. Med en flåtestørrelse på totalt 51 AMR-er ble den totale CAPEX-en for AMR-ene omtrent 22 millioner NOK. Den årlige OPEX-en for å drifte AMR-flåtene ble estimert til å være omtrent 900 000 NOK i året. Det var basert på en total OPEX-kostnad på \$0.01 per sekund kjøretid funnet av Singh et al. (2022). Dette inkluderte alle drifts og vedlikeholdskostnader. AMR-ene antas å ha en total kjøretid på åtte timer i døgnet siden det antas en hvis tid mellom hvert parti blir ferdig. Konvertering fra NOK til USD ble satt til 8.55. For sanntidsovervåking ble kostnadene til de trådløse sensorene (både MSP og AE-sensorer) estimert til å være 330 000 NOK basert på kostnadene funnet av Bärning et al. (2018), og at forventingen om at kostnaden skulle reduseres med 10% fra 2020 til 2022 (Mehl et al., 2021). Samtidig ble kostnaden for RFID eller lignende teknologi estimert til å være 100 000 NOK, og kostnadene til skjermer å være 30 000 NOK basert på 5G-SMART D1.3 (2021). Dermed ble den totale CAPEX-en for sensorene blir 460 000 NOK. Antall fast ansatte dataingeniører for Hydros sensorsystem antas å være tre til å begynne. Og årslønnen ble estimert til 845 000 NOK basert på Teknas lønnstatistikk for gjennomsnittslønn med fem til ni års erfaring for 2021 (Tekna, 2022, <https://www.tekna.no/lonn-og-arbeidsvilkar/lonnsstatistikk/>). Batterikostnaden ble estimert til å være 5000 NOK i året. Dermed ble den årlige OPEX-en for sensorsystemet 2 540 000 NOK i året.

### B.5 Økonomiske modeller på Hydro Karmøy

Economic analysis	Karmøy			Karmøy		
	År 0	År 1	År 2	År 3	År 4	År 5
Omsetning	kr 4 457 683 132	kr 4 457 683 132	kr 4 457 683 132	kr 4 457 683 132	kr 4 457 683 132	kr 4 457 683 132
Med 5G	kr 0	kr 4 503 673 715	kr 4 503 673 715	kr 4 503 673 715	kr 4 503 673 715	kr 4 503 673 715
CF_Omsetning	kr 0	kr 45 990 583	kr 45 990 583	kr 45 990 583	kr 45 990 583	kr 45 990 583
Kostnader normal case	kr 1 721 679 009	kr 1 721 679 009	kr 1 721 679 009	kr 1 721 679 009	kr 1 721 679 009	kr 1 721 679 009
Med alle bruksområder	kr 27 874 450	kr 1 678 973 363	kr 1 678 973 363	kr 1 678 973 363	kr 1 678 973 363	kr 1 678 973 363
CF_Kostnader	-kr 27 874 450	kr 42 705 646	kr 42 705 646	kr 42 705 646	kr 42 705 646	kr 42 705 646
t	0	1	2	3	4	5
i	30 %					
PV_t	-kr 27 874 450	kr 68 227 868	kr 52 482 976	kr 40 371 520	kr 31 055 015	kr 23 888 473
NPV	kr 188 151 402					
ROI	575 %					

## B.5 Nettverksalternativ

	Fleksibilitet	Ytelsestilpasning	Interferensbarrierer	Sømløst grensesnitt	Forrentings-smidighet	Skalerbarhet	Basestasjon administrasjon	Dataikkerhet	CAPEX	OPEX	Enkelhet
SNPN1	5	5	1	3	3	3	3	5	1	1	3
SNPN2	4	5	1	5	3	3	5	4	2	3	5
SNPN3a	4	5	5	5	3	5	5	4	3	2	5
SNPN3b	5	5	5	5	3	5	5	5	3	2	5
MNO PNI- NPN 1	2	1	5	1	5	3	3	3	5	4	4
MNO PNI- NPN 2	3	3	5	5	3	3	3	4	5	4	5
Delt PNI- NPN 1	5	5	5	5	3	5	5	5	1	1	5
Delt PNI- NPN 2	5	5	5	5	2	5	5	5	1	1	5
Delt PNI- NPN 3	3	3	5	5	3	5	5	3	3	3	5
Delt PNI- NPN 4	3	3	5	5	3	5	5	3	5	5	5

Tabell B.2: Forretningsmodeller for private nett rangert, basert på 5G-SMART D1.3 (2021).