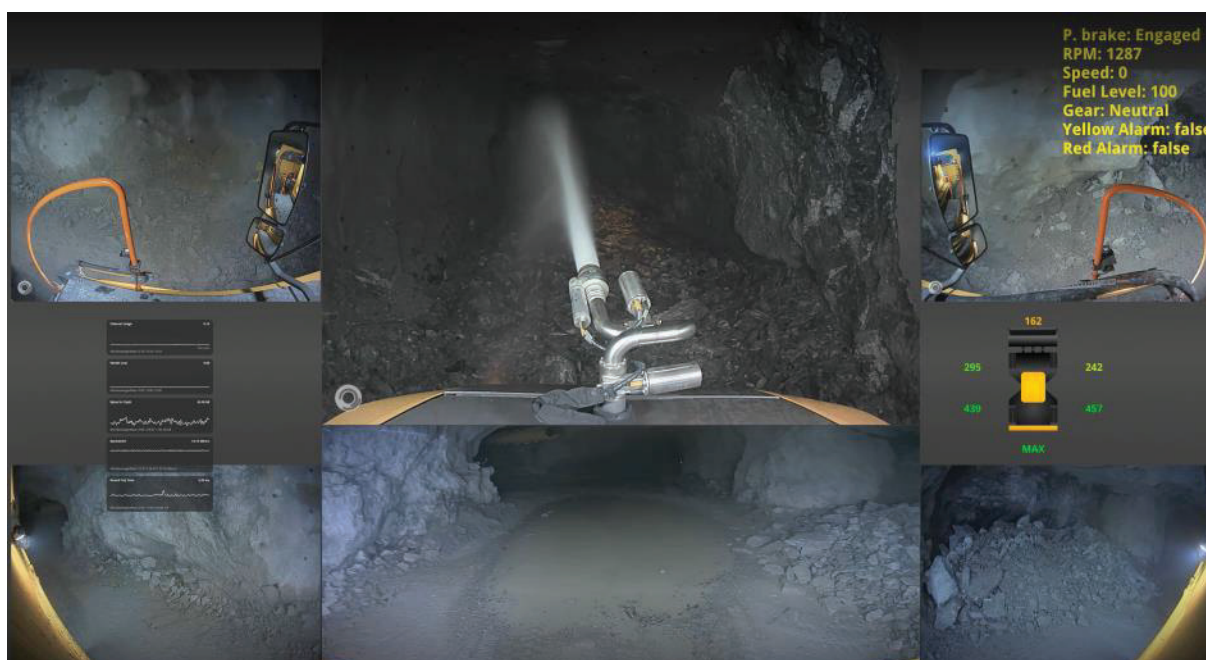


TAMMP - Tele-operated & Autonomous Machines in the Mining Process

Publik rapport



Författare: Alexandra Teterin, Andreas Hjertström, Henrik Andreasson, Daniel Olsson, Björn Genborg
Datum: 2023-09-28
Projekt inom: FFI - Effektiva och uppkopplade transportsystem

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Contents

1 Sammanfattning	4
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	9
5 Mål	9
6 Resultat och måluppfyllelse	10
6.1 Design och utveckling av teleopererad dumper och hjullastare	10
6.1.1 Demonstrator	10
6.1.2 Utvärdering och förbättring av prototyper	12
6.1.3 Överföring av videoström – konfiguration och nätverksreglering.....	13
6.2 Utvärdering av människa-maskin interaktion	14
6.2.1 Omgivningsuppfattning vid teloperation	14
6.2.2 Fördjupning kring videodistribution och kameralayout i fjärrstationen	16
6.2.3 Återkoppling via grafisk eller numerisk representation av olika maskintillstånd.....	17
6.3 Utveckling av autonom funktionalitet	19
6.3.1 Identifiering av lämpliga delautomatiserade moment	19
6.3.2 Tillståndsskiftesstrategi teleoperation till autonom operation	20
6.3.3 Användargränssnitt vid tillståndskiften	20
6.3.4 Tekniker för positionsskattning	20
6.4 Kompetensbyggande inom diagnostik, säkerhet och nya tjänster.....	23
6.4.1 Diagnostik och tjänster	23
6.4.2 Funktionell säkerhet maskin till infrastruktur.....	24
6.5 Processmodellering fjärrstyrda och autonoma maskiner	25
6.5.1 Produktivitet vid konventionellt driven gruva jämfört med automatiserad	25
6.5.2 Process för fjärrstyrt system i gruva samt vilka delar som bör automatiseras	26
6.6 Regelpåverkan av ny teknik	28
6.6.1 Utdrag ur rapporten för Remote Timber	28
6.6.2 Reflektioner kring redogjorda regelverk samt potentiella tillägg för underjordsapplikation	28
6.7 Kartläggning/identifiering av nya arbetssätt och områden	29
6.8 Leveranser från arbetspaketen i korthet	30

7 Spridning och publicering	31
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	31
7.2 Publikationer	32
8 Slutsatser och fortsatt forskning	32
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	33

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Svensk industri är den mest automatiserade i världen och ledande i transformationen till Industri 4.0 - cyberfysiska system. Produktiviteten i tillverkningsindustrin har fördubblats sedan 90-talet men i anläggningsindustrin har i princip produktiviteten varit den samma. Vid både tunneldrivning och malmbrytning utförs en serie enhetsoperationer i den så kallade "salvcykeln". Inget gruvbolag i världen har hittills lyckats genomföra fyra enhetsoperationer efter varandra med en kombination av teleopererade och autonoma maskiner. För både gruvbranschen och inom tunneldrivning för tunnelbanor, vägtunnlar m.m. är salvcykeln i stort sett identisk. Både bygg-/anläggningsindustrin samt gruvindustrin i Sverige arbetar ständigt och målmedvetet för att höja produktivitet och säkerhet vid tunneldrivning. Till detta kommer en strävan att förändra gruvan till en industriprocess som fungerar 24-7 med ett kontinuerligt flöde.

Resultaten från projektet visar tydligt att de vinster vi hade som utgångspunkt av samarbetet är minst lika stora och viktiga som när projektet inleddes. Projektet har gjort stora genombrott som adresserar en mycket större marknad än gruvbranschen. Vi har visat på att enhetsoperationerna kan effektiviseras kraftigt genom att produktionen kan återupptas kort efter sprängning då gruvan normalt sett står still. Nedvattning av damm och löst material kan påbörjas omgående efter sprängning med hjälp av den teleopererade vattendumpen i projektet. På så sätt kan även utlastning påbörjas tidigare, antingen teleopererat eller manuellt.

Förutom en bekräftelse på att salvcykeln kan effektiviseras utifrån den inledande hypotesen så har även många lärdomar dragits under projektets gång kring hur utformning av ett system för teleoperation i gruvapplikation bör se ut. Både utifrån ett systemperspektiv där konnektivitet och funktionell säkerhet är nyckelfaktorer för ett säkert och effektivt system men även utifrån ett operatörsperspektiv. Kunskap har byggts om vilka krav som finns på systemet för att skapa känsla av närvaro och kontroll i operatörsstationen samt vilken information som är viktig när återkoppling som normalt sett återfinns i manuellt styrd maskin, så som ljud och vibrationer, försvinner. Vikten av att kunna garantera en viss bandbredd samt en stabil låg och icke-varierande överföringsfördröjning av videoström är även detta en förutsättning för en optimal operatörsupplevelse och i slutändan effektivt arbete.

2 Executive summary in English

Swedish industry is the most automated in the world and a leader in the transformation to Industry 4.0 - cyber-physical systems. Productivity in the manufacturing industry has doubled since the 90s, but in the construction industry productivity has basically remained the same. In both tunneling and ore mining, a series of unit operations are carried out in a blasting cycle. No mining company in the world has so far managed to carry out four process steps in a row with a combination of teleoperated and autonomous machines. For both the mining industry and in tunneling for subways, road tunnels, etc. the blasting cycle is largely identical. Both the construction industry and the mining industry in Sweden work constantly and purposefully to increase productivity and safety in tunneling. Added to this is an effort to transform the mine into an industrial process that operates 24-7 with a continuous flow.

In the TAMMP project, Volvo CE developed a demonstrator of a teleoperation system, consisting of two machines (wheel loader and hauler with water tank) and one operator station for teleoperation. The intention was for one operator to be able to operate two machines from the same teleoperating station. The demonstrator was tested in a real mining application at one of the Boliden mines during the second half of the project to evaluate the possibility to improve efficiency and safety in the blasting cycle.

The results from the project clearly show that the gains we had as a starting point from the collaboration are at least as large and important as when the project began. The project has made major breakthroughs that address a much larger market than the mining industry. We have shown that the process steps can be made more efficient by the fact that production can be resumed shortly after blasting when the mine is normally at a standstill. Dewatering of dust and loose material can begin immediately after blasting using the

teleoperated hauler with water tank in the project. In this way, unloading can also be started earlier, either teleoperated or manually.

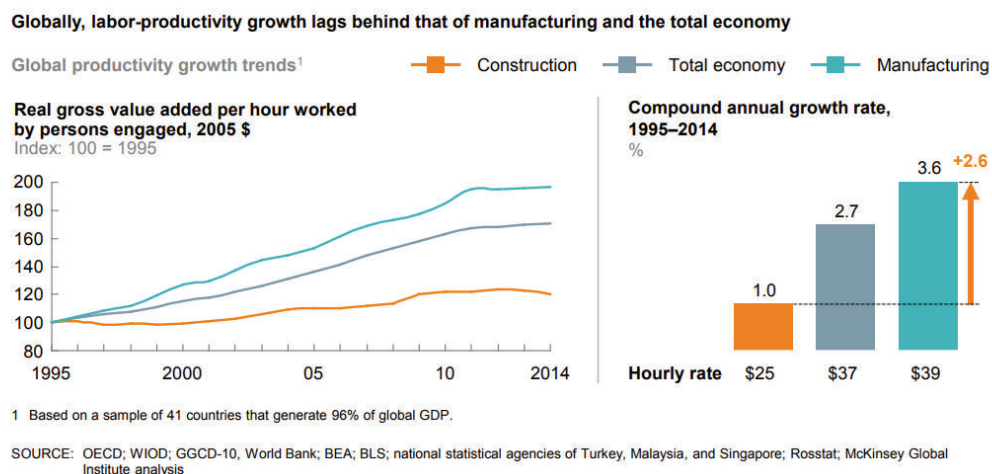
In addition to a confirmation that the blasting cycle can be made more efficient based on the initial hypothesis, many lessons have also been learned during the project regarding how the design of a system for teleoperation in a mining application should be designed. Both from a system perspective where connectivity and functional safety are key factors for a safe and efficient system, but also from an operator perspective. Knowledge has been built about what requirements exist on the system to create a sense of presence and control in the operator's station, as well as what information is important when feedback that is normally found in manually controlled machines, such as sound and vibrations, disappears. The importance of being able to guarantee a certain bandwidth as well as a stable low and non-varying transmission delay of the video stream is also a prerequisite for an optimal operator experience and ultimately efficient work.

Additional learnings on how this type of technology bring new needs on an organizational level, both regarding new pre-requisites to how the work is performed but also the specific knowledge needed for a safe use of the system, both in teleoperation mode but also when the machines need to be handled manually.

3 Bakgrund

Inom transportsektorn finns ett stort intresse för autonoma och fjärrstyrda transportlösningar, i synnerhet på allmän väg. Det är dock naturligt att det är inom gruvnäring, bergtäkter etc. som autonoma maskiner kommer att driftsättas först eftersom dessa till sin natur tillhandahåller en mer förutsägbart miljö. Ofta är arbetsområdet redan idag inhägnat och man har kontroll på personer och maskiner som rör sig inom arbetsområdet.

Den stora vinsten ligger i möjligheten att börja styra processen med hjälp av uppkopplade maskiner. Vi kan i Figur 1 se hur produktiviteten i tillverkningsindustrin fördubblades när man gick från automatiserade maskiner i Industri 3.0 till uppkopplade maskiner i processflöden med Industri 4.0. Den förändringen har skett från 90-talet tills nu.



Figur 1, Produktivitetsutvecklingen inom tillverkningsindustri samt anläggningsindustri.

För anläggningsindustri och framför allt för leverantörerna av utrustningen kan en liknande utveckling som tillverkningsindustrin haft bli disruptiv. Det finns stora möjligheter för Svensk industri att bli ledande, men också stora risker om man blir efter i en omställning. Idag finns de stora marknadsvolymer för anläggningsmaskiner inom bygg och anläggning. Dessa är dock i

dagsläget svåra att automatisera eftersom processen är svår att beskriva. Därför bör vi starta evolutionen mot Industri 4.0 för mobila maskiner i en nisch som är repetitiv. En nisch där kunderna redan har hög kompetens inom automation och stor betalningsvilja p.g.a. stort värde av den nya teknologin. Underjordsgruvor är en sådan nisch där det finns hög betalningsvilja för elektromobilitet och cyber-fysiska system samtidigt som deras kompetens är hög. Teleoperation med en operatör som styr flera maskiner skulle kunna introduceras och ge värde direkt i underjordsgruvor. En gradvis introduktion av automatiserade moment i processen kan ske allt eftersom maskinernas autonoma system utvecklas. När en maskin körs i autonomt läge kan operatören styra andra maskiner under tiden. Efterhand som automatiseringsgraden ökar kan operatören hantera fler och fler maskiner från samma kontrollstation.

När teknologin är robustare och kommer ner i kostnad kan nästa steg tas med lösningar för bergtäkter ovan jord. Där kan det gå snabbt att komma igång om en robust teknologi tagits fram för processer som är repetitiva i en begränsad miljö. Volvos projekt Electric Site visar att det är möjligt men också att teknologin inte är mogen för att gå till bergtäkt än.

I Figur 2 ses den långsiktiga strävan att kunna erbjuda avancerade lösningar för generella byggprojekt d.v.s. med även komplexa miljöer och processer. Det kräver en digitalisering av byggbranschen och en mix av personer, fjärrstyrning och automation – något som är mycket utmanande beroende på de höga kraven som funktionell säkerhet.



Figur 2, Vision om hur Industri 4.0 börjar i gruvindustrin som nischmarknad för att sedan gå till anläggningsindustrin.

I gruvindustrin i Sverige står man inför stora utmaningar och är starkt konkurrensutsatt på den globala marknaden. För att fortsatt vara ledande måste innovationstakten öka och produktiviteten i brytprocessen har stor utvecklingspotential. Gruvdrift innebär en hel del stillestånd och rena produktionsstopp då brytningen står still på grund av sprängning och för att ventiler ut spränggaser. Dessutom tillkommer skiftbyten och lunchpauser vilket är tidskrävande p.g.a. att transportsträckorna under jord ofta är långa.



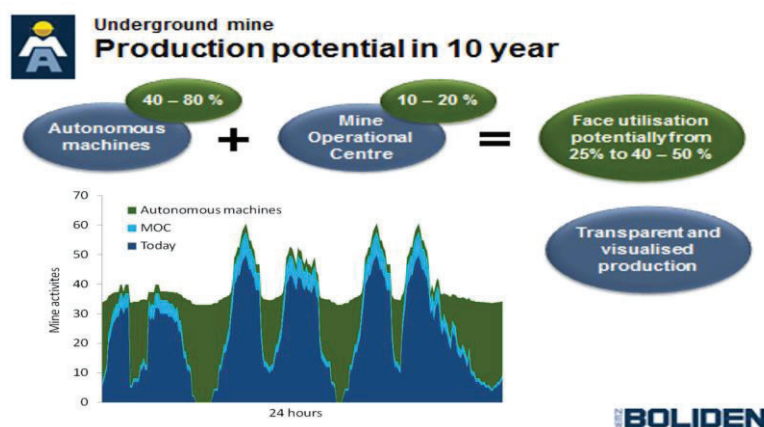
Figur 3, Salvcykel för tunneldrivning

Boliden har de senaste sju åren bedrivit projekt som syftar till att flytta personal bort från de utrymmen/ytor där själva bergarbetet utförs. Upprepade studier visar att det är i dessa zoner som flest olyckor sker. Till detta kommer en strävan att förändra gruvan till en industriprocess som fungerar 24-7 med ett kontinuerligt flöde genom hela Salvcykeln som illustreras i Figur 3. Projektet kommer fokusera på momenten "Vattning", "Lastning" och "Städning" i Salvcykeln ovan. Städning sker efter lastning och eventuellt också efter skrotning. Skrotningen i sig är inte en del i projektet men Boliden har ett projekt där man samarbetar med Jama Mining Machines AB för att ta fram en teleopererad skrotare.

Dessa moment i processen har Boliden identifierat som mest kritiska för att öka produktiviteten

- Vattning/ventilering efter sprängning. Planeras genomföras med teleopererad dumper utrustad med vattentank från Volvo CE
- Lastning planeras genomföras med hjullastare och dumper från Volvo CE. I första steget via teleoperation och i den senare delen av projektet delvis automatiserat.
- Städning planeras genomföras med hjullastare och dumper från Volvo CE. I första steget via teleoperation och i den senare delen av projektet delvis automatiserat.

I Figur 4 framgår att det finns stor potential att öka produktiviteten i gruvan. Den kan dubblas och matcha det som uppnåtts i tillverkningsindustrin.



Figur 4, Tidsstudie, produktivetspotential

Tillgången till robust och snabb kommunikation samt tillförlitlig positionsdata i en gruva har många utmaningar till följd av begränsningar i lokaliseringsmedel till följd av bristen på GPS-signal. Volvo CE har i tidigare autonoma projekt mestadels förlitat sig på GNSS. Boliden har sedan lång tid tillbaka arbetat med att kompensera bristen på GNSS under jord genom att införa positionering med positioneringstekniker baserat på wifi men också UWB (Ultra Wide Band). Fortsatta försök med bättre positioneringsinfrastruktur kommer att vara en del av detta projekt.

Det finns en stor möjlighet att ta utvecklingen av teleoperation och autonomi för konventionella maskiner till nästa nivå genom att tillämpa teknologin i ett system och på en process. För det teleopererade och/eller delvis autonoma systemet av maskiner är det essentiellt att utreda säkerhetskritiska frågor. Förarlösa maskiner ger i sig en förutsättning att sätta operatören i en säker miljö medan maskinen kan arbeta där den direkta faran finns (rasrisk, rökutveckling). Systemet behöver kunna hantera olika tillstånd i maskinerna (autonom, teleopererad eller manuell drift) – skiftet mellan dessa är starkt kopplat till säkerhetsfrågor.

Projektet kommer att adressera följande forskningsfrågor:

- Hur kan Industri 4.0 tillämpas på gruvdriftsprocessen, vilka delar är lämpade delar för automation med hänsyn taget till produktivitet och säkerhet?
- Hur modelleras och simuleras en process för mobila maskiner? Går det med hög precision uppskatta avgörande parametrar som TCO (Total Cost of Ownership)?
- Vilka möjligheter öppnar sig då operatören skiljs från maskinen? Tillämpat på gruvdriftsprocessen, kan risken för operatörer sänkas samtidigt som produktiviteten ökas då maskinerna kan opereras på avstånd?
- Hur kan skiftet mellan autonom, teleopererad eller manuell drift göras säkert?
- Kan en operatör operera flera maskiner samtidigt? Fungerar det att maskinerna gör vissa moment automatiserat men där andra måste göras av operatören via teleop?
- Vilken infrastruktur och maskinnära teknik behöver finnas för att möjliggöra automatiserad drift av mobila maskiner. Hur kan det göras under jord?
- Hur viktar man ihop positionsdata och hur man skattar vilka lokaliseringssystem som är mest tillförlitliga för stunden? Hur väl systemet kör är en kombination av både positionsskattningen och reglermetoden - detta är viktigt för att säkerställa säker navigation.
- Ur ett funktionellt säkerhetsperspektiv, går det att distribuera säkerheten mellan infrastruktur och fordon?
- Hur säkerställer man funktionell säkerhet för maskiner som förlitar sig på omvärldssensorer där omvärlden inte är helt definierad?

En central frågeställning i projektet har varit hur man förflyttar sig i spannet som sträcker sig från manuell körning till autonom körning. Hur kan en sömlös övergång t.ex. ske från ren teleopererad körning (ofta är det en speciell initialiseringsoperation som behöver ske och att denna sker vid en viss plats) till full autonom körning? Överlag så är området mellan ren teleopererad körning och autonom körning och alla lägen där emellan intressant. Om vi ser indata som kontrollsignaler som både kan komma från ett autonomt system och från en operatör så är en frågeställning hur dessa kan kombineras på ett effektivt och intuitivt sätt vid navigation för både snabb och säker körning

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Det finns idag inget gruvbolag som har lyckats köra fyra enhetsoperationer efter varandra under tunneldrivning. Utkomsten av projektet skulle inte bara snabba på brytprocessen och därigenom produktiviteten. Möjligheten att ytterligare kunna utvinna hitintills obrytbar malm som av personsäkerhetskäl idag inte är möjligt kommer att i förlängningen stärka Sveriges konkurrenskraft.

Projektet är angeläget för programmet och bidrar till de övergripande målen genom att angripa i princip alla de prioriterade forsknings- och programområdena:

Anpassade transportlösningar

- Detta är huvudfokus i projektet. Att använda oss av kommande teknik (teleoperation, automation) inom en existerande process (gruvdrift) och skapa en anpassad transportlösning (system av maskiner) för den.

Fordons- och mobilitetstjänster (tjänster för automation och elektromobilitet, service och underhåll samt förarstöd)

- Vid uppförandet av ett system uppbyggt av teleopererade och delvis automatiserade maskiner kommer en stor del att handla om skiftet mellan teleoperation, automation och vad som måste ske manuellt. Men även vilka förarstödsfunktioner en teleoperatör behöver för att utföra olika moment i processen.

Väg- och IT-infrastruktur

- IT-infrastruktur i form av "connectivity" i gruvan i form av 5G eller motsvarande för kommunikation mellan "kontrolltorn", operatörsrigg och maskiner. Väginfrastruktur i gruvan sett till utrymmesanalyser, manövreringsanalyser, navigeringsanalyser kopplat till Volvo CE anläggningsmaskiner. Vilket är användbara resultat även vid infrastruktur/tunneldrivning utanför gruvnäringen.

Regelverk, standardisering och juridik

- Regelverk i form av studier av säkerhetsaspekter. Ett stort område när det kommer till förarlösa maskiner är säkerhetsaspekten kring maskinerna. Regelverk och standardisering utvecklas i takt med den nya tekniken. Detta projekt kommer bidra till denna utveckling och kommer beakta de standarder och regelverk som finns att följa i dagsläget.

Affärsmodeller kopplat till ny innovativ teknik

- Projektet är en fortsättning på tidigare projekt där Volvo CE arbetat med teknologierna teleoperation och automation. I detta projekt kombineras de två teknologierna och tillämpas på en befintlig process. Projektet ligger därav i linje med framtida affärsmodeller för anläggningsmaskinstillverkare som förutspås vara mer baserade på helhetslösningar snarare än individuella maskiner.

Människan i det förändrade systemet

- En stor anledning att införa teknologierna teleoperation och automation i gruvdrift är just för att kunna säkerställa att människor inte kan komma till skada.
- Då föraren tas ut ur maskinen och istället opererar från en fristående rigg blir frågeställningen kring människan i det förändrade systemet också högst aktuell i andra aspekter. Människan är den mest avancerade sensorn som finns i en anläggningsmaskin i dag, när den tas bort behöver det utredas vilken maskinkapabilitet och diagnostik som behöver tillföras för att operatören ska kunna fortsätta att utföra sitt arbete på ett effektivt vis.

5 Mål

Projektet kommer att bygga kunskap och kompetens inom Volvo CE, Boliden, Voysys och Örebro Universitet. Projektet för Boliden närmre sin vision att ta bort personal från farliga områden, förändra gruvan till en industriprocess med kontinuerligt flöde och öppnar möjlighet att bryta malm som tidigare varit utom räckhåll. Teleoperation och automation kommer innebära en förändring i vilket erbjudande Volvo CE kan ge sina kunder – från att vara en

anläggningsmaskinleverantör till att kunna erbjuda helhetslösningar för kunder som snarare efterfrågar att uppnå ett visst "ton per timme" och "\$ per ton".

Några av de primära områdena för kunskapsuppbyggnad är:

- Teleoperation av dumper och hjullastare
- Delautomation av dumper och/eller hjullastare
- Tillståndsskiftet för individuella maskiner (manuell, teleopererad respektive autonom drift)
- Teleoperation av flera och olika maskintyper från en och samma kontrollrigg
- Teleoperation av maskiner via 5G, 4G, wifi5 och wifi6

Projektet har som mål att i slutändan öka produktiviteten i gruvan genom att utnyttja tiden då människor ej vistas i gruvan. Projektet har även som mål att visa på ett system av maskiner som kan opereras på ett effektivare vis än en operatör per maskin sett till antalet operatörer som krävs för att hålla systemet i drift. Slutligen, att få bort människor från denna mycket farliga och svårkontrollerade miljö kommer att innebära en revolution för gruvnäringen och en milstolpe i det jämställdhetsarbete som är en utmaning för näringen.

6 Resultat och måluppfyllelse

I projektet har parterna tillsammans byggt mycket värdefull kunskap inom många områden så som automation, teleoperation, effektivisering av salvcykel för tunneldrivning, säkerhet samt kommunikationsinfrastruktur, med ett övergripande mål att ta ett stort steg mot en kommersiell lösning. Nedan följer en beskrivning av vad som gjorts i projektet samt resultat och reflektion kring de många lärdomar parterna har fått genom projektet.

6.1 Design och utveckling av teleopererad dumper och hjullastare

En demonstrator för teleoperation har utvecklats av Volvo CE för att löpande kunna testa systemet både ovan och under jord under projektets gång. Konfiguration, utvärdering och förbättring av denna demonstrator samt videoöverföring från Voysys och nätverkskrav kommer att beskrivas i detta kapitel. Både ordet teleoperation och fjärrstyrning kommer att användas i beskrivningarna av applikationen och avser samma sak.

6.1.1 Demonstrator

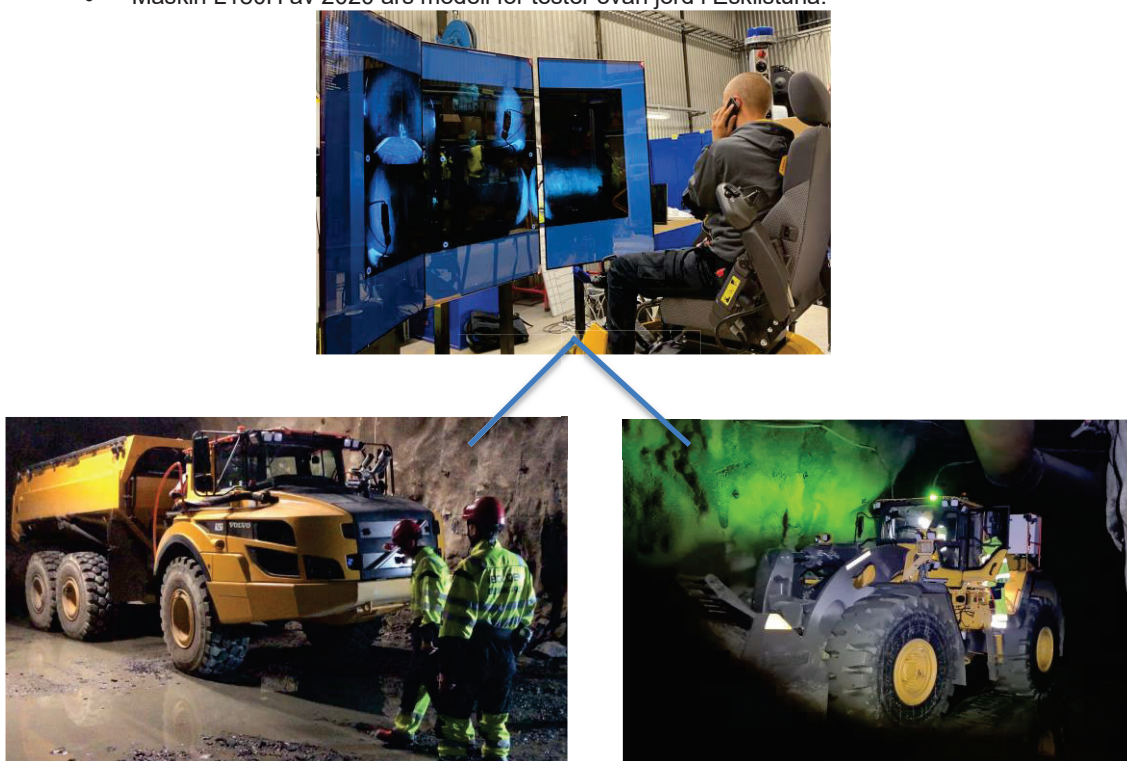
Konfigurationen av demonstratorn för underjordsdrift har följande specifikation:

- Maskin L260H av 2021 års modell med lågbyggd hytt för lastning under jord
- Maskin A25G av 2021 års modell med lågbyggd hytt samt av tredje part ombyggd till vattendumper (vattentank och vattenkanon för bevattning under jord).
- En operatörsstation, s.k. "rigg", för teleoperation med möjlighet att skifta mellan flera teleopererade maskiner. Operatörsstationen är en anpassad simulatorrigg från Oryx, normalt även använd som träningssimulator inom Volvo CE.
- Videoöverföringsmjukvara "Oden" från Voysys
- 6 kameror placerade på respektive maskin utifrån hypoteser kring krav på sikt runt maskinen för effektiv och säker hantering
- 6 radarsensorer placerade i maskinens fyra riktningar (fram, bak, 2st höger, 2st vänster).
- 6 vyer, grafisk feedback och textinformation fördelades initialt på 3 skärmar.
- Multimodal återkoppling från maskinen:
 - Visuellt återkoppling av omgivningen via kameror
 - Ingen rörelseplattform aktiverad
 - Ingen ljudöverföring
 - Textåterkoppling av följande information:
 - Status på parkeringsbroms
 - Motorvarvtal (RPM)

- Hastighet
- Växel
- Bränslenivå
- Maskinvarningar
- Skopfyllnadsgrad i %
- Skop- och tiltvinkel
- Grafisk representation av maskinens styrvinkel (fågelperspektiv) i kombination med avstånd till omgivning i form av ett värde 0-10m.
- Enklare GUI touch-screen för att möjliggöra anslutning till och byte mellan maskinerna i systemet.
- Kontroll av lyframverk och skopa (hjullastare) och vattenkanon (dumper) med hjälp av enspakslösning som återfinns i Volvo's konventionella hjullastare.
- Konnektivitet: Maskinerna utrustade med kapabilitet för att hantera kommunikation både över 4G, 5G och wifi.

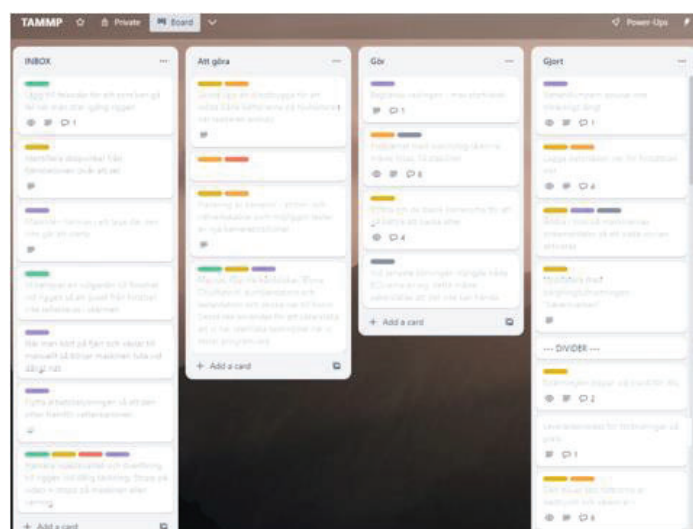
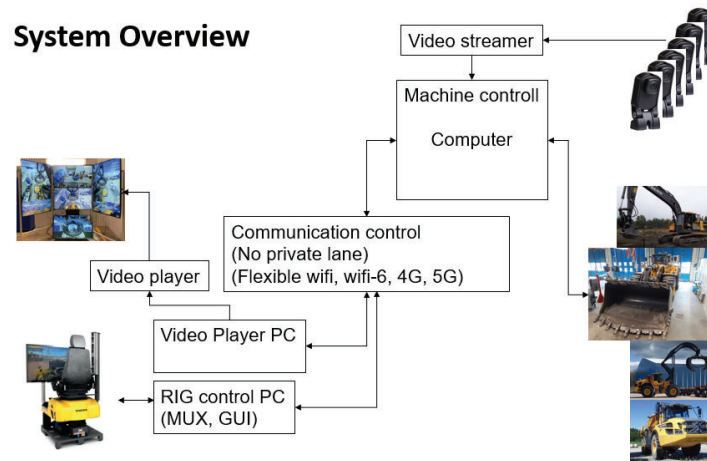
Demonstratorn för ovanjordsdrift är konfigurerad på samma sätt med skillnaden att maskinerna som använts i systemet är följande, Figur 5:

- Maskin A30G av 2021 års modell för tester ovan jord i Eskilstuna.
- Maskin L180H av 2020 års modell för tester ovan jord i Eskilstuna.



Figur 5, Ingående prototyper i demonstratorn för underjordsdrift

I det cyberfysiska systemet, Figur 6, ingår även kommunikationslösningen under jord där Boliden ombesörjt säkerställandet av framförallt wifi i områdena där maskinerna har verkat. I Eskilstuna har systemet främst använt sig av 4G i testerna ovan jord.



6.1.3 Överföring av videoström – konfiguration och nätverksreglering

Systemkonfiguration

Att fjärrstyra i en gruva skiljer sig i stor grad mot att framföra ett fordon över mark och det är inte bara kameraplaceringar och layout av vyer för operatören som skiljer sig mellan dessa två scenarior. Problem uppstår också när maskinen är under mark och konfiguration behöver göras av systemet för videoström. Att kunna konfigurera systemet trots maskinen är under jord visade sig vara av stor vikt. Att grafiskt kunna ansluta och konfigurera systemet gjorde processen för att sätta upp en maskin mycket lättare för vissa delar. Det finns flertalet olika mjukvaror med denna funktionalitet som kan användas. Dock är det inte alltid dessa mjukvaror som kan användas då datorn på fordonet ibland körs utan grafiskt användargränssnitt. Voysys granskade och utvecklade ett eget system för fjärrskrivbord för att täcka detta fall vilket var av stor hjälp vid felsökning och konfiguration av Voysys mjukvara under projektet.

Nätverk – reglering, övervakning och åtgärder i Voysys mjukvara

Stora krav sätts på nätverket när maskiner ska styras via teleoperation och speciellt vid körningar under jord. Om anslutningen till ett fordon bryts är det inte säkert att den kan återupptas på lång tid beroende om personal kan ta sig fram till fordonet. Voysys har tittat på många olika förbättringar av deras nätverkssystem för att göra det mer robust för snabba ändringar. Forward Error Correction (FEC) är ett verktyg där extra nätverkspaket skickas för att återställa data ifall paket blir tappade. Detta gör videoströmmen mer stabil på dåliga nätverk och på överlämningar mellan noder. Nackdelen är att mer data kommer sändas över nätverket men fördelen är att systemet får större resiliens. Vid tester har det visats att många wifi-nät kräver en viss del FEC paket för att stabilt kunna strömma video, detta är på grund av olika implementationer av wifi-standarden och hur tappade paket hanteras.

Voysys har gjort en utvärdering av sitt nätverkregleringssystem för att se om det fanns ett bättre sätt att göra det. Nuvarande system består av en nästlad proportionerlig, integrerande, deriverande (PID) regulator som styrs av ett estimerat bandbreddupptag. Den första algoritmen som jämfördes mot var en variant av den nuvarande algoritmen där förlorade paket och jitter hade större inverkan på regulatorn. Den sista algoritmen var en Additive Increase/Multiplicative Decrease (AIMD) som är en simplare algoritm men potentiellt snabbare. I test med riktiga nätverk visades det sig att varianten av den nuvarande algoritmen inte gav någon förbättring och AIMD algoritmen var väldigt känslig på jitter och blev ostabil på dåliga nätverk. Den nuvarande lösningen var den som var mest stabil på dåliga nätverk, dock visade alla tre lösningar bra resultat på syntetiserade tester vilket visade vikten av riktiga tester på riktiga nätverk.

Det finns många olika tekniker för att minska bandbredden som skickas från fordonet, ett tillvägagångssätt som undersöktes var att ställa om från färgbild till bild i gråskala. En gråskalabild använder sig av en ensam färgkanal istället för tre som en färgbild använder. Då bilden i en gruva består till stor del av grått berg och mörker så gjordes tester på att se hur stor bandbredd som skulle kunna sparas genom att skicka en gråskalabild. Med en 1920x1080 bild så sparades endast 8% bandbredden jämfört mot en färgbild. Detta låga resultat kommer från att kompressionstandarden H.265 använder sig av färgformatet NV12 där 8-bitar används till gråskala och 4-bitar till färgåtergivningen, så den maximala minskningen kan bli 33%. För att ta reda på varför minskningen endast var 8% så behövs en detaljerad analys i implementationen av hårdvaruenkoder vilket inte är möjligt.

Nätverk – reglering, övervakning och åtgärder generellt

En viktig parameter för att uppnå effektiv teleoperation är en låg och konstant fördröjning i överföringen av videoströmmen. Med optimerade inställningar i Voysys mjukvara kunde vi nå en väldigt låg fördröjning. Vid mätningar av glass-to-glass fördröjning, vid måttillfället med 4G nätverksuppkoppling, kunde vi mäta värden under 150ms. Lägre värden uppnås med nätverksuppkoppling via wifi, då wifi har betydligt lägre nätverksfördröjning.

Det har visat sig att det är avgörande att även behärska detaljer i den valda kommunikationsteknologin (4G, 5G, wifi). Inom varje kommunikationsteknologi finns parametrar som kan påverka dataöverföring negativt och därmed skapa problem för den visuella återkopplingen. För en optimal operatörsupplevelse och i

slutändan effektivt arbete, är det önskvärt att kunna garantera en viss bandbredd samt en stabil låg och icke-varierande överföringsfördröjning. Under tester i 4G- och wifi-nätverk kunde vi notera att variationer i överföringsfördröjning kan skapa en störande, hackande, effekt i videoflödet, det på grund av att data buffras och videoströmmen då inte kan spelas upp med konstant frame rate. Detta beteende har noterats i 4G nätverk när kanalkodningen ändrats på grund av dålig mottagning, då även i samband med försämrade kanalkapacitet. I Bolidens wifi-nätverk, som har väldigt låg och därmed optimal fördröjning, kunde fördröjningsvariationer noteras när wifi-klienten började söka efter nya anslutningspunkter och även i samband med wifi-kanalbyte. Boliden arbetade hårt under projektet med att optimera sitt wifi-nätverk och kunde därav minimera dessa variationer i fördröjningen. Olika sätt att lösa problemet identifierades t.ex. att köra enkanalig wifi-setup, att använda wifi-klienter som med oberoende process jämt söker efter ny anslutningspunkt utan att påverka pågående dataöverföring, samt att ha komplett redundanta uppkopplingar för videoströmmarna.

Det ska också nämnas att Volvo's utvecklingstester drabbades i senare projektfasen av konnektivitetsproblem vid körning över 4G. Detaljerade undersökningar pågår men variationerna i både kanalkapacitet och överföringsfördröjning tillskrivs till stor del att uppkopplingen sker mot det publika 4G-nätet och därmed saknar garanterade kommunikationsparametrar.

En allmän slutsats är att både upplägg av nätverk och analys av nätverksproblem kräver gedigna kunskaper inom nätverksteknologi, -infrastruktur och -konfiguration, och att dedikerad kompetens behövs inom projektet.

6.2 Utvärdering av människa-maskin interaktion

Som nämndes inledningsvis i rapporten så är en central frågeställning i projektet människan i det förändrade systemet. Detta gäller både när det kommer till övergången mellan teloperation och automation men också hur operatören i en fjärrstyrningsapplikation kan fortsätta utföra sitt arbete effektivt och säkert utan den återkoppling som normalt sett finns tillgänglig vid manuell drift. I detta kapitel redovisas de resultat som byggts under projektets gång kring behov och krav på detta område.

6.2.1 Omgivningsuppfattning vid teloperation

Underjordsdemonstratorns operatörsstation och framförallt möjligheten till visuell återkoppling, designades utifrån hypoteser om vilken omvärldsinformation en fjärroperatör kommer att behöva i den aktuella applikationen. En konfigurerbar operatörsrigg både hårdvarumässigt men även mjukvarumässigt, via Voysys videoströmningslösning, möjliggjorde att hypoteser kring omvärldsuppfattning har kunnat undersökas. Fjärrstationen har i sin tur sedan konfigurerats om under projektets gång för att bättre möta de behov som identifierats under dessa tester, Figur 8.

Hypotesen var att den visuella återkopplingen skulle placeras inom förarens laterala synfält när denne tittar rakt fram utan att röra på huvudet, dvs informationen skall finnas tillgänglig inom en sektor som mäter total 70 grader. Denna anatomiska förutsättning/begränsning tillsammans med antalet kameror som ska visualiseras, samt önskan om att skapa en känsla av närvaro av gruvmiljön i fjärrstationen, gav upphov till konceptet för skärmuppsättningen vid leveransen av systemet till gruvan.



Figur 8 Fjärrstationens utformning vid leverans av systemet till gruvan

Följande faktorer har påverkat konfigurationen av skärmar och bilder och är ett resultat av användning av systemet där behov identifierats utifrån förarperspektiv:

- Bildkvalitet
 - I detta fall har bilderna behövt minskas i storlek för att uppnå önskad bildkvalitet. Detta är en direkt följd av kamerornas tekniska specifikation. Kamerornas kapabilitet är en kompromiss mellan robusthet och bildkvalitet. Se mer om kameror i kapitel 6.2.2.
- Bildstorlek
 - Mindre bilder, dvs högre upplösning, får följd effekten att skärmarna önskas placeras närmare föraren och delar av den visuella återkopplingen hamnar utanför det önskvärda laterala spannet.
- Siktinkel
 - En större lateral siktinkel medför ökade huvudrörelser vilket upplevs som ansträngande.
- Störande artefakter
 - Skarvarna mellan bildskärmarna blir ett störningsmoment och en mer sömlös känsla är önskvärd.

Resultatet blir att endast en skärm i landskapsformat implementeras där all information erbjuds inom det önskvärda laterala spannet, inklusive den textbaserade och grafiska återkopplingen som utvecklats löpande under projektets gång, Figur 9.

Höjden på skärmen anpassas sedan så att föraren får en avslappnad nackposition enligt ergonomiska principer.



Figur 9, Konfiguration av skärmlayout efter tester

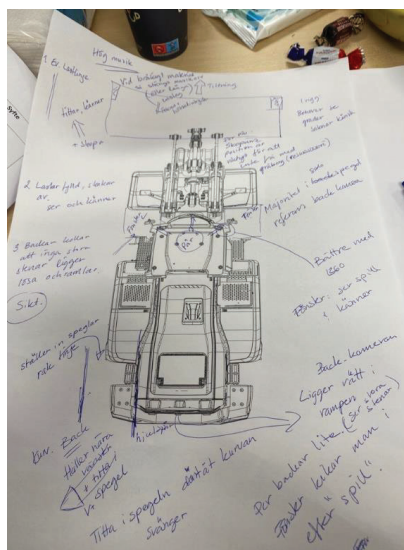
6.2.2 Fördjupning kring videodistribution och kameralayout i fjärrstationen

För att öka produktivitet och säkerhet vid teloperation måste rätt information ges vid rätt tillfälle, för mycket information kan göra att operatören har svårt att orientera sig samt ta in rätt information. En workshop hölls tidigt efter systemleveransen mellan Boliden, Voysys och Volvo för att granska kameraplaceringar och layout på operatörens skärmar, Figur 10.

Kameraplacering och kalibrering

Kameraplaceringar valdes för att täcka upp områden som operatören delgav var viktiga för att framföra fordonet under jord. Förutom placeringar så provades kameror med olika field of view (FOV) för att se vad som skulle passa bäst till denna typ av maskin. Viktiga punkter som framkom efter diskussion med operatör som bekräftar delar av slutsatserna i föregående kapitel, var följande:

- Det var viktigt att se delar av fordonet i kameran så operatören fick en referens var kameran var placerad och var maskinen befinner sig i förhållande till omgivningen.
- En stor fish-eye effekt från kameran tröttade ut operatören snabbare då väggar och liknande inte rörde sig symmetriskt.
- Att förstora upp en viss kameravy hjälpte inte operatören då bilden blev mer oskarp/pixlig och svårare att köra efter.
- Bättre upplösning framåt var uppskattat då operatören ville kunna se materialet som skulle plockas upp.



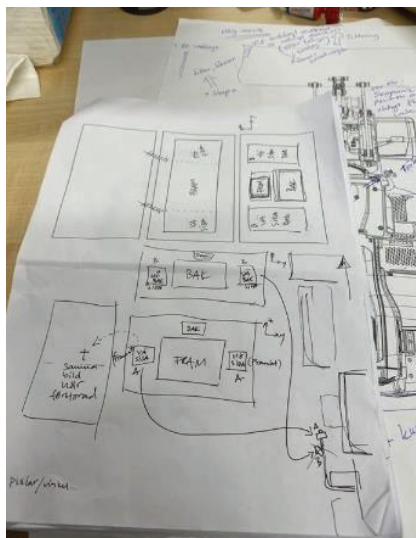
Figur 10, Under workshopen gjordes anteckningar om olika kameraplaceringar på fordonet

Det visades att kameror med 180 grader FOV gav mycket information men gav inte tillräckligt skarp bild för att vara användbart. Kameror med 120 grader FOV var en bra blandning mellan större synfält och skarp bild. Om kameror med 180 grader FOV ska användas så behövs större upplösning än 1280X960 som kamerorna i projektet använde.

Det visade sig också att kameror med 180 grader FOV tröttade ut operatören då fish-eye effekten från linsen förvrängde omgivningen på ett sådant sätt att det blev överstimulerande. När linser med stor FOV används så behövs därför ett verktyg för att minska förvrängningen och i projektet användes Voysys egna verktyg för detta ändamål. Efter kalibrering upplevde operatören en klar förbättring men när bytet till kameror med 120 grader FOV gjordes så gav dock denna kalibrering inte lika stor positiv vinning.

Videolayout

Layouten av videoströmmarna har stor påverkan på hur effektivt chauffören kan utföra sitt arbete. Flera olika videolayouter diskuterades och förbereddes för test, exempel kan ses i Figur 11.



Figur 11, Skiss över potentiella layouter för hjullastaren

Två olika typer av layouter skulle testas:

1. Använda en layout där alla kameror är synliga för operatören samtidigt
2. Använda två layouter, en för att köra framåt och en för backning där olika kameror visas beroende på vilken uppgift som operatören ska utföra

Fördelen med en layout med alla kameror synliga är att operatören har all information tillgänglig vid alla tidpunkter, men kan lätt bli distraherad av alla kameravyer. Att använda två layouter reducerar överflödig information till operatören men vid växling av vy kan det behövas omställningstid för operatören att orientera sig mellan vyerna.



Figur 12 Layout 1 - alla vyer aktiva samtidigt



Figur 13 Layout 2 - enbart vyer som visar riktning framåt är aktiva

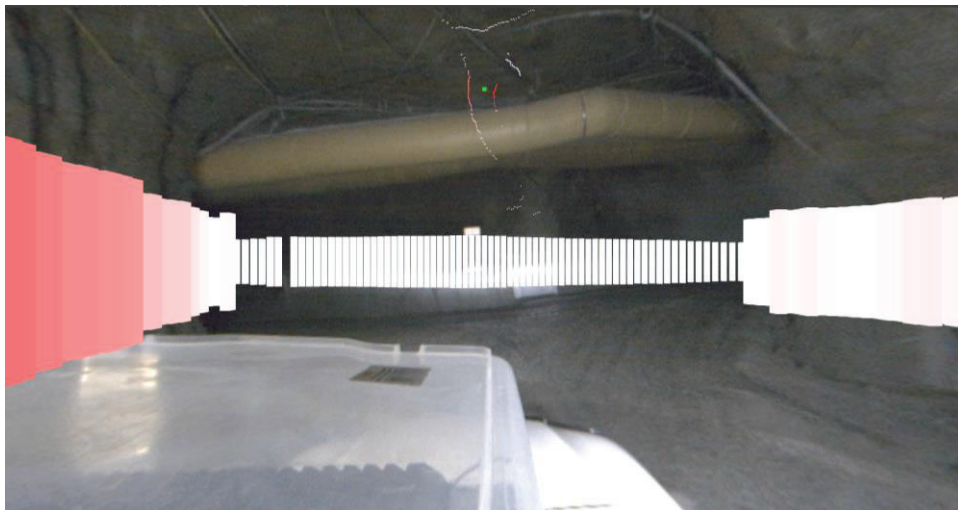
Under testerna av dessa två layouter konstaterades att i backning behöver operatören även tillgång till framåtkamerorna för att se var framtiden av maskinen befinner sig, främst för att undvika kollision under manövrering i trånga förhållanden. Däremot under körning framåt med färre komplicerade manövrar gick det utmärkt att enbart visa framåtvyer. Dock kommer längre tid krävas i de olika körfallen för att avgöra om den totala kognitiva belastningen kommer att minska. Figur 12 och Figur 13 visar dessa koncept vid körning ovan jord i Kankberg.

6.2.3 Återkoppling via grafisk eller numerisk representation av olika maskintillstånd

En av styrkorna med teloperation är att man som förare får möjlighet att utföra sitt arbete utan de påfrestningar som både vibrationer och ljud utgör i manuell drift. Teleoperation utan återkoppling av ljud eller rörelse har därför utvärderats under projektets gång och var ett tidigt önskemål från den testförare som ingått i projektet. Med denna utgångspunkt har projektet utvärderat om grafisk och/eller numerisk återkoppling är tillräcklig för att framföra fordonet på ett kontrollerat sätt. Frågeställningen har även kretsat kring vilken information som behövs för att öka känslan av kontroll och omvärldsförståelse. Detta för att operatören fortsatt ska kunna vara produktiv samt utföra arbetet med omtanke om maskinen. Ett av problemen när ljud och rörelse som återkoppling tas bort är att man har svårt att uppfatta om man till exempel lättar med bakhjulen på grund av överlast i skopan, slirar på framdäcken vid fyllning av skopa eller andra tillstånd som lätt upptäcks vid manuell drift. För att öka förståelsen kring dessa tillstånd vid teleoperation lades information till i riggen kring bland annat skopfyllnadsgrad och skop- och tiltvinkel. Upplevelsen är att föraren med hjälp av denna mätbara information kan koppla specifika händelser eller maskinbeteenden till en specifik skopfyllnadsgrad och/eller skopvinkel. Information om hur mycket last man har i skopan kan även fungera som ett mått på om man som förare presterar bättre eller sämre än föregående lastcykel, och då lära sig vilken körstil som fungerar bra respektive mindre bra. Även styrvinkel fanns med från start i fjärrstationens design och föraren bekräftar att denna information kan vara värdefull vid följande tillfällen och framför allt vid teleoperation av hjullastare:

- Som ett av medlen för förbättrad avståndsbedömning
- Som support för att förstå om man svängt fullt eller om det är något annat som stoppar maskinen från att fortsätta svänga (till exempel en sten vid något av hjulen)

Avståndsbedömning är sedan tidigare undersökningar redan ett känt problem inom teleoperation och bekräftas även under dessa tester. Prototypmaskinerna fick därför radarsensorer monterade i maskinens alla fyra riktningar och avstånd till objekt runt maskinen kunde visualiseras i fjärrstationen. Även mer avancerade tester gjordes tidigt i projektet med en 360-gradersradar. Om intrinsic parametrarna på kameran som används är kända så kan visualisering anpassas så den överensstämmer med världen som visas genom kameran vilket kan ses i Figur 14. Att visualisera radarpunkterna korrekt i världen så kan både radar/lidar användas för ge operatören en större uppfattning om distans till objekt då det är svårt att avgöra djup på en 2D skärm.



Figur 14 Visualisering av radardata i gruva där varje radarpunkt är utplacerad för att överensstämja med bilden som kommer från kamera.

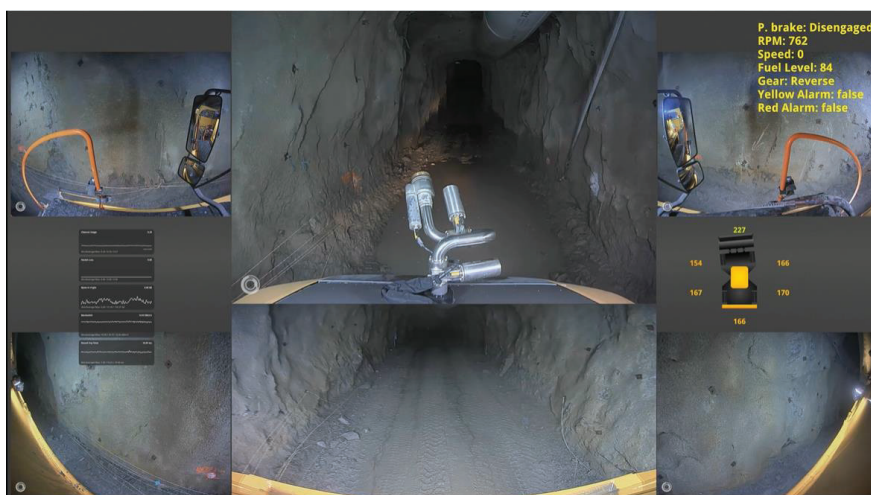
Övriga identifierade behov på återkoppling är vid backning långa sträckor. Referenslinjer eller liknande stöd i videoströmmen är önskvärt för att veta vart man är på väg och skulle underlätta detta moment som annars kräver en konstant kontroll av de olika vyerna för att avgöra om man är på väg att köra in i något eller har fel riktning i de smala gruvgångarna. 3D-utskrivna "flaggor" med reflexer testades att monteras fysiskt längst bak på dumpern, dessa var sedan synliga i sidokamerorna och blev ett stöd vid backning. Under körning ovan jord, eller framför allt

där ytorna runt maskinen är generösare, ser man inte detta behov lika tydligt. Scenariot kan jämföras med att backa in med personbil mellan två bilar på en parkering, med skillnaden att backningen sker flera hundra meter i sträck. Den kognitiva belastningen är hög när man måste skifta uppmärksamheten konstant mellan de olika kameravyerna och föraren upplever att detta är väldigt påfrestande.

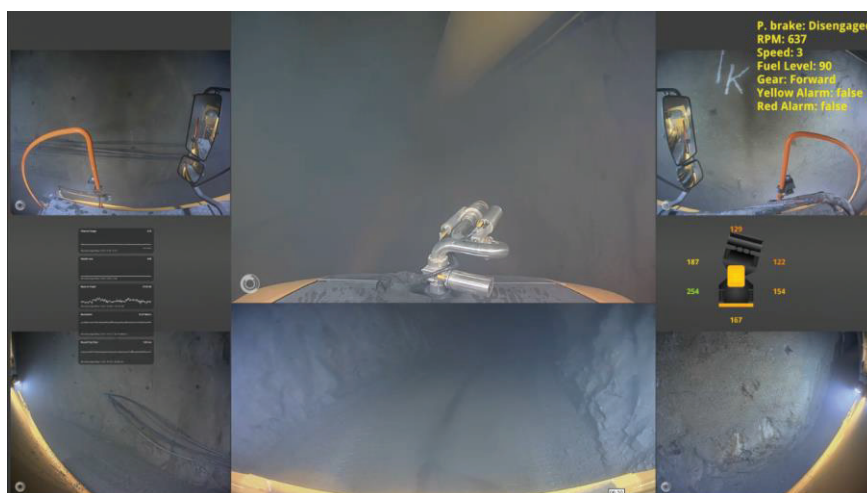
6.3 Utveckling av autonom funktionalitet

6.3.1 Identifiering av lämpliga delautomatiserade moment

Scenariot med backning långa delsträckor under jord och den höga kognitiva belastningen talar för att just detta moment skulle vara värdefullt att delautomatisera för att öka effektiviteten. Under testerna är det dock inte bara backning som identifierats som potentiellt moment att automatisera. Även vid transport framåt mot brytrummet genom de smala gruvgångarna finns incitament för att implementera autonom teknik på grund av den rök som färdas genom gångarna efter en sprängning, Figur 15. Röken begränsar sikten till den grad att det är omöjligt att köra framåt manuellt innan röken passerat gången, vilket kan ta upp till en timme efter sprängningen, Figur 16. Automation kan till viss del lösa detta men perception i form av sensorer (lidar, radar) kommer vara nyckeln till både teleoperation med och utan delautomatiserade moment.



Figur 15 Nedre delen av bilden visar backning i de smala gruvgångarna, att backa långa sträckor är påfrestande för operatören

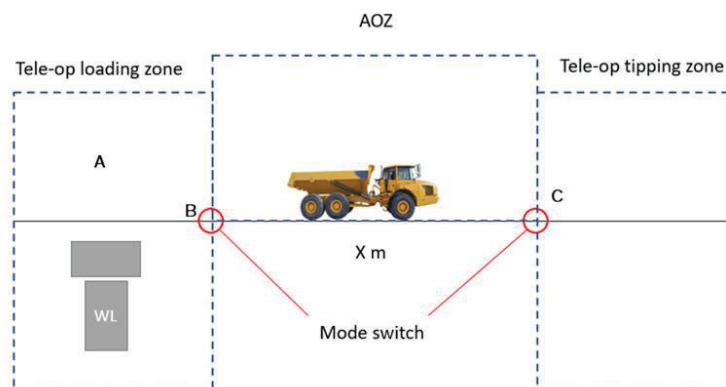


Figur 16 Rök i gångarna försämrar sikten och försvårar navigering

6.3.2 Tillståndsskiftesstrategi teleoperation till autonom operation

För att kunna implementera autonom funktionalitet i systemet är det viktigt att ha en tillståndsskiftesstrategi som möjliggör att maskinerna på ett enkelt sätt kan skiftas mellan manuell, fjärrstyrd och fullautonom drift, Figur 17. Detta ställer krav på att maskinens interna elektronikarkitektur stödjer operation av maskinen från flera källor och att på ett enkelt sätt kunna skifta mellan dessa, vilket delvis uppnåddes inom ramen för projektet både via lösningen som Örebro universitet tagit fram samt genom den fortsatta Volvo-interna utvecklingen av de kritiska moduler i automationsplattformen som hanterar säkerhetsfunktioner och de olika maskintillstånden. I slutfasen av projektet demonstrerades dessa tillståndsskiften med begränsningen i att maskinen i fullt autonomt tillstånd av säkerhetsskäl var tvungen att vara uppkopplad mot fjärrstyrningsriggen för övertagande vid eventuella avvikelser.

I dagsläget sker tillståndsskiftet mellan fjärrstyrning och autonomi genom att autonom funktion begärs via fjärrstationen. Fjärroperatören övervakar sedan fordonet och har möjlighet att bromsa och även ta tillbaka kontrollen över maskinen under autonom drift.



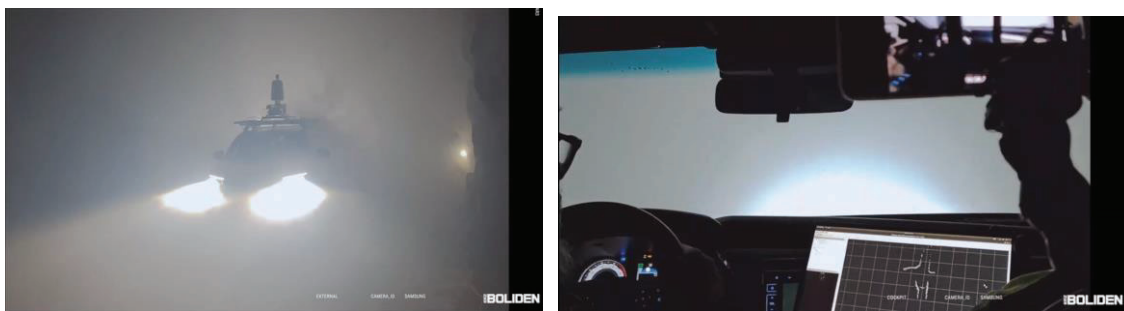
Figur 17, Schematisk bild över användarfallet för tillståndsskiftet mellan teleoperation och autonom drift. Till detta kommer även möjligheten att framföra fordonet manuellt vid behov

6.3.3 Användargränssnitt vid tillståndsskiftet

När en maskin kan inta flera olika tillstånd och skifta mellan till exempel fjärrstyrning, manuell- och autonom drift behövs tydlig återkoppling till ansvarig operatör om vilket tillstånd maskinen eller maskinerna befinner sig i vare sig man är i en fjärrstyrningsstation eller fysiskt i maskinen. I fjärrstationen kan denna återkoppling vara en kombination av olika typer av information i till exempel videoströmmen från maskinen, haptisk återkoppling via kontroller eller speciellt utvecklad ljudåterkoppling. Hur man bäst visualiserar de olika tillstånden behöver utvärderas närmare men hänsyn bör tas till gällande standarder för visuell återkoppling och information i manuellt framförda maskiner så som färger och symboler på varningar och notifieringar. I systemet utvecklat inom ramen för detta projekt återges tillståndet fjärrstyrd respektive autonom drift i text tillsammans med övrig maskininformation i anslutning till videoströmmen från maskinen i fjärrstationen.

6.3.4 Tekniker för positionsskattning

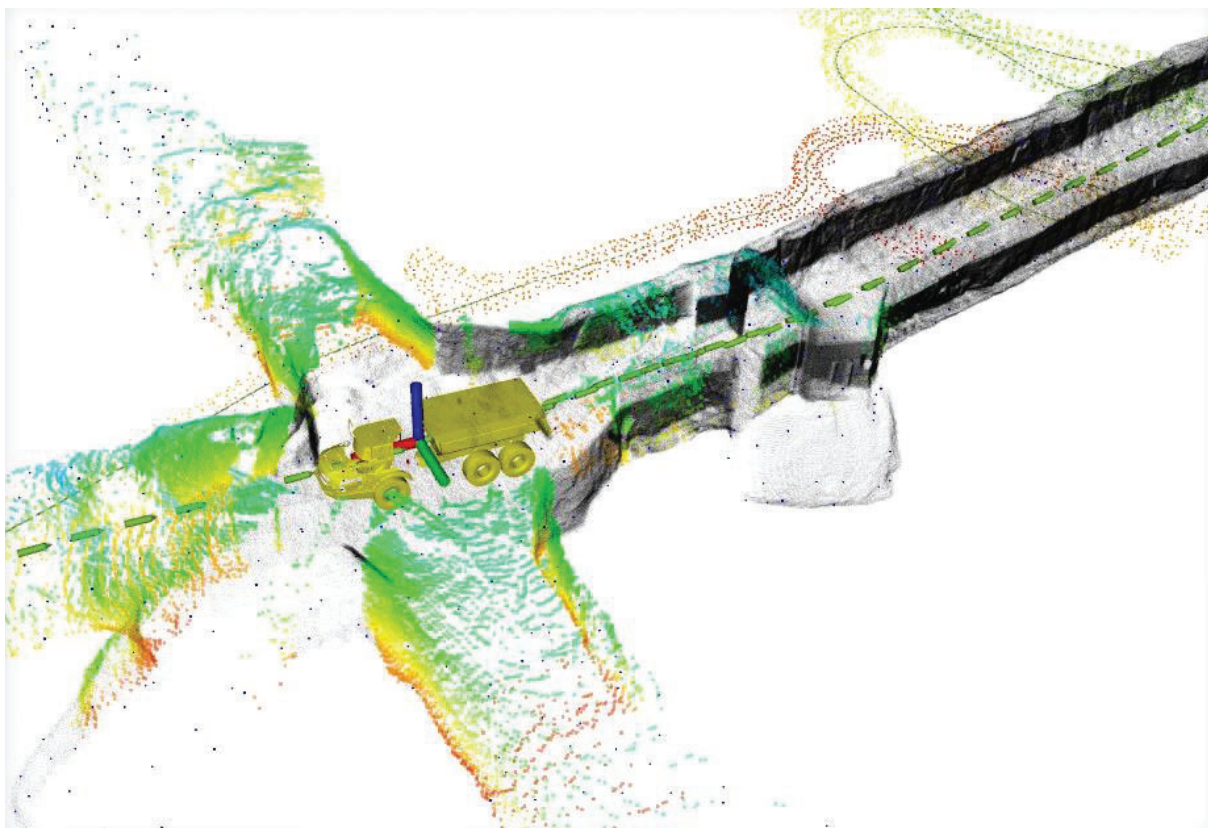
I projektet har dels lidar-sensorer som tidigare använts för positionsskattning och kollisiondetektering använts. T.ex. så var det 3D lidar data som utnyttjades under autonomkörning i demonstratorn. Rent forskningsmässigt och även resultatmässigt har nya tekniker och algoritmer för positionsskattning tagits fram med fokus på att använda radardata. I projektet har vi t.ex. fyllt en del av gruvan med "discorök" där en pickup bil kunde framföras enbart med hjälp av information från radar, Figur 18.



Figur 18, Test med 2D radar monterad på pickup bil

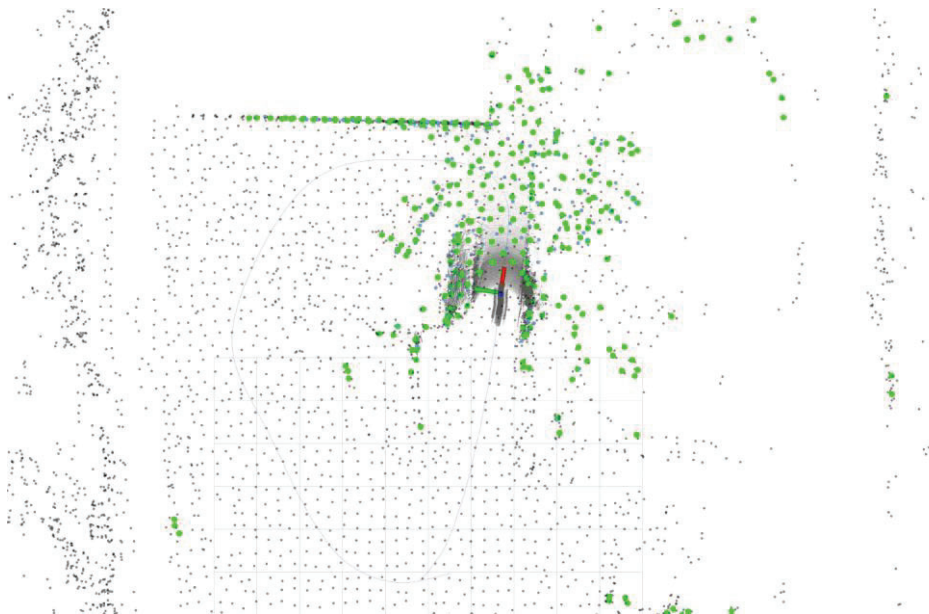
Data från gruvan har använts för att utveckla metoder som publicerats under projektiden och metoden beskriven i publikationen TBV Radar SLAM (Adolfsson, D. , Karlsson, M. , Kubelka, V. , Magnusson, M. & Andreasson, H., 2023) är den metod som i skrivande stund är state-of-the-art inom positionskattning med hjälp av 2D radar.

Projektet har även bidragit till två publikationer inom registrering, där dessa metoder t.ex. även användes i demonstratorn. Registrering handlar om att kunna skatta relativ position och orientering mellan sensordata. Denna teknik baserad på fuzzy klustring är sensor agnostisk för avståndssensorer och har använts både för lidar- och radarsensorer.



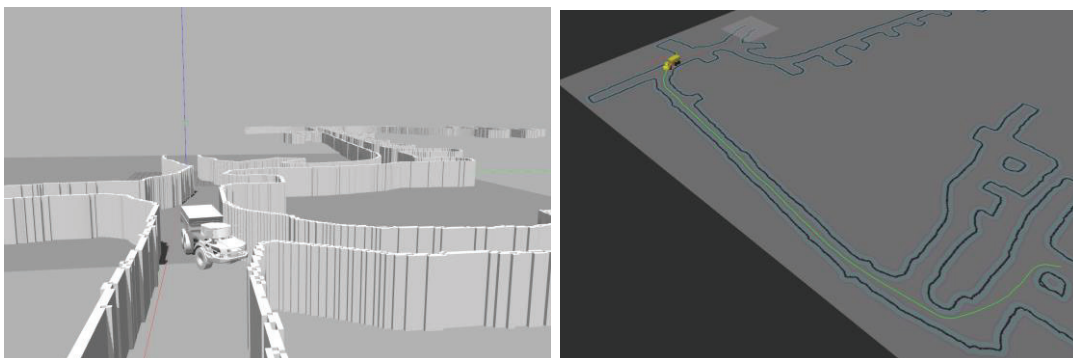
Figur 19, Kartering och lokalisering i gruvmiljö

I projektet har positionskattningen även använts för att styra en maskin autonomt vilket ställer ytterligare krav på dels robusthet men framförallt noggrannhet och "mjukhet" i skattningarna för att garantera att maskinen styrs på ett bra sätt med mjuka och precisa (ej oscillerande / ryckiga) styrutslag.

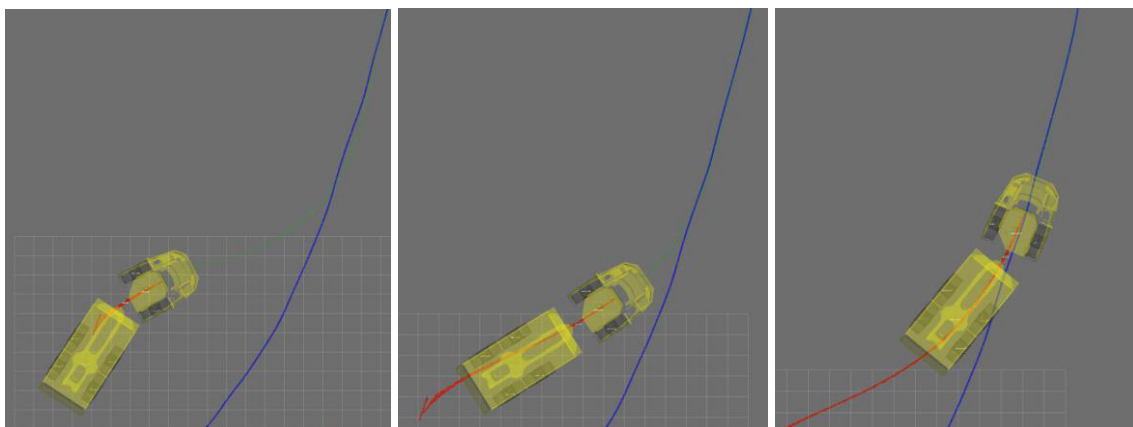


Figur 20, Exempel på positionsskattning från testbanan hos VCE i Eskilstuna. Gröna punkter beskriver en lokal kartrepresentation som används för att lokalisera mot en tidigare genererad kart (svarta punkter).

Positionsskattningen används sedan som input till ett regelsystem som styr maskinen, Figur 20. Reglersystemet är ett modelbaserat system vilket innebär att en dynamisk modell används för att kunna optimera styrdata för att maskinen skall följa en rutt. För framtagning och tester av olika styrmetoder har simuleringsmodeller använts för testning.



Figur 21, Vänster: simuleringsmiljö med vattendumper och gruvmiljö. Höger: Automatisk planering av rutt (grön) som maskinen följer autonomt i den simulerade miljön.



Figur 22, Modellbaserad styrning. Maskinen står långt ifrån önskad körväg (blå). Genom att använda en dynamisk modell av maskinen kan en horisont av optimala styrvärden räknas fram (grönt)

6.4 Kompetensbyggande inom diagnostik, säkerhet och nya tjänster

När man förflyttar maskinkontrollen från lokalt vid maskinen till en fjärrstyrningsstation ställs nya krav på möjligheter till diagnostik, information och även funktionell säkerhet. Här nedan redogörs för de slutsatser som dragits under projektet på dessa områden.

6.4.1 Diagnostik och tjänster

Tidigare har redogjorts för information som identifierats av fjärroperatören som viktig för att kunna köra med god omvärldsuppfattning, minskad kognitiv belastning och med hänsyn till slitage på maskinen i den direkta användningen så som:

- Styrvinkel
- Möjlighet att upptäcka hjulslir
- Support för att effektivt veta hur mycket last man har i skopan för att undvika överlast

Det finns dock ytterligare information och data från maskinen som kan vara viktig att få till sig när maskinen är lokaliserad otillgänglig för samma tillsyn och uppmärksamhet på avvikelser som vid manuell drift. Detta gäller både under själva körningen men även för att kompensera för den dagliga tillsyn som maskinerna normalt sett får när de framförs av operatörer lokalt.

I demonstratorn idag är de redan befintliga varningssystemen på maskinen speglade i fjärrstationen och operatören kommer vid uppstart av maskinen på fjärr omgående se om röda eller gula varningar är aktiva. Om så är fallet kan operatören avgöra om åtgärd behöver ske innan drift kan starta.

Övrig diagnostik och information kring både maskin och infrastruktur som identifierats som viktig för att realisera Industri 4.0 på ett effektivt sätt är:

- Möjlighet att i realtid under körning få information om kommunikationskvalitet. Detta för att innan ett potentiellt oåterkalleligt kommunikationsavbrott kunna avvakta bättre signalstyrka, sänka hastigheten alternativt helt undvika områden med dåliga signalförhållanden.
- Brandsläckningssystemets funktionalitet och status vid autonom eller fjärrstyrd drift – här spelar även tillståndsskiftesstrategier en viktig roll och med det kunskapen om vilket tillstånd maskinen befinner sig i, både från fjärrstationen men även lokalt vid ett potentiellt övertagande för manuell drift. Under projektets gång har krav på brandsläckningssystemet för prototypmaskinerna diskuterats med utgångspunkt i hur rutinerna för brandsläckning och relaterad funktionalitet ser ut idag i målmiljön och vilka förändringar, både på maskinen och rutiner under jord, som kommer vara nödvändiga för en säker drift även under teleoperation och autonomi.

Önskvärd kapabilitet eller tjänst som tillkommer till ett fjärrstyrt system är även möjligheten att kunna starta upp maskinen utan föregående lokal maskininteraktion. Under projektets gång har prototypmaskinerna utrustats med extra batteripaket för att kunna hålla en stand-by tid på systemet i upp till 4 timmar. Detta är spannet som har identifierats som relevant från sista maskininteraktion under jord innan sprängning till uppstart av fjärrsystemet efter sprängning. Som en utveckling av systemet där stand-by tiderna kan vara längre eller då man helt och hållet vill undvika lokal maskininteraktion innan uppstart krävs en systemkapabilitet där maskinerna kan väckas helt oberoende av lokala förberedelser.

6.4.2 Funktionell säkerhet maskin till infrastruktur

Hytten har historiskt sett varit den naturliga platsen från vilken operatören styr en maskin och när operatören flyttas bort från maskinen så försvinner även den direkta kopplingen mellan maskin-reglage-operatör. Denna direkta koppling ersätts istället av ett kommunikationsnätverk med maskinen på ena sidan och reglagen och operatören på andra sidan. Ett kommunikationsnätverk har sina brister som ställer helt nya krav på styr- och kontrollsystemet, brister som man måste kunna övervaka, kontrollera eller skydda sig emot. I det här projektet har det implementerats en watchdog-lösning kombinerat med krypterad kommunikation. Resultatet blir att om flera meddelanden från fjärrstationen eller maskinen inte kommer fram i tid, eller är skadade, så stannar maskinen och försätts i ett säkert läge.

Funktionell säkerhet kan förutom säkerställandet av korrekt funktion även handla om sådant som rätt känsla i reglagen för att operatören säkert ska kunna manövrera maskinen. Här behöver hänsyn till exempel tas till att sikten och avståndsbedömningen förändras när operatören inte längre sitter i hytten. Detta behöver man på olika sätt kompensera och ge operatören stöd för, något som för applikationen i detta projekt redogjorts för i kapitel 6.2.1. Även här behöver man säkerställa funktionen i dessa system och att operatören får information om eventuella avvikelser.

Att försätta maskinen i ett säkert läge vid brister på maskinens interna system, fjärrstationen eller kommunikationsnätverket är en del i den funktionella säkerheten men även organisatoriska åtgärder är viktiga som ett komplement till tekniska aspekter beroende på vilken kontext eller "Operational Design Domain" (ODD) som är gällande för systemet, Figur 23.

"Operating conditions under which a given driving automation system or feature thereof is specifically designed to function, including, but not limited to, environmental, geographical, and time-of-day restrictions, and/or the requisite presence or absence of certain traffic or roadway characteristics."

Figur 23 Definition av Operational Design Domain enligt SAE J3016 (2021)

Inom Volvo finns olika nivåer på ODD definierade och spänner från robotcell till olika nivåer av inhägnade områden. Säkerheten är alltid av högsta prioritet och i detta projekt har prototypsystemet enbart fått användas då förutsättningar för definitionen av robotcell varit uppfyllda. Undantaget har varit när en säkerhetsförare befunnit sig i maskinen då användning i delvis inhägnat område varit tillåten. Till detta har maskinerna i prototypsystemet även begränsats till att enbart kunna framföras i en maxhastighet om 10km/h samt utrustats med ljus som är aktiva när maskinen fjärrstyrs. Rutiner och kunskap om maskinerna och deras funktionalitet är därför kritiskt även för människor som kan tänkas komma i kontakt med prototypsystemet.

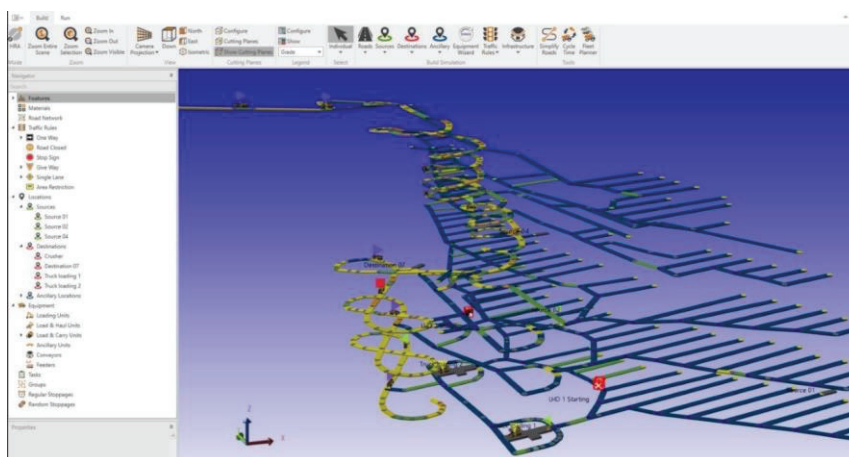
6.5 Processmodellering fjärrstyrda och autonoma maskiner

En av frågeställningarna inom projektet har varit hur Industri 4.0 kan tillämpas på gruvdriftsprocessen och vilka delar som är lämpade för automation med hänsyn taget till produktivitet och säkerhet. Även huruvida en process för mobila maskiner kan modelleras och simuleras skulle undersökas. Här nedan resovisas för de delar i arbetspaketet som riktade sig mot dessa frågeställningar och den produktivetsanalys som utförts med utgångspunkt i hur processen ser ut i Kankbergsgruvan idag.

6.5.1 Produktivitet vid konventionellt driven gruva jämfört med automatiserad

För att utföra en produktivetsanalys i detta projekt krävs en fördjupning i kontext och antaganden. Dessa är formulerade genom ingående studier i hur gruvprocessen i Kankberg ser ut idag och förutsättningen att man får ta ut obegränsat med malm. Frågeställningen blir då hur mycket mer per dygn som kan produceras med fullständig automation.

De simuleringar som initialt gjordes i projektet visar på en redan väl inarbetad gruvprocess där få eller inga förbättringar är uppenbara med den maskinpark och nivå av digitalisering som just nu föreligger i Kankbergsgruvan, Figur 24. Detta tillsammans med ingångshypotesen i projektet om vilka delar av salvcykeln som är relevanta för teleoperation och automation, ligger till grund för den utförda produktivetsanalysen.



Figur 24 Initiala simuleringar av Kankbergsgruvan visar en väl inarbetad gruvbrytningsprocess

Faktorer som kommer tas i beaktning i analysen är följande:

- Tillgänglig arbetstid
- Systemtillgänglighet (planerat underhåll och felande enheter)
- Maskinproduktivitet

Tillgänglig arbetstid

Idag i manuell drift och personal under jord ger ställtid i skiftbyten, raster och stillastående tid på grund av ventilering efter sprängning en effektiv arbetstid på ca 12,5h.

I en automatiserad gruva blir motsvarande siffra ca 20h baserat på effektivare skiftbyten och möjlighet att arbeta även de normalt sett obemannade timmarna mellan midnatt och 06:00.

Detta innebär en 60-procentig ökning i effektiv arbetstid och en total tillgänglig arbetstid på ca 7000h ($20 \times 365 = 7300$ h, tid för sprängning ca 300h borträknad).

Systemtillgänglighet - planerat underhåll och felande enheter

Utan korrekt diagnostik av fjärrstyrda och automatiserade enheter kan slitage på exempelvis maskiner gå längre utan åtgärd än vid manuell körning - regelbunden tillsyn kommer därför vara viktig, även för

rengöring av sensorer och annan systemkritisk utrustning. Vid ett haveri under körning förutsätts att hela systemet pausas (robotcellen bryts) för att hantera avvikelser.

Hypotesen är i detta räkneexempel att ett system består av 20 enheter inklusive accesspunkter, kringutrustning, maskiner, lastbilar osv. Regelbunden tillsyn och förebyggande service poneras till 20h/år/maskin à 10 maskiner vilket ger 1h varannan dag/år. Detta inklusive transport av maskinen upp och ner ur gruvan eller till verkstad under jord (totalt två timmar transport) ger 450 timmar i serviceåtgärder och underhåll $((1h+2h) \times 150 = 450h)$.

Till detta kommer frekvensen av fel på någon av enheterna i systemet och beräkningen bygger på att varje fel kommer stänga ner systemet ca 2h (hypotesen är att den felande enheten byts ut och under denna tid stängs systemet ner till 100%, transporttid 2 timmar enligt föregående stycke). Antalet fel beräknas utifrån hypotesen om ett moget system där varje enhet i genomsnitt har 2 fel per år vilket ger en nedstängning av systemet på grund av fel 80 timmar av totalt 7000 möjliga effektiva timmar $(2h \times 2fel \times 20enheter = 80h)$.

Förebyggande service (450h) samt felande enheter (80h) ger en total systemtillgänglighet avrundat till ca 90% $(450+80)/7000=0.076)$.

Maskinproduktivitet vid teleoperation och automation

Tidigare tester har gett att ett relativt omoget fjärrstyrningssystem jämfört med manuell drift når en produktivitet på 80%. Med den utvecklingspotential som finns bedöms produktiviteten i ett moget automatiserat och fjärrstyrt system till 90% jämfört med dagens manuella maskindrift.

Slutlig jämförelse

Med en systemtillgänglighet respektive maskinproduktivitet på 90% beräknas den slutgiltiga effektiva tillgängliga tiden i en automatiserad gruva till 16.2 timmar per dygn $(20h \times 0,9 \times 0,9 = 16,2)$.

Detta jämfört med 12,5 timmar per dygn i manuell drift ger en ökad produktionsförmåga med 30% $(16,2/12,5=1,296)$.

Fler aspekter finns att ta in i beräkningen men utifrån detta exempel är potentialen i den nya tekniken stor och incitamenten för att fortsätta i denna riktning tydliga.

6.5.2 Process för fjärrstyrt system i gruva samt vilka delar som bör automatiseras

Efter flera tester med fjärrstyrd vattendumper och ett mindre antal tester med fjärrstyrd hjullastare i skarp produktion kan följande resultat redovisas:

- 1-2 sprängsalvor kan vattnas fullgott med tillgång till fjärrstyrd vattenpåfyllningsstation.
- Initialt liten eller ingen tid för städning eller lastning på grund av väntetider som krävs för att få fullgod sikt efter sprängning (rök som färdas i gångarna enligt redogörelse i kapitel 6.3.1).
- Med stöd för navigering i dålig sikt och/eller delautomatiserade moment för transport där sikten är dålig och där långa sträckor av backning krävs, kan effektiviteten öka men har ej testats i skarp produktion inom ramen för projektet.
- Beroende på antal salvor att vattna kan även utlastning och städning ske när normalt sett ingen aktivitet i gruvan pågår.

Slutsatsen är att denna del i processen, Figur 25, är värdeskapande då man kan utföra arbete när gruvan annars är stillastående. Att fjärrstyra och delautomatisera den första delen i salvcykeln har visat sig högst genomförbar och extrapolerar vi resultaten till övriga processteg bekräftas analysen av en potentiell produktivitetsoökning på 30%.



Figur 25 Vattning, lastning, skrotning samt transport av material är relevanta processteg för automatisering

Dock bedömer projektet att potentialen i de sista processtegen är något lägre om spränggaser och damm redan är utventilerade när betongsprutningen påbörjas och personal återigen kan befinna sig under jord. Rekommendationen är att fokusera på de första stegen i salvcykeln primärt, för att sedan fortsätta till resterande del av processen för att då också kunna reducera ventilationskostnader ytterligare.

I analysen har ej möjligheter för brytning i nya områden, minskat krav på ventilation eller vinster i förbättrad arbetsmiljö räknats in. De tester som gjorts visar dock på positiva resultat gällande arbetsmiljö för operatören.

6.6 Regelpåverkan av ny teknik

Parallellt med detta projekt medverkar Boliden i ett EU-finansierat projekt (Nextgen Sims) som har ett specifikt arbetspaket som behandlar frågan kring regelpåverkan. Det vill säga, de förändringar som införandet av fjärrstyrda och autonoma maskiner kommer att påverka branschen. En utmanande punkt är att hantera mixen av autonoma/fjärrstyrda maskiner från olika leverantörer. För närvarande är leverantörerna generellt inriktade på att "lösa sin egen säkerhet". Men som slutkund kommer gruvindustrin med stor sannolikhet behöva hantera lösningar från flertalet olika leverantörer.

I projektet Remote Timber som Volvo CE tidigare medverkat i gjordes en genomgång av tillämpliga lagar och regelverk som är relevanta inom Sverige och Europa oavsett maskintillverkare. Detta för att skapa en bild av vilka regelverk som är applicerbara för det specifika konceptet och vilka överväganden som behöver göras vid en implementation av ett sådant koncept. Några exempel på regelverk som kan vara tillämpliga för applikationen i Remote Timber (fjärrstyrd virkeshantering) beskrevs då översiktligt och denna översikt kan anses vara relevant för teleoperation generellt och tas därför med som utgångspunkt för regelverk i denna rapport.

6.6.1 Utdrag ur rapporten för Remote Timber

Konventionen om vägtrafik

En frågeställning i projektet har varit vem som är att anse som förare och vad det får för konsekvenser för processen. I Konventionen om vägtrafik framgår det att det skall finnas en förare och att denne ska ha kontroll. Det finns ingenting som säger att föraren måste befinna sig i fordonet. Avseende Remote Timber är virkeslastaren fjärrstyrd och ansvarig operatör får anses vara förare.

Arbetsmiljölagen: Det finns flera paragrafer i lagen som är tillämpliga på konceptet i Remote Timber. I kapitel 2, 5 § ställs krav på maskinens utformning: "Maskiner, redskap och andra tekniska anordningar skall vara så beskaffade och placerade och brukas på sådant sätt, att betryggande säkerhet ges mot ohälsa och olycksfall."

Maskindirektivet

anger vilka grundläggande hälso- och säkerhetskrav som gäller för alla maskiner som släpps ut på marknaden inom EU. Maskindirektivets krav implementeras i svensk lagstiftning genom arbetsmiljöverkets föreskrift Arbetsmiljöverkets föreskrift; Maskiner AFS 2008:3. Direktivet tar upp fjärrstyrning av maskiner på flera ställen. För att en maskin ska få använda CE-märkningen ska ett flertal krav uppfyllas. Av speciellt stor relevans för Remote Timber konceptets fjärrstyrda virkeslastare är:

- Säkerhetsanvisningar för alla typer av arbete produkten kan komma i kontakt med.
- Eventuell beskrivning av på vilket sätt som maskinen inte får användas.

Ovanstående punkter kommer troligtvis att skilja sig från de anvisningar och beskrivningar som gäller för virkeslastare som körs från hytten. Sådana anvisningar och beskrivningar bör grundas i en riskanalys av systemet.

Kamerabevakningslagen är till för att säkerställa balansen mellan intresset av att använda kameraövervakning för berättigade ändamål och intresset av att skydda enskildas integritet. För användning av kameror monterade på fordon gäller undantag för krav på tillstånd enligt 9 § om "bevakning som sker för säkerheten i trafiken eller arbetsmiljön från ett fordon, en maskin eller liknande för att förbättra sikten för föraren eller användaren".

6.6.2 Reflektioner kring redogjorda regelverk samt potentiella tillägg för underjordsapplikation

Konventionen om vägtrafik: Slutsatsen som drogs inom ramen för Remote Timber, gällande vem som är ansvarig förare, anses vara relevant även för underjordsapplikation så väl som för alla fjärrstyrningsapplikationer, dvs fjärroperatören kan anses vara ansvarig förare.

Arbetsmiljölagen: Här finns ytterligare paragrafer kring underjordsarbete än de som togs upp inom ramen för Remote Timber. Följande skrivs specifikt om fjärrstyrning i Berg och gruvarbete AFS 2010:1:
§11 Styrssystem för fjärrstyrda och automatiska utrustningar ska hanteras och underhållas så att funktionerna som avser personsäkerhet upprätthålls.

Även innebörden av följande paragraf påverkas:

§20 Operatörer av maskiner och fordon som används i berg- och gruvarbete ska vara utbildade för uppgiften att använda maskinerna och fordonen i dessa miljöer. Utbildningen ska vara dokumenterad.

Maskindirektivet: Utifrån slutsatsen kring säkerhetsanvisningar och instruktioner i Remote Timber i kombination med paragraf 20 i arbetsmiljölagen för Berg och gruvarbete ovan, ser man att detta i allra högsta grad är applicerbart även för underjordsdrift, dvs. att instruktioner och beskrivningar kommer att skilja sig från en maskin som enbart kan framföras manuellt och lokalt av en förare.

Med utgångspunkt i testerna som gjorts under projektets gång kan man peka på bland andra följande aspekter som bör finnas med i denna typ av instruktioner och utbildning av operatörer för att säkerställa personsäkerhet i närheten av fjärrstyrda och/eller delautomatiserade maskiner:

- Tydlighet i vilket tillstånd en potentiellt fjärrstyrd maskin befinner sig i
- Instruktioner för hur en fjärrstyrd och/eller delautonom maskin kan tas över för manuell drift
- Instruktioner för hur en fjärrstyrd och/eller delautonom maskin skall hanteras vid eventuell brand
- En kombination av rutiner och systemfunktionalitet som säkerställer att maskinen aldrig av misstag kan hamna i ett osäkert läge på grund av oaksamhet eller misstag i fjärrstationen och/eller på maskinen

6.7 Kartläggning/identifiering av nya arbetssätt och områden

En omställning till storskalig implementation av fjärrstyrda maskiner i gruvindustrin kommer påverka branschens arbetsförhållanden ur flera aspekter. Omställningen kommer ganska fundamentalt omforma begreppet gruvarbetare, som traditionellt identifierats som ett tungt och fysiskt arbete som är riskutsatt pga arbete under jord. För närvarande är ersättningsmodellen till gruvarbetare baserad på olika tillägg, tex. underjordstillägg. Dessa faktorer kommer således förändras vid fjärrstyrning.

Olika fackföreningar har/kan ha olika ingångar att diskutera ämnet. Förhandlingar kommer behövas under resan mot storskaling implementation av fjärrstyrning av maskiner.

En annan faktor är att fjärrstyrda maskiner kommer påverka produktionsplanering och schemaläggning av arbete i gruvor. För närvarande är sprängning en styrande aktivitet, som starkt påverkar övrig aktivitet. Vid storskalig implementation av fjärrstyrning förändras detta.

6.8 Leveranser från arbetspaketen i korthet

Arbetspaket	Beskrivning av innehåll och resultat	Ansvarig
Projektledning	Projektledning teknik & kommunikation mellan projektets parter. - Under hela projektet har det varit en kontinuerlig uppföljning i veckomöten, samt styrgruppsmöten 2ggr per år. - Projektet har drivits delat mellan Örebro Universitet som tog över det initiala projektet från Volvo CE när pandemin bröt ut. Denna del av projektet, TAMMP WP3, har drivits från Volvo CE. - En begäran om ändring av slutdatum har gjorts för att synkronisera de båda projekteten, TAMMP, TAMMP WP3 - Rapportering och framdrift har i övrigt fungerat enligt plan.	Volvo CE
Industri 4.0 process för mobila maskiner, tillämpning gruva	Ingångshypotesen att fjärrstyra och automatisera de första processtegen i salvcykeln har bekräftats via tester i skarp produktion. Att fjärrstyra och delautomatisera dessa delar har visat sig högst genomförbar och extrapolerar vi resultaten till övriga processteg bekräftas resultatet av den produktivitetsanalys som gjorts, dvs en produktivitetsökning på 30% kan vara möjlig. Detta utan att alla aspekter så som minskat krav på ventilation, brytning i nya (nu otillgängliga områden) samt förbättrad arbetsmiljö vägts in i analysen.	Volvo CE
Automation platform interface & motion control continuation	Styrning av maskinen från flera olika källor och skiftet mellan dessa uppnåddes inom ramen för projektet. Maskinstyrning och tillståndsskiftet i teleoperationsplattformen tillsammans med resultaten från WP5-7 möjliggjorde ett delautomatiserat system. Den Volvo-interna utvecklingen av de kritiska moduler i automationsplattformen som hanterar säkerhetsfunktioner och de olika maskintillstånden har fortsatt för att förbereda för en industrialiserad lösning men kunde ej helt och fullt implementeras i plattformen under projektets gång, detta var dock inget som hindrade projektet från att nå sina mål.	Volvo CE
Automation platform interface & motion control continuation p. 2	I slutfasen av projektet demonstrerades tillståndsskiftet mellan fjärrstyrning och autonom drift med begränsningen i att maskinen i fullt autonomt tillstånd av säkerhetsskäl var tvungen att vara uppkopplad mot fjärrstyrningsriggen för övertagande vid eventuella avvikelser.	Volvo CE
Remote Control Platform Phase 2	En fjärrstyrningsplattform med ett gränssnitt för att kunna styra flera maskiner från samma kontrollstation och enkelt skifta mellan dessa utvecklades och levererades till gruvan i enlighet med målen i milsten 1.	Volvo CE
Representation av sensordata - lokal kartering	I projektet har 3D lidar och 2D radar använts. Radar har använts i tester med rök. 3D lidar och 2D radar data har insamlats i Boliden. Tester är gjorda på VCE's testbana där lokal kartering har använts för att köra en A30 dumper autonomt.	Örebro Universitet
Behandling av sensordata för ruttoptimering	Systemet kan följa en förinspelad rutt gjord i teleoperationsläge eller via en förare i hytten. För att utjämna körvägen så används filtreringsmetoder baserade på Beizer splines. I projektet har även ruttplaneringsmetoder som baseras på banplanerare utan dynamisk information använts tillsammans med MPC regulatoren i nästa arbetspaket för att generera och köra rutter som extraheras direkt från en gruvkarta vilket har testat i simulering.	Örebro Universitet

Lokalisering och följning av förutbestämd körväg	I projektet har regulatorer baserad på modellbaserad reglering tagits fram (Model Predictive Control – MPC). Dynamiska modeller av artikulerade fordon såsom en dumper har använts för att beräkna optimal styrning. Örebro har även tagit fram lågnivå regulatorer för att hantera hydraulisk styrning samt styra gaspådrag och bromsverkan.	Örebro Universitet
Väg och IT- infrastruktur	Under projektet har ett UWB (ultra wide band) positioneringssystem installerats i en del av Kankbergsgruvan. Via detta system kan man följa "taggar" (elektronisk dosa i storlek som tändsticksask) på en kart-vy i ett webinterface. Positioneringen uppfyller väntad precision, dvs det går att följa taggar på sub-meter nivå inom testområdet.	Boliden
Servicemätningar	Under stora delar av projektet har kontinuerliga mätningar gjorts av det wifi-nät som varit bas för fjärrstyrningssystemet. Boliden har utvecklat dedikerad utrustning för att parallellt med Volvo-maskinerna mäta nätets kvalitet. Denna utrustning används nu regelbundet för att mäta upp nya sträckor i gruvan där framtida körningar planeras för Volvo-maskinerna.	Boliden
Tele-op	Voysys har vidareutvecklat sin 3D-motor för teleop på flera sätt för att bättre lämpa sig för gruvidrift. Det har varit flera olika områden som har utvecklats för att öka möjligheterna för teleop i gruva så som enklare konfiguration av systemet, nätverksreglering, minskning av bandbredd, UX för både operatören och uppsättning av system, och visuella hjälpmedel för operatören.	Voysys

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Har spridit resultat kring UX på gruvkonferens
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Direkt spridning genom projektpartners till Vinnova projektet (2021-04714) Radarize. Lärdomar och kunskapsgap vidare till FFI ansökan (023-02602) AMICI.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Vidareutveckling av konceptet pågår inom Volvokoncernen.
Introduceras på marknaden	X	Mognad för möjlig introduktion pågår.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

Projektet adresserar inte bara problem för ett väldigt snävt område och därmed en begränsad marknad, utan är tillämpligt även i ett brett perspektiv:

- De enhetsoperationer som adresseras är identiska med de som används i allmän tunneldrivning så som tunnelbanor, vägtunnlar, service- och vattentunnlar.
- Positioneringsproblemet är i princip det klassiska inomhuspositioneringsproblemet som existerar överallt där GNSS inte finns tillgängligt; industribyggnader, underjordsgarage, "urban canyons" mm.

- Säkerhetsproblemet kring fjärrstyrda maskiner är till stora delar bara ett delproblem av det som kommer att finnas på allmänna vägar. Resultatet av projektet kommer att vara användbart för andra maskiner och tillämpningar.

7.2 Publikationer

- Liao, Q. , Sun, D. , Zhang, S. , Loutfi, A. & Andreasson, H. (2023). [Fuzzy Cluster-based Group-wise Point Set Registration with Quality Assessment. IEEE Transactions on Image Processing, 32, 550-564.](#)
- Adolfsson, D. , Magnusson, M. , Alhashimi, A. , Lilienthal, A. & Andreasson, H. (2023). [Lidar-Level Localization With Radar? The CFAR Approach to Accurate, Fast, and Robust Large-Scale Radar Odometry in Diverse Environments. IEEE Transactions on robotics, 39 \(2\), 1476-1495.](#)
- Adolfsson, D. , Karlsson, M. , Kubelka, V. , Magnusson, M. & Andreasson, H. (2023). [TBV Radar SLAM - Trust but Verify Loop Candidates. IEEE Robotics and Automation Letters, 8 \(6\), 3613-3620.](#)
- Adolfsson, D. , Castellano-Quero, M. , Magnusson, M. , Lilienthal, A. J. & Andreasson, H. (2022). [CorAI: Introspection for robust radar and lidar perception in diverse environments using differential entropy. Robotics and Autonomous Systems, 155.](#)
- Liao, Q. , Sun, D. & Andreasson, H. (2022). [FuzzyPSReg: Strategies of Fuzzy Cluster-based Point Set Registration. IEEE Transactions on robotics, 38 \(4\), 2632-2651.](#)
- Johannesson, C. (2022). [Low Latency Bandwidth Control Algorithms for Unreliable Networks \(Dissertation\).](#)

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Att fjärrstyra utrustning i gruvor medför unika utmaningar jämfört med överjordsdrift. Bland dessa utmaningar finns behovet av anpassade kameraplaceringar och användargränssnitt, som måste specialutvärderas för de uppgifter som ska utföras under jord. Nätverkskraven är särskilt strikta vid underjordsoperationer, där uppkopplingen kan vara osäker, och en förlorad anslutning kan leda till betydande driftstörningar. Därför är olika verktyg, såsom Forward Error Correction (FEC) och bandbreddsreglering, viktiga för att kunna hantera snabba ändringar i nätverkskvaliteten. Det har visat sig vara mycket viktigt att testa verktygen på riktiga nätverk, eftersom det är svårt att simulera dessa förhållanden.

Med hjälp av den demonstrator som levererades till Kankberg enligt milsten 1 i projektet kunde analysen av vilka processteg i salvcykeln som bör automatiseras bekräftas men även utmaningarna när det kommer till navigation och hjälpmedel som behövs för att kunna arbeta effektivt och säkert. Med hjälp av testerna har också värdefull kunskap byggts kring underjordsapplikation både gällande gränssnittet människa-maskin men även systemets robusthet och kapabilitet när systemet står otillförlitligt för både förberedelse och tillsyn. Dessa lärdomar är av stor vikt när utvecklingen nu fortsätter mot industrialisering.

Det finns dock områden där fortsatt forskning är nödvändig. Ett sådant område är till exempel djupare kunskap om navigation i miljöer med dålig sikt. Under projektets gång startade därför ett separat forskningsprojekt på detta område. Projektet som heter RADARIZE ämnar undersöka hur radarsensorer kan appliceras i miljöer med dålig sikt för att användas både för lokalisering och navigering men även för att detektera människor och objekt under dessa omständigheter.

Ett annat område där resultaten från TAMMP bara ger en fingervisning är att djupare förstå hur människan i ska fungera och agera i ett cyberfysiskt system likt det inom ramen för detta projekt. I TAMMP applicerades konceptet "robotcell" för att värna säkerheten i testerna men när denna teknik appliceras bredare kommer komplexiteten öka och kraven på kommunikation och interaktion med den. Här finns möjlighet till vidare forskning och en ansökan till ett nytt FFI-projekt, AMICI, är inlämnad för att fortsätta bygga kunskap och förbereda för en bredare applikation av tekniken som utforskats i TAMMP.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

	Andreas Hjertröm	Ansvarig för myndighetskontakt och projektledning
	Peter Burman	Program Manager Mine Automation
	Tomas Löfgren	Projektledare
	Henrik Andreasson	Expert autonoma sensorsystem