

OREEL – Ore Enrichment Enabled by E- Logistics systems

Slutrapport



Författare:

Nikita Zaiko, Johanna Odbratt, Daniel Moback, Dennis Forslund, Niklas Lindblom, Bobbie Frank, Per Bengtsson, Lena Larsson, Emil Pettersson, Klara Eliasson, Per Hasselberg.

Datum: 2025-09-30

Projekt inom FFI Accelerera



Fordonstrategisk
Forskning och
Innovation

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English	4
3 Nomenklatur	5
4 Bakgrund	5
5 Syfte, forskningsfrågor och metod	8
5.1 Syfte	8
5.2 Forskningsansats	8
5.3 Metod	9
6 Mål	9
7 Resultat och måluppfyllelse.....	10
7.1 Systembeskrivning.....	10
7.2 Omvärldsbevakning	18
7.3 Innovationsledning och koordinering	19
7.4 Analys av gruvor och fasta anläggningar.....	20
7.5 Analys av vägtransporterna samt demonstrationsbehov	25
7.6 Planering av systemdemonstrationen och förberedelser.....	32
7.7 Avslutande kommentarer	36
8 Spridning och publicering.....	37
8.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	37
8.2 Publikationer	38
9 Slutsatser och fortsatt forskning.....	38
10 Deltagande parter och kontaktpersoner	39
11 Referenser	39

Kort om FFI

FFI, Fordonsstrategisk forskning och innovation, är ett samarbetsprogram mellan staten och fordonsindustrin som sedan 2009 finansierar forskning och innovation inom vägtransporter.

Läs mer på www.ffisweden.se

1 Sammanfattning

Ett konsortium bestående av representanter från behovsägaren Boliden Mineral, fordons- och maskinleverantören Volvo Group i form av Volvo Construction Equipment, Volvo Technology och Volvo Trucks samt forskningsorganisationen Lindholmen Science Park har tillsammans genomfört ett förberedelseprojekt OREEL (Ore Enrichment Enabled by E-Logistics systems) med målet att förbereda för en systemdemonstrator av elektriska transportlösningar inom gruvdrift. Projektdeltagarna har undersökt och beskrivit det aktuella systemet som har föreslagits att bli föremål för tester av de innovativa tekniska lösningarna. Det aktuella systemet sträcker sig från gruvbrytning till förädling av färdiga metaller och skapar därmed goda förutsättningar för tester av innovativa lösningar för gruvindustrin inom dess olika huvudsakliga processer i form av gruvbrytning, anrikning, smältning och transport på allmän väg.

Ett antal särskilt lämpliga fall för implementering av elektrifierade lösningar har identifierats i de olika delsystemen med hjälp av siteobservationer, simuleringar, beräkningar och analyser. Inga större hinder för elektrifiering har identifierats i någon av subsystemen. Ett behov av djupare analys kopplat till prioritering och angreppssätt för elektrifiering av de svårare fallen har identifierats och föreslås ske i det kommande huvudprojektet. Svårigheten för elektrifieringen inom gruvdrift föreligger ofta i kombinationen av hårda driftcykler och behov av hög nyttolast för att kunna upprätthålla produktionstakten. Konsortiet har identifierat ett antal tekniska lösningar som ska bli föremål för tester inom ramen för systemdemonstrationen. Några av lösningarna som utpekats för att vara särskilt lämpliga för tester är arbetsmaskiner och -fordon i form av: batterielektriska hjullastare, batterielektriska tunga lastbilar för malmtransporter på allmän väg, batterielektriska lastbilar för malmtransporter under jord samt ett flertal lösningar för effekt- och energiförsörjning av dessa. Lösningar ska implementeras och testas i samtliga subsystemen i tät kontakt med behovsägare i form av kravställare och användare för att säkerställa förutsättningar för att kunna angripa systemutmaningar utifrån de olika perspektiven som beteende & kultur, policy & regelverk, fysisk och digital infrastruktur, affärsmodeller och själva tekniken.

Implementering av utsläppsfria lösningar inom gruvnäringen och underjordsgruvor i synnerhet förväntas bidra till en bättre arbetsmiljö för de anställda, minimera de nödvändiga produktionsstoppen som behöver ske vid överskridna utsläppsnivåer under jord samt minskade rörliga kostnader för drift av ventilationssystem. Erfarenheterna från ett antal underjordsgruvor med betydande insatser kopplat till elektrifiering bekräftar dessa förväntningar. Tre underjordsgruvor i världen har identifierats med ambitionen om att bli helt elektrifierade inom medellångt perspektiv. Elektrifieringsgraden skiljer sig markant mellan de olika typer av produkter som erbjuds för gruvnäringens ändamål på marknaden. Inom den nationella och internationella gruvnäringen pågår diskussioner om hur massproducerade produkter av mindre kapacitet skulle kunna ersätta större specialiserade maskiner. Elektrifieringen av arbetsmaskiner i den storleksklassen som efterfrågas inom det aktuella systemet har hittills varit blygsam. Därmed finns potential i att testa de lösningarna tidigt tillsammans med behovsägarna för att säkerställa en ledande position bland svenska maskin- och fordonsleverantörer i denna utveckling. Avseende batterielektriska lastbilar av den efterfrågade kapaciteten är Sverige ledande inom utvecklingen. Anpassning av befintliga lösningar för gruvnäringens ändamål förväntas bidra till fortsatt utveckling av batterielektriska lösningar.

Projektkonsortiet har utvidgats till att omfatta fler behovsägare i form av kravställare samt användare av de lösningar som ska bli föremål för tester. I tillägg har aktörer inom offentliga sektorn, energisektorn, akademien, och flera led i fordonsleverantörkedjan

attraherats till ett huvudprojekt. Konsortiet kommer att ansöka om ett systemdemonstrationsprojekt inom ramen för FFI Accelerera hösten 2025. Resultaten från testerna i det aktuella systemet kommer att översättas till generella slutsatser om elektrifiering inom gruvnäringen med relevans för nationella och internationella bolag som verkar inom branschen.

2 Executive summary in English

The preparatory project OREEL (Ore Enrichment Enabled by E-Logistics systems) co-funded by FFI was conducted to evaluate prerequisites for a system demonstration revolving around electrified vehicles and charging solutions for the mining industry. A consortium consisting of original equipment manufacturers Volvo Construction Equipment, Volvo Technology, Volvo Trucks, the mining company Boliden and the research organization Lindholmen Science Park has conducted the preparatory project. This report presents the established findings. The background for the preparatory project is the environmental goals of Boliden in the various scopes and the negative externalities from using internal combustion engines in the mining sector, especially in the underground mines. Replacement of ICE-technology to battery electric solutions are expected to improve the working environment of mining workers, eliminating the need to halt production due to exceeding particle emissions levels and reducing the energy costs associated with operating the ventilation systems underground.

The main goal of establishing a basis for a system demonstration project has been met. Project participants have jointly studied Boliden's production and logistics system spanning from mining to finished metals consisting of underground mines, an enrichment plant and a smelter, connected by a system of ore trucks operating on a system of public roads between the sites. By observing, analyzing and simulating the system, the consortium has established that there are good prerequisites to introduce electrified vehicle and charging solutions in the various subsystems with varying degree of difficulty depending on the use case. Further analysis is required to establish prioritization and approach for the implementation of the solutions in the most difficult cases. This is proposed to be done in the system demonstration project as a part of the future scale up plan and description of further innovation needs.

The consortium has been expanded to include stakeholders using and setting requirements on the solutions to be tested in the system demonstration, academia, local and national authorities and vehicle component suppliers. Demonstration in all of the production subsystems will be performed including battery electric trucks for ore transportation, wheel loaders and charging equipment. A project description together with a time plan has been prepared and will be applied for, to FFI Accelerera in the fall of 2025. The main project will deliver a plan for scaling electrified solutions in the system where these will be demonstrated considering the various system challenges such as technology, infrastructure, behaviors, policy and business implications. Results from the system demonstration will provide general conclusions regarding electrification to be disseminated to the rest of the mining industry.

3 Nomenklatur

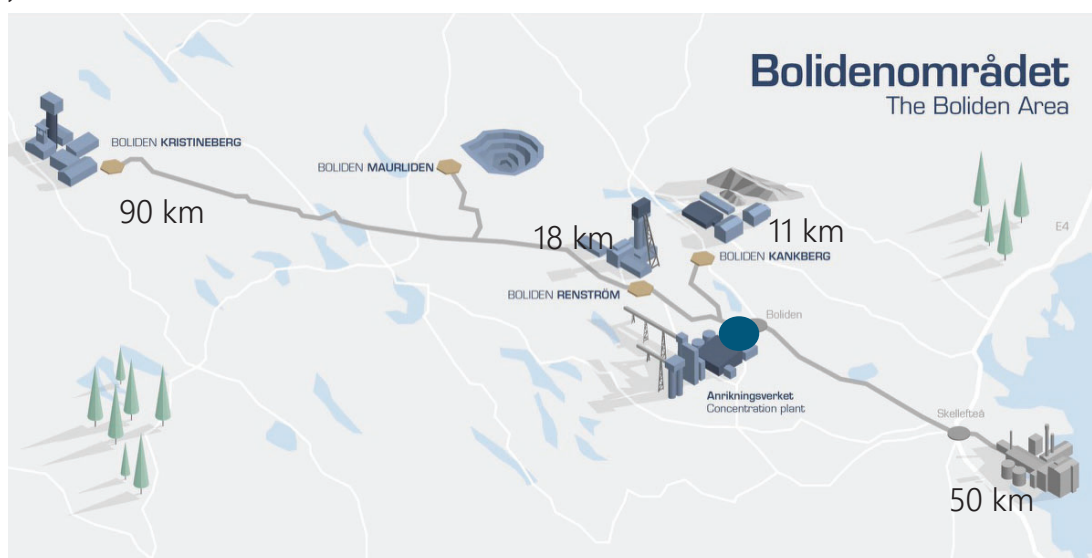
Tabell 1. Nomenklatur som används inom slutrapporten och ansökan för systemdemonstrationsprojektet.

Begrepp	Definition
Bergbil	Tunga lastbilar för anläggningstransporter som har blivit modifierade för gruvnäringens ändamål. Dessa körs främst inne i gruvorna för att frakta sprängt berg mellan sprängningsplatsen och krossen (se nedan) alt. från sprängningsplatsen upp till ytan.
Flotation	Process inom anrikning för framtagande av metaller ur malm genom att blanda malm med reagenser som får de rena metaller att flyta upp på ytan.
Hydrofil	En typ av återfyllnad i bergum. Metoden kräver mer dränering för att brinna ihop än andra återfyllnadsmetoder.
Krossen	Anordning för att krossa malm i form av berg till mindre delar innan vidare transport. Krossen kan ske antingen i den underjordsgruvan eller uppe på ytan.
Malmbil	Tung anläggningslastbil som används för transport av malm från gruva till anrikningsverk samt för returtransporter av exempelvis återfyllnadsmaterial.
Skip	En hiss som används för lyft av malm från underjordsgruva upp till ytan.
Slagg	Restprodukt från de metallurgiska processerna i smältverk. Hanteras som malm igenom anrikningsverken för vidare utvinning
Slig	Slutprodukt i anrikningsprocessen i form av malmkoncentrat som transporteras vidare till smältverk för framtagande av rena metaller.
Bergtruck	Midjestyrd robust lastbärare utvecklad för underjordstransport.

4 Bakgrund

Gruvindustrin är en av Sveriges basindustrier. Landet är en av de största gruvnationerna inom EU med betydande produktion av metaller och mineraler som järn, bly, zink och koppar. Sverige producerar 89% av allt järn i EU, 46% av bly, 45% av zink och 10% av all koppar. EU:s andel av världsproduktionen på de nämnda metallerna ligger på mellan 1 och 4,5%. År 2024 uppgick de svenska gruvornas sammanlagda omsättning (exklusive smältverk) till 57 miljarder kronor [1]. Utvinningen av metaller kräver ett komplext produktions- och logistiksystem som omfattar interna transporter inom gruvor och anrikningsverk, samt transporter mellan dessa och andra logistiknoder i produktionskedjan. År 2024 stod malmtransporter för 30% av den totala godsvikten som transporteras på svenska vägar med svenskregistrerade lastbilar [2]. Utöver malm omfattar gruvlogistiken även andra typer av gods och transporter, både in- och utgående, som sker på väg. Flera av lastbilsapplikationerna inom gruvtransporter är särskilt krävande, med hög energiförbrukning, intensiva driftcykler samt utmanande och varierande väderförhållanden. Ett av gruvföretagen i Sverige är Boliden Mineral AB. Boliden bryter och förädlar både ädel- och basmetaller. Deras huvudmetaller är zink, koppar, bly, nickel, guld och silver. Utöver Sverige bedriver Boliden Mineral AB gruvverksamhet i Norge, Finland, Portugal och på Irland. Boliden arbetar starkt för en

hållbar metallproduktion och har satt upp ett antal ambitiösa miljömål. Bland dessa finns en målsättning att minska de absoluta växthusgasutsläppen med 42% mellan 2021–2030, vilket omfattar den egna verksamheten samt inköp av el, ånga och värme samt en minskning med 30% av CO₂ utsläpp från alla andra indirekta källor som uppstår i deras värdekedja, exempelvis affärsresor, medarbetares arbetspendling, externt avfall, inköpta tjänster och varor, bearbetning och avfallshantering av sålda produkter [3]. På längre sikt vill Boliden uppnå nettonollutsläpp av CO₂ senast år 2050. Företaget har även satt produktrelaterade klimatmål, däribland att minska utsläppen till mindre än 1,5 kg CO₂ per kg kopparkoppar till år 2030, samt till mindre än 1 kg CO₂ per kg mässing. Elektrifiering förväntas bli en av de viktigaste metoderna för att uppnå produktionsrelaterade mål, särskilt när det gäller gruvutrustning och tunga lastbilar. Verksamheten i Bolidenområdet innefattar vägtransporter mellan ett flertal underjordsgruvor och centrala anläggningar. Transportsystemet hanterar volymer av malm, anriktningsprodukter (slig), restprodukter som slagg samt återfyllnadsmaterial, där avstånden varierar från 5 till 90 km enkel väg (se Figur 1). Transporterna utgår från de producerande gruvorna, där malm transporteras från Kristineberg/Rävliden (ca 600 kton/år), Renström (ca 500 kton/år) och Kankberg (ca 500 kton/år) till anriktningsverket i Boliden. Efter anriktningsprocessen transporteras den förädlade produkten (slig) vidare från Boliden till smältverket vid Rönnskär (ca 250–300 kton/år). I motsatt riktning transporteras slagg från Rönnskär till Boliden och återfyllnadsmaterialet hydrofyll från anriktningsverket till gruvorna i Kristineberg och Renström. Alla vägtransporter är upphandlade och utförs av externa entreprenörer. För att kunna hantera driftstörningar och produktionsvariationer omfattar avtalet för malmtransport 14 ordinarie fordonsekipage och tre extra dragbilar. Vid produktionstoppar kan upp till 22 lastbilar vara i drift samtidigt. Fordonen som används är lastbilsekipage med en bruttovikt på 74 ton, vilket förutsätter BK4.



Figur 1. Schematisk bild över det aktuella logistiksystemet med angivet avstånd från anriktningsverket

Logistiksystemet i Bolidenområdet står inför kommande förändringar med volymökningar som följd. Ett planerat projekt vid namn "Avvattningsprojektet" kommer att resultera i nya flöden av sand från Boliden till gruvorna i Kankberg, Renström och Maurliden. Samtidigt kommer transporterna av hydrofyll att minska i viss utsträckning.

Utöver vägtransporterna av malm, slig och slagg används ett stort antal arbetsmaskiner för att hantera material i de olika produktionsstegen samt för att utgöra stöd i de olika servicearbeten som pågår vid de olika anläggningarna. Totalt finns ca. 180

arbetsmaskiner och fordon vid gruvorna Kristineberg, Renström, Kankberg samt anrikningsverket och Rönnskär, där merparten av dessa körs i anslutning till de olika metallurgiska processerna. I dagsläget körs de allra flesta av dessa på diesel. Således är den totala dieselförbrukningen påtaglig. Inom Bolidens gruvor i Sverige förbrukas ca 1,7% av den totala dieselförbrukningen i Sverige. Bolidens gruvor står för ca 5,5% av dieseln som används av arbetsmaskiner i landet, där gruvan i Aitik ensamt står för 4,5%. De malmbilar som används i anslutning till Bolidens gruvor står totalt för nästan 1% av den dieseln i landet som används i tunga vägtransporter. I Bolidens gruvor förbrukar arbetsmaskiner 4 100 ton diesel per år medan vägtransporterna förbrukar 5200 ton diesel per år. Det motsvarar 3 321 m³ diesel för arbetsmaskiner respektive 4 212 m³ för vägtransporterna. Baserat på förbrukningen av diesel i ton per år genererar Bolidens dieselförbrukning i gruvorna ca 12 080 ton CO₂-ekvivalenter per år från arbetsmaskiner och ca 15 320 ton CO₂-ekvivalenter per år från vägtransporterna (givet en emissionsfaktor 2,94699).

Användning av förbränningsmotorer i underjordsgruvor och dess tillhörande utsläpp är en annan motivation till strävan att elektrifiera arbetsmaskiner och lastbilar. Minskning av dieselförbrukningen samt eliminering av utsläpp i gruvmiljöer förväntas ha betydande fördelar för miljön, både arbetsmiljön i gruvrelaterad verksamhet samt miljön i stort och bidra till gruvbranschens regulatoriska och egna interna miljömål. Inom gruvnäringen används kraftfulla ventilationssystem för att kunna säkerställa en bra arbetsmiljö samt regelverksefterlevnad vad gäller utsläppshalter i underjordisk miljö. En minskning och framtida eliminering av utsläpp från förbränningsmotorer under jord förväntas minska energiförbrukningen från ventilationssystemet då den kan köras i lägre takt och under kortare tidsfönster. Dessutom elimineras produktionsstopp som initieras när NO_x-halterna överskrider tillåtna nivåer.

Elektrifieringen av malmbilar, bergbilar och arbetsmaskiner har identifierats som ett viktigt steg för att kunna uppnå de egna och regulatoriska målen i gruvbranschen. Tidigare analyser som har genomförts av Boliden visar på ett elektrifierat transportsystem i det aktuella området kan vara kostnadseffektivt och konkurrenskraftigt gentemot ett dieselbaserat system, även vid relativt låga bränslekostnader för diesel. Emellertid finns det ett antal utmaningar som behöver adresseras innan en större implementering av emissionsfria fordon och arbetsmaskiner kan ske. Produktionssystemet från gruvbrytning till färdig metall är komplex och består av flera samverkande delsystem vilket gör att olika typer av störningar kan leda till produktionsbortfall. Det råder låg tolerans för olika typer av störningar i systemet varför ett elektrifierat system därav behöver ha en hög grad av robusthet och inte får generera logistiska förluster. Därmed föredras ett experimentellt angreppssätt där lösningar implementeras inom ramen för ett innovationsprojekt för att kunna lokalisera och adressera de olika utmaningarna innan en storskalig implementering kan ske.

För att kunna introducera den nya tekniken i det befintliga produktionssystemet behöver man matcha den befintliga produktionstakten vilket gör att nyttolast i fordonen blir avgörande. Produktionsupplägget och den lokala miljön genererar hårda körcykler med utmanande topografi i gruvmiljö och hög energiförbrukning. Utöver det behöver de befintliga arbetsprocesserna ses över för att kunna implementera laddning av fordonen och arbetsmaskiner i ett utmanande produktionsschema. Laddningsförfarandet behöver således undersökas med hänsyn till produktion och effekttillgänglighet. Dessutom försvåras laddning i underjordiska gruvmiljöer utifrån den dammiga, fuktiga och korrosiva miljön som råder vilket ställer högre krav på hårdvaran samt innebär att laddinfrastrukturen behöver vara platseffektiv då framtagning av nya ytor i gruvor är kostsamt. Eftersom Boliden anlitar underleverantörer för att utföra större delen av produktionen och transporter vid de olika anläggningarna, samt alla transporter på

väg, behöver underleverantörerna involveras på ett bra sätt i omställningen. Tidigare erfarenheter har visat på svårigheter i att som transportköpare upphandla elektriska transporter pga. begränsad erfarenhet av kontrakt med elektrifierade maskiner och fordon i branschen. Dessutom är underleverantörerna i det aktuella produktionssystemet anlitade genom upphandlingar med transport- och produktionsavtal med giltighetstid på vanligtvis två år.

Implementeringen av elektriska lösningar för produktion och transport behöver således föregås av tester i verklig miljö, i ett samarbete mellan relevanta aktörer, och sättas i ett större systemsammanhang. För att säkerställa en framgångsrik framtida storskalig implementering av elektrifierade lösningar behöver de olika systemperspektiven iakttagas varför projektkonsortiet i OREEL har föreslagit att göra det inom ramen för ett systemdemonstrationsprojekt, som föregås av det aktuella förberedelseprojektet vars resultat presenteras nedan.

5 Syfte, forskningsfrågor och metod

I det här kapitlet avhandlas syfte, forskningsrelaterade frågor samt metodik för studiens genomförande.

5.1 Syfte

Syftet med förstudien var att gemensamt förbereda för en framtida systemdemonstrator av elektriska transportlösningar inom gruvdrift. Denna ska omfatta elektrifierade och utsläppsfria vägtransporter av malm, liksom annan transport- och gruvverksamhet vid Bolidens olika anläggningar.

5.2 Forskningsansats

Fokuset för arbetet i förstudien har varit att undersöka och förstå systemet där den framtida systemdemonstrationen av batterielektriska fordon och arbetsmaskiner kommer att äga rum. För det ändamålet har projektkonsortiet valt att utgå från fysiska observationer på de aktuella siterna för att samla in underlag till efterföljande simuleringar för hur och vilka fordon och arbetsmaskiner skulle kunna implementeras i den efterföljande demonstrationen. För att undersöka elektrifieringens potential inom vägtransporterna användes ett tidigare genomfört.

Under observationerna i gruvor samt på de fasta anläggningarna inom produktionssystemet undersöktes vilka effekter och behov som kan tänkas uppstå när batterielektriska fordon och maskiner implementeras i logistik- och produktionssystemets olika anläggningar. Till följd av observationerna gjordes en analys av hur befintliga arbetsprocesser och enskilda arbetsmoment skulle kunna påverkas av den nya tekniken samt vilken typ av laddnings- och elektrisk infrastruktur som skulle krävas för att stötta de elektrifierade fordonen och maskinerna i systemet.

Projektet initierade även analysen om hur nya digitala verktyg skulle kunna effektivisera informationsflödet och hur dessa kan kopplas till befintliga system för produktions- och fordonsstyrning. En annan viktig aspekt var att bedöma den flexibilitet som krävs för att kunna utföra dagens arbetsuppgifter med batterielektriska fordon och maskiner samt hur den befintliga produktionstakten kan upprätthållas med tanke på batterielektriska fordonens eventuella minskade nyttolastkapacitet.

Slutligen initierades en inledande analys av hur omställningen påverkar förare och maskinister och deras arbetsdag samt vad som behöver iakttas i förhållande till affärsmodeller, policy och service vid implementering av elektriska fordon och maskiner. Detta gjordes med ett tydligt fokus på bibehållen produktivitet och en bred teknikacceptans, samtidigt som hänsyn togs till de positiva effekterna av minskade utsläpp, i synnerhet i underjordsmiljöerna.

5.3 Metod

Arbetet i förberedelseprojektet har grundat sig i regelbundna veckovisa arbetsmöten där representanter från samtliga organisationer har deltagit. I uppstartsfasen av projektet beslutade konsortiet att påbörja undersökningen av det aktuella produktions- och logistiksystemet i Bolidenområdet med ett studiebesök. Boliden har en produktionskedja som sträcker sig från gruva till färdig metall, vilket möjliggör att demonstrera olika typer av fordon i skilda delsystem och processer som samtidigt utgör ett större sammankopplat logistiksystem. Representanter från Volvo förberedde sig inför besöket genom att undersöka vilken data som skall samlas från de olika fordonen och arbetsmaskinerna på plats.

Under studiebesöket, som pågick under fyra dagar, fick projektgruppen besöka smältverket Rönnskär, de underjordsgruvorna Kankberg, Renström och Kristineberg, den uttjänta gruvan i Mårliden där efterbehandling pågår, samt anrikningsverket i Boliden. I tillägg undersöktes och mättes de aktuella vägsträckorna mellan gruvorna och anläggningarna. Dessa mätningar har fungerat som underlag för simuleringar som gjordes i syfte att verifiera vilka sträckor som är möjliga att elektrifiera med batterielektriska lastbilar i det aktuella produktionssystemet inom ramen för systemdemonstratorn.

Under besöken har projektgruppen fått möjlighet att träffa och intervjua relevanta representanter, från de olika gruvor och fasta anläggningar, med insyn i fordonsledning, gruvdrift, inköp med flera. Några av dessa representanter har intervjuats ytterligare för att komplettera de tidigare insamlade uppgifterna. Projektgruppen har även fått möjlighet att intervjua representanter från en av de största underleverantörerna till Boliden som utför driften av både arbetsmaskiner och fordon inne i gruvorna, samt transporten mellan anläggningarna på väg. Intervjun med underentreprenören har breddat förståelsen för vilka utmaningar och möjligheter som de står inför i och med elektrifiering av fordon och maskiner.

Studiebesöken följdes av en workshop där projektparterna initierade en tentativ plan för när och vilka typer av fordon och arbetsmaskiner som skulle vara aktuella att implementeras under ett systemdemonstrationsprojekt med hänsyn till aktuella avtalsfönster mellan Boliden och underentreprenörerna. Utöver det påbörjades en mappning av det aktuella produktions- och logistiksystemet för att kunna beskriva vilka arbetsmoment och processer respektive produktionssteg gruvnäringen består av. I slutskedet har konsortiet gemensamt sammanställt vilka olika tekniska lösningar som är aktuella för att implementeras under systemdemonstration och därefter formulerat en projektplan inklusive systemutmaningar, tidsplan och budget.

6 Mål

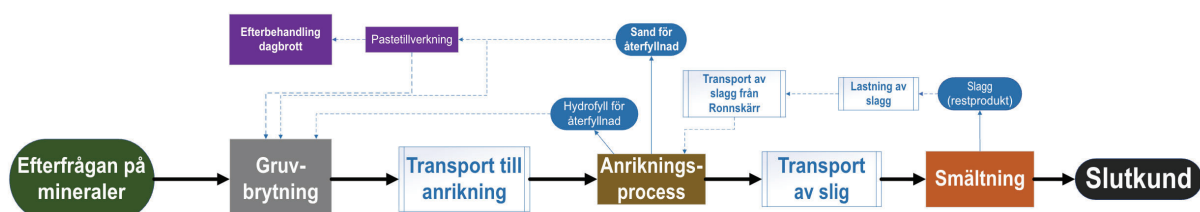
Det huvudsakliga målet med förberedelseprojektet var att skapa en bas och förbereda för en systemdemonstration av elektrifierade och emissionsfria lösningar inom gruvlogistik. De tänkta platserna för demonstration var arbetsmaskiner och fordon inne i de underjordsgruvorna samt vid de andra anläggningarna i produktionssystemet i Bolidenområdet. Utöver det var även vägtransporterna mellan gruvorna och anläggningarna en annan tilltänkt demonstrationsplats. Det huvudsakliga målet för projektet har kvarstått. I ansökan för det aktuella förberedelseprojektet har automation nämnts som ett potentiellt område som systemdemonstrationen skulle kunna komma att beröra. Projektkonsortiet har gemensamt fattat beslut om att fokusera på elektrifiering i den kommande systemdemonstrationen för att hålla projektinnehållet koncentrerat till ett komplext ämne och hålla automation till andra pågående och planerade insatser hos behovsägaren Boliden.

7 Resultat och måluppfyllelse

I detta kapitel beskrivs de huvudsakliga resultaten som förberedelseprojektet har genererat. Kapitlet inleds med en beskrivning över det aktuella produktions- och logistiksystemet som har varit det huvudsakliga föremålet för analys och undersökningar under förberedelseprojektet. Därefter presenteras vad som sker i gruvnäringen i övrigt kopplat till elektrifiering av de typer av fordon och maskiner som är aktuella för demonstration i det kommande huvudprojektet. Resultaten från de respektive arbetspaketen presenteras i de efterföljande underkapitlen. Kapitlet avslutas med en sammanfattning över hur konsortiet bedömer förberedelseprojektets relevans för FFIs mål och FFI Accelereras mål.

7.1 Systembeskrivning

Ett centralt resultat i förberedelseprojektet är en mappning av det aktuella produktionssystemet och dess logistikflöden. Förenklat består Bolidens produktionssystem i Bolidenområdet av följande huvudprocesser:



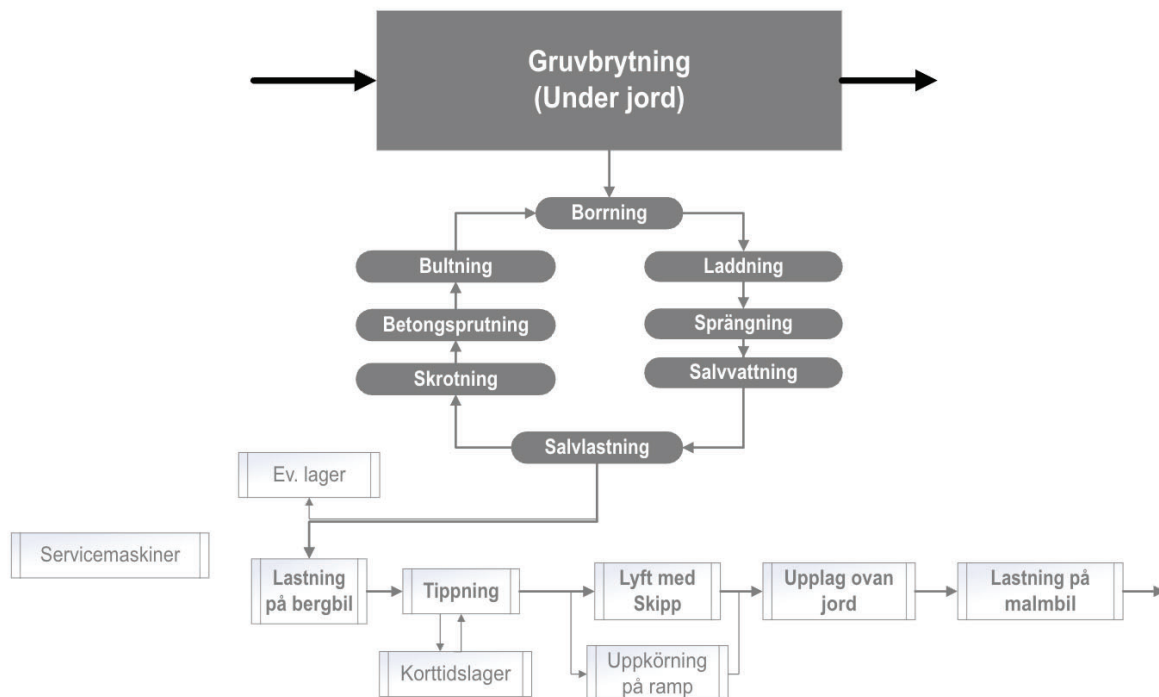
Figur 2. Flödesschema över det aktuella logistiksystemet

Efterfrågan på olika metaller på världsmarknaden styr Bolidens produktionstakt inom gruvbrytningen. Malm bryts i Bolidens underjordsgruvor i Bolidenområdet och tas upp ur gruvorna med hjälp av antingen en skipp (en hiss) eller körs av lastbilar på ramp upp till ytan. Därefter transporteras malmen från gruvorna till anrikningsverket på lastbilar (malmbilar) som kör på allmän väg. Inne på anrikningsverket tar man fram slig som är en förädlad produkt i form av metallpulver. Slig körs sedan till smältverket där den förädlas vidare till färdig produkt i form av ren metall som sedan transporteras vidare till slutkund från smältverket. I systemet ingår även ett antal returflöden. Från smältningen erhålls slagg som körs tillbaka till anrikningsverket och som efter bearbetning kan användas som fyllnadsmaterial vid gruvbrytning eller för återfyllnad av uttjänta gruvor.



Figur 3. Logistiksystem i Bolidenområdet i relation till geografiska positioner.

Inom Bolidenområdet bryts malmen i de tre underjordsgruvorna Kristineberg, Renström och Kankberg. Malmen från samtliga gruvor samlas i anrikningsverket i orten Boliden för framställning av rena metaller – zink, bly, koppar och guld. Vid samtliga delprocesser i Bolidens produktionskedja sker mängder av masshantering och transporter med hjälp av maskiner och lastbilar. Samtliga arbetsplatser har bedömts vara aktuella för vidare tester med elektrifierade maskiner och fordon i ett kommande systemdemonstrationsprojekt, i syfte att förstå hur dessa kan implementeras i det stora systemet på ett effektivt sätt ur ett logistiskt, ekonomiskt och tekniskt perspektiv samt med hänsyn till arbetsmiljö. Därmed har det varit av stort vikt att förstå de processer och arbeten som pågår i respektive steg av produktionssystemet. Nedan följer en fördjupning i samtliga områden som finns representerade i flödesschemat (Figur 2).



Figur 4. Överblick över arbetsprocesserna vid gruvbrytning.

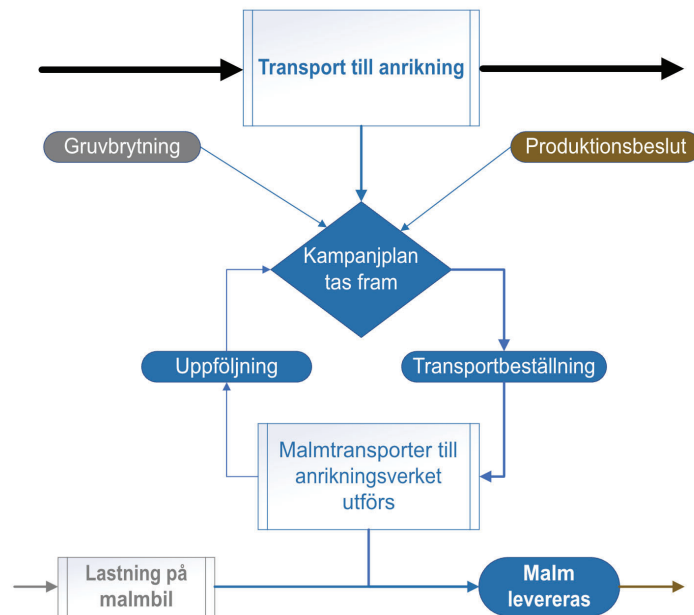
De grundläggande arbetsprocesserna vid de tre gruvorna är snarlika. De skillnader som finns berör hanteringen av malmen, som har sprängts ut vid gruvbrytning, samt hur denna transporteras upp till ytan. Gruvbrytningen sker i en kontinuerlig process där man förenklat: borrar, laddar, spränger och hanterar den utsprängda malmen, förstärker och återfyller bergrummen innan man spränger vidare i nästa ort. Malmen lastas på bergbil (figur 4), alternativt lagras i anslutning till de utsprängda bergrummen under en begränsad tid. De bergbilar som används för transport av malm inne i gruvorna är tunga lastbilar för anläggningstransporter som har blivit modifierade för gruvnäringens ändamål. Fordonen är utrustade med en förstärkt påbyggnad och en annan typ av fjädring (bladfjädring) för att kunna hantera de högre lasterna och annan godsdensitet jämfört med motsvarande traditionella anläggningsbilar. Fördelarna som bergbilarna erbjuder jämfört med traditionella bergtruckar som används i gruvindustrin är lägre inköpskostnad och lägre driftkostnader.

Efter lastning på bergbil körs malmen till en kross som krossar malmen, vilken sedan lyfts upp till ytan med en skipp. I Kankberg, där krossandet sker ovan jord, transporteras malmen upp till ytan med bergbil. Malmen läggs på upplag ovan jord under en begränsad tid och lastas sedan på en malmbil som transporterar den till anriktningsverket.



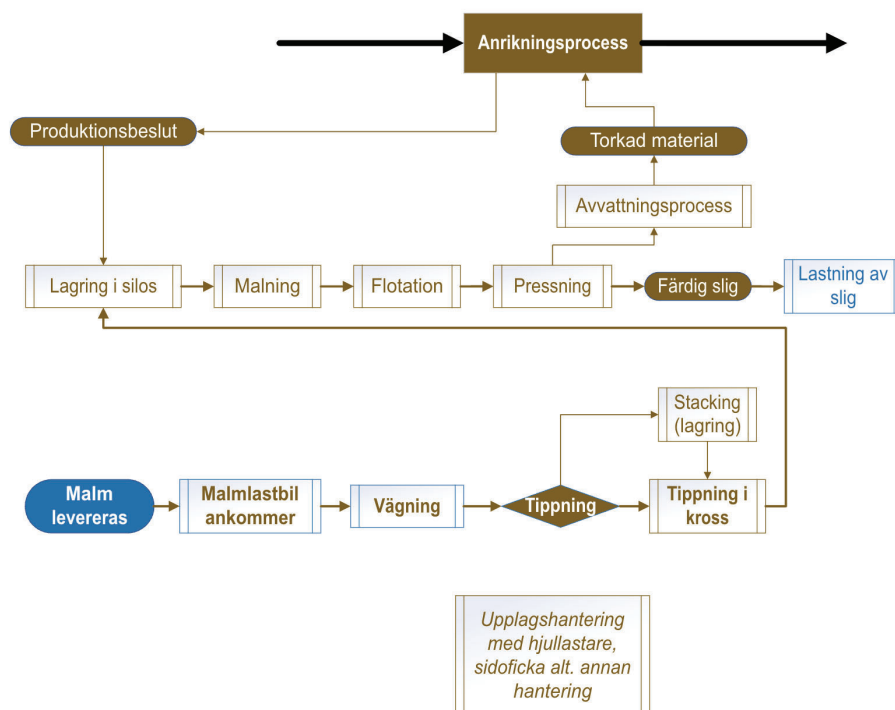
Figur 5. Bergbil i Renströmsgruvan.

Malmen från gruvorna transporteras enligt en veckovis plan baserat på fraktbehovet från gruvorna till anrikningsverket. Planen sätts upp genom dialog mellan gruvorna, anrikningsverket och underentreprenörerna som utför transporter och materialhantering. Behovet baseras på vilken typ av malm som ska hanteras på anrikningsverket, en s.k. kampanj. För att en kampanj ska kunna genomföras behövs en viss mängd malm finnas på upplag vid anrikningsverket, vilket i sin tur styr vilken typ av malm som bryts och ska transporteras från gruvorna. Behovet kan justeras under en pågående veckoplan för att kunna hantera oförutsedda händelser, så som stopp i kross.



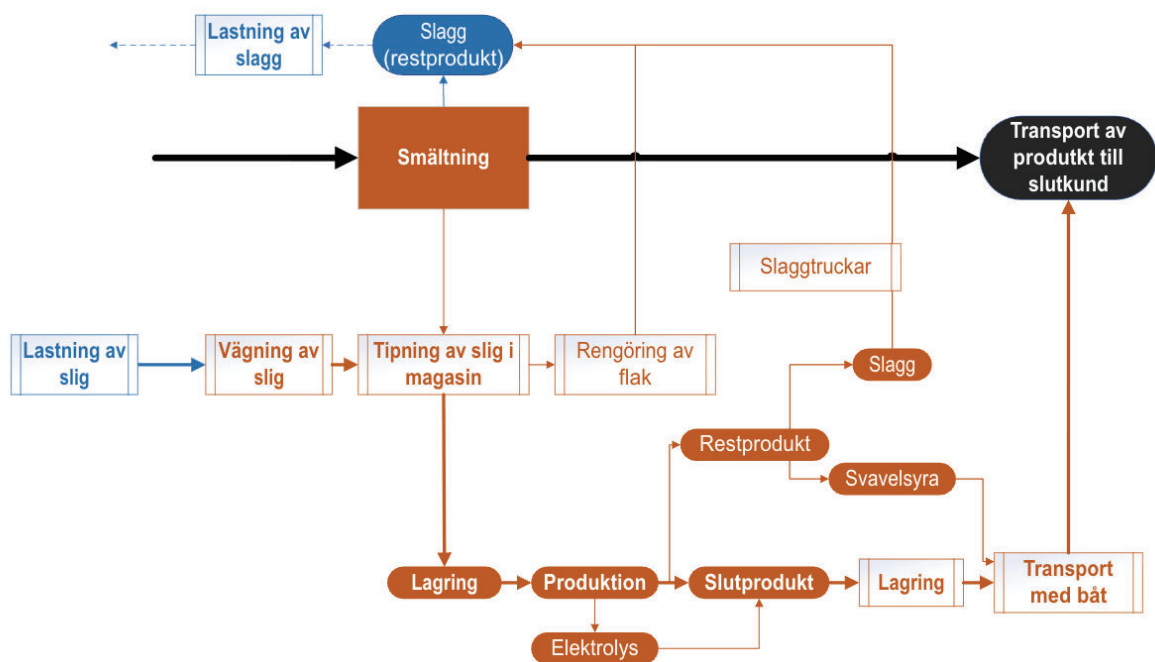
Figur 6. Överblick över transportprocessen från gruva till anrikning.

Vidare levereras malmen till anrikningsverket utifrån den pågående veckoplanen. Den inkommande lastbilen vägs på en lastbilsvåg för att beräkna vikten på den inkommande malmen. Därefter kör lastbilen till en av tippningsfickorna på området. Malmen från gruvan Kankberg krossas ytterligare under tippning då anläggningen saknas kross. Därefter skickas malmen antingen direkt vidare till anrikningsverket alternativt läggs på upplag utomhus i anslutning till tippningen. Upplaget sker för att säkerställa att tillräcklig mängd malm finns som ska matas in i anrikningsprocessen beroende på vilket slag det är som ska produceras. Malm lagras i olika högar uppdelat utifrån de olika typer av metaller som ska tas fram. Den lagrade malmen kräver hantering av arbetsmaskiner för att bland annat flytta den till transportbandet vid senare tillfälle. Denna process illustreras i nedre delen av figur 7.



Figur 7. Överblick över anrikningsprocessen i anrikningsverket i Boliden. Processen inleds med leverans av malm till anrikningsverket.

Vidare transporteras malmen från lagerhögar till förvaring i silos innan den går vidare i anrikningsprocessen i anrikningsverket. I anrikningsprocessen mals malmen ner i en kvarn till än mer finkornigt pulver. Vidare används en process som heter flotation, där pulvret som matas in i vattentankar med reagenser bryts upp i metaller i flytande form och restmaterial. Metaller som har funnits i malmen flyter upp på ytan och samlas i form av ett mineraliserat skum. Vidare pressas metallen i det efterföljande produktionssteget. Efter pressning erhålls metallen i form av s.k. slig. Slig är slutprodukten inom anrikningen och transporteras vidare till smältverket i Rönnskär. Från pressning används restmaterialet i en avvattningsprocess för att erhålla torkat material i form av sand, som kan användas för återfyllnad av uttjänta gruvor och utsprängda bergrum. Dessutom tillkommer hydrofil som en ytterligare slutprodukt som används till återfyll i gruvbrytning. Därmed uppstår ett behov av transporter från anrikningsverket tillbaka till gruvorna och dessa utförs av malmbilarna som transporter malmen från gruvorna till anrikningsverket.



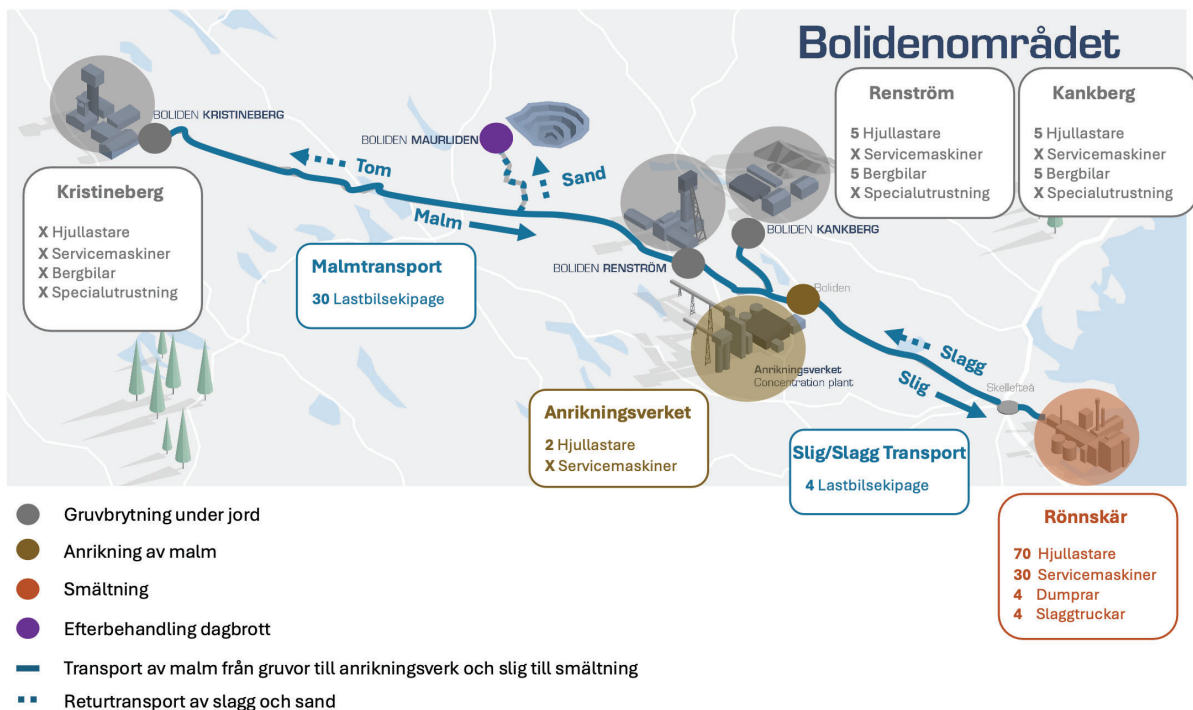
Figur 8. Förenklad bild över processerna i smältverket Rönnskär.

Framställning av Bolidens slutprodukter sker i smältverket Rönnskär. Processerna som sker inne på anläggningen är många och utgör ett väldigt komplex subsystem i Bolidens produktionskedja. Komplexiteten föreligger i bland annat mängden av maskin- och fordonströrelser som sker inne på anläggningen, då uppemot 70 arbetsmaskiner och fordon körs inne på området. I figur 8 illustreras en förenklad bild över de huvudsakliga flödena inne på smältverket.

Slig ankommer från anrikningsverket med lastbil. Den inkommande lastbilen vägs på lastbilsvåg. Därefter körs lastbilen till en av fickorna där slig tippas i ett magasin. Utöver slig från anrikningsverket i Boliden tillkommer slig från Bolidens andra gruvor, bland annat på järnväg från Aitik. Slig lagras, sorteras och förflyttas med olika transportband beroende på vilka produkter det är som ska framställas. Utformningen av anläggningen och mängden olika magasin och transportband skapar stora behov av materialhantering, vilket i sin tur kräver ett stort antal hjullastare och andra arbetsmaskiner som arbetar på området. Efter lagring används slig i framställning av rena metaller (processen benämns som *produktion* i figur 8). De specifika metallurgiska processerna i produktionen ligger utanför omfånget av detta förberedelseprojekt. Slutprodukten från produktion är rena metaller. Parallellt framställs rena metaller med hjälp av elektrolys vilket resulterar i än mer rena metaller. Slutprodukterna lagras för att sedan transporteras vidare till Bolidens slutkunder via väg, järnväg eller sjövägen.

Från produktionen tillkommer även restprodukter i form av svavelsyra och slagg. Slagg transporteras av samma lastbilar som levererar slig till smältverket. Lastbilarnas flak rengörs efter tippning av slig inför lastning av slagg. Denna restprodukt körs tillbaka till anrikningsverket för att efter hantering användas i den tidigare nämnda framställningen av sand som används för återfyllnad och stabilisering av uttjänta gruvor och bergrum. Svavelsyra säljs externt och transporteras från Rönnskär med sjöfart.

Från och med år 2026 kommer den tidigare gruvan Maurliden att börja fyllas igen, då området ska återställas efter avslutad gruvverksamhet. Den inaktiva gruvanläggningen består av ett större dagbrott och ett mindre inom samma område. Återfyllnad kommer att göras med hjälp av sand från anrikningsgruvorna som kommer att vara en ingående komponent vid tillverkning av en krämig massa (eng. paste). Gruvorna kommer att fyllas igen med denna massa som ska tillverkas på plats inne på Maurliden-området. Sanden kommer att transporteras med hjälp av malmbilar, framför allt av de som kör malm från gruvan Kristineberg till anrikningsverket som i dagsläget körs tomma tillbaka från anrikningsverket till Kristineberg. Gruvans återfyllnad kommer enligt plan att pågå i cirka 10 år. Utöver återfyllnaden kommer det att ske annan materialhantering på området då gråberget som har tagits upp ur gruvan ska flyttas till en ny permanent placering för slutförvaring.



Figur 9. Schematisk bild över transportsystemet i anslutning till logistiksystemet i Bolidenområdet.

I beskrivningen över de olika stegen i Bolidens produktionskedja framgår att systemet är i behov av ett stort antal maskiner och fordon för att kunna upprätthålla produktionen. Introduktionen av elektriska fordon i systemet måste således göras på ett sätt som inte försämrar produktionstakten och inte medför logistikförluster. Utöver det körs en mängd maskiner och fordon av underentreprenörer utefter upphandlade avtal vilket gör att avtalsramar, framför allt i form av avtalstid, behöver beaktas.

7.2 Omvärldsbevakning

I förberedelser för systemdemonstrationen inom ramen för OREEL har följande typer av fordon och arbetsmaskiner varit i fokus.

- Malmbilar
- Bergbilar
- Hjullastare
- Grävmaskiner
- Dumprar

I det aktuella produktions- och logistiksystemet inom Bolidenområdet används i dagsläget lastbilsekipage bestående av bil och släp för förflyttning av malm, slig och slagg mellan de olika anläggningarna i systemet. För närvarande används främst lastbils kombinationer bestående av lastbil (8x4*4) samt släp med en totalvikt på upp till 74 ton. Inom ramen för det svenska innovationsprojektet REEL har Boliden tillsammans med sin underentreprenör kört ett elektrifierat ekipage för transporter mellan Bolidens anrikningsverk och den närliggande gruvan Renström samt genomfört tester på andra rutter [4]. Ekipaget har bestått av en Scania batterielektrisk dragbil (6x2*4) samt en link och en trailer med en totalvikt på 74 ton. Fordonskombinationen har skiljt sig från de ordinarie kombinationerna i det aktuella logistiksystemet och har gett upphov till ett lastviktsbortfall på ca. 4-5 ton jämfört med dieselekipaget. Inom ramen för det Vinnova-finansierade projektet har en mix av serietillverkade och prototypfordon brukats i många fall i 3–4 år. Bolidens Scania-lastbil har körts i ca. 3 år.

I övrigt pågår eller planeras andra insatser med tester av batterielektriska lastbilar i fordonskombinationer som kräver specialtillstånd där motsvarande totalvikter eller högre förekommer. Det Vinnova-finansierade projektet DHEELS kan nämnas särskilt [5]. Inom ramen för DHEELS förekommer dock ännu inget flöde relaterat till gruvindustrin. Inom projektet TREE pågår just nu drift av ett särskilt tungt batterielektriskt flisekipage med en totalvikt på upp till 94 ton [6]. När det gäller batterielektriska lastbils kombinationer på väg ligger Sverige och de två svenska lastbilstillverkarna Volvo och Scania i framkant, inte minst då en högre totalvikt tillåts på de svenska vägarna i jämförelse med de flesta länder i Europa och världen, vilket gör den svenska marknaden till en naturlig testplats för denna typ av tester i verklig miljö. Inga andra kända tester av liknande batterielektriska ekipage för malmtransporter pågår varken hos Volvo eller Scania.

Bergbilar är en något specifik lastbilslösning som används i flera av Bolidens underjordsgruvor. Dessa fordon byggs på ett 6x4 jämnlastlastbilschassi som utrustas med en modifierad lastkorg anpassad för transport av berg, i detta fall malm (figur 5). Fordonskombinationen är utmanande då det handlar om en modifiering av en serietillverkad lastbil för att kunna hantera större nyttolaster i krävande miljöer. Den erbjuder en mer kostnadseffektiv lösning jämfört med ändamålsbyggda bergtruckar för gruvindustrin eftersom lastbilstillverkning i stora volymer skapar skalfördelar och bidrar till en lägre inköpskostnad. Fordonet hamnar i ett segment mellan vanliga lastbilar och specialiserade lösningar och utgör därmed ett krävande användarfall samtidigt som förutsättningarna för elektrifiering förbättras, inte minst tack vare den lägre kostnaden. Användningen av bergbilar kan komma att öka inom gruvindustrin i jakt på effektivisering och minskade kostnader. Utmaningen i anpassning av denna fordonstyp i eldrift föreligger i behov av annan fjädring, packning av batterier samt skydd av dessa från exempelvis sidokollisioner med bergsväggar, vilket förekommer i underjordiska gruvmiljöer. Den tuffa körcykeln sett till energianvändning och topografi inne i

underjordsgruvor kommer ge upphov till viktiga lärdomar för fortsatt utveckling av batterielektriska lastbilar i stort. Utöver bergbilen finns exempel på andra typer av batterielektriska lastbilar med högre lastkapacitet (s.k. widebody trucks) i dagbrott i framför allt Kina men även i Brasilien, Guinea, Indonesien, Mongoliet, Pakistan och Thailand [7]. Samtliga batterielektriska lastbilar i denna klass kommer från kinesiska tillverkare.

Flottor av större specialiserade maskiner kompletteras med andra arbetsmaskiner ofta i form av hjullastare. Maskiner med samlingsnamnet LHD (Load, Haul, Dump) är i regel betydligt större och tyngre än traditionella hjullastare. Det i kombination med hög grad av specialisering gör dessa produkter dyrare i inköp och drift, särskilt för bruk under jord. Dessutom finns det många processer inne i produktionssystemet, som har beskrivits i kapitel 7.1, där ett behov av hjullastare som produktions- och servicemaskiner uppstår för att förflytta och hantera olika typer av material. Batterielektriska hjullastare i storlekar efterfrågade av gruvindustrin sett till lastkapacitet är i stort sett obefintliga på marknaden [7]. De få exempel som förekommer är av lägre klass sett till lastkapacitet.

Det finns tre underjordsgruvor i världen där det finns en uttalad ambition om att elektrifiera dessa i närtid. Dessa är belägna i Kanada (Borden guldgruva) samt i Norge (Nussirgruvan och Kvannevanngruvan). Samtliga kännetecknas av att använda specialiserade batterielektriska arbetsmaskiner i större viktclasser jämfört med de arbetsmaskiner som kommer att föreslås att demonstreras i Bolidenområdet inom ramen för ett huvudprojekt. De fördelar som har noterats i dessa gruvor hittills, som ett resultat av ökad grad av elektrifiering, är en minskning av energi och andra relaterade kostnader på mellan 40 och 50%, minskade CO₂-utsläpp, minskade vibrationer och bullernivåer, förenklat underhåll samt en renare arbetsmiljö för gruvarbetare. Inom dagbrott utmärks särskilt *Matawinie Graphite Project* som förväntas bli världens första helelektrifierade dagbrott, vilket förväntas ske i samband med en implementeringsfas av nya fordon år 2028, inklusive batterielektriska lastbilar och hjullastare [7].

Slutligen bör några av elektrifieringsinsatserna inom Boliden nämnas. I Kankbergsgruvan testar Boliden tillsammans med Volvo en batterielektrisk anläggningsbil för förflyttning av blandat gods inne i gruvan samt ner till och upp från gruvan [8]. Utöver den har Boliden implementerat ett system av batterielektriska truckar med dynamisk laddning från kontaktledning i Rävliiden, en ny gruva i anslutning till gruvan i Kristineberg. Den första av truckarna i flottan var först i världen i sitt slag och används för uppkörning av malm upp till ytan på en ramp med hjälp av en eltrolleban på fem kilometer [9]. Inom samma projekt har även batterielektriska LHD-maskiner med batteri-bytessystem implementerats.

7.3 Innovationsledning och koordinering

Förberedelseprojektet har uppfyllt huvudsyftet om att förbereda basen för ett kommande systemdemonstrationsprojekt. Projektets koordinators har under förberedelseprojektets gång hållit i regelbundna möten med en frekvens om en gång i veckan. Den koordinerande partnern har även medarrangerat två konsortiemöten. Det första har kombinerats med studiebesök på Bolidens fasta anläggningar och gruvor för att genom observationer studera de olika processer som pågår där som är av relevans för projektets innehåll. Ett heldagsmöte hos Volvo Construction Equipment i Eskilstuna har anordnats i slutfasen av förberedelseprojektet för att summera resultaten från och fortsätta bygga basen för en systemdemonstration. Den koordinerande partnern har

säkerställt att arbetet som konsortiet genomför under förberedelseprojektet gång stämmer överens med de i ansökan angivna leveranser för projektet. Koordinatören har tidigt presenterat den tilltänkta finansiärens krav på en systemdemonstrator. En kommunikationsstrategi för det tilltänkta huvudprojektet har tagits fram som innefattar de tilltänkta målgrupperna samt vad konsortiet vill att dessa ska veta, känna och göra samt hur projektet ska åstadkomma detta genom kommunikation. Den sistnämnda delen ska utvecklas vidare till en kommunikationsplan i det kommande huvudprojektet. Den koordinerande parten har haft huvudansvaret för sammanställningen av denna slutrapport.

7.4 Analys av gruvor och fasta anläggningar

Systemavgränsningen utgörs enligt figur 9, där underjordsgruvor (Kankberg, Renström, Kristineberg), fasta anläggningar (Anrikningsverket i Boliden och Rönnskär) och återställning av ovanjordsgruva (Mauriden) utgör delsystem tillsammans med delsystemet vägtransporter. Kapitlet redogör för vilka beröringspunkter som identifierats mellan maskiner och fordon inom off-road applikationer och fordon eller annan utrustning inom on-road applikationer. Beträffande on-road applikationerna så beskrivs vägtransporterna och dessa demonstrationsbehov ingående i efterföljande kapitel. Utifrån kartläggningen av helsystemet i "Kapitel 7 – Systembeskrivning" beskrivs i detta kapitel identifierade maskiner och fordon som klassificeras som off-road applikationer, samt för vilka av dessa ett demonstrationsbehov föreligger med tillhörande motivation. Med motsatt argumentation redogörs för vilka maskiner och fordon ett demonstrationsbehov inte föreligger eller om insatser behövs men inte ämnas genomföras inom ramen för detta projekt. Utifrån det processflöde som beskrivs i kapitel 7.1 delas maskiner och fordon in inom delsystemen underjordsgruvor, fasta anläggningar och återställning av ovanjordsgruva.

Underjordsgruvor (Kankberg, Renström, Kristineberg)

Av arbetsstegen som återfinns i figur 4 används följande mobil produktionsutrustning borrhög för borrhög, laddfordon för laddning, vattendumper för salvvattning, hjullastare för salvlastning, skrotare för skrotning, betongfordon för betongsprutning, bultrigg för bultning, bergbil för masstransport, hjullastare för lastning till vägtransport ovan jord. Av ovannämnda maskiner drivs samtliga via nät drift 1000V vid gaveln, förutom hjullastarna, vattendumper och bergbilen. I transport fram till gavel drivs de dock fortsatt på diesel, där betongbilen, som går upp och ner i rampen utpekats som en intressant bil att elektrifiera då den alltid går lastad ner och olastad upp. Vad gällande fast produktionsutrustning, så som krossar och skippar är dessa redan idag

nätanslutna. Därmed anses demonstrationsbehov föreligga primärt på hjullastare och bergbil, se figur 10, gällande produktionsmaskinerna under jord.



Figur 10. Bild över pågående lastning av bergbil i underjordsgruva.

Detta styrks av mätdata från gruvproduktionen som påvisar att utlastning och transport under jord utgör ~65% av bränslekonsumtionen under jord. Dock kommer de redan elektrifierade maskinerna och stationär utrustning vara en del av helsystemanalysen då de delar elektrisk infrastruktur.

De beröringspunkter som identifierats mellan vägtransporterna och underjordsgruvan är primärt hjullastaren för lastning till vägtransport ovan jord och bergbilen, i de fall transporten går hela vägen upp i dagen.

Servicemaskiner används för mediainstallation, vägunderhåll och reservdels- och materialtransporter. För mediainstallation används hjullastare med arbetsplattform, för vägunderhåll används primärt hjullastare med planeringsskopa och transporterna sköts med lastbil med flak. Speciellt hjullastare med arbetsplattform står ofta och arbetar på tomgång vilket genererar högre NOx-utsläpp än produktionsmaskinerna på grund av ogynnsam arbetspunkt för förbränningsmotorn. Samtidigt innebär tomgångsarbete med låg bränsleförbrukning i kombination med förhållandevis låg utnyttjandegrad att denna typ av maskiner är gynnsamma att elektrifiera.

Personaltransport utförs antingen med hiss eller med personbil beroende på gruva. Hissen är redan elektrifierad och personbilarna, i form av flakbilar, är tillgängliga på marknaden, från till exempel Ford.

Ur systemperspektiv binds gruvans olika arbetsprocesser ihop primärt av energiflöde och materialflöde, biflöde i systemet för att möjliggöra produktion är personalflöde, kommunikationsinfrastruktur, vattennivåreglering och frisklufttillförsel. Givet befintlig infrastruktur i gruvan och relativt höga laster i form av befintlig elektrifierad utrustning är förutsättningarna för elektrifiering generellt sett goda i underjordsgruvor. För produktionsmaskiner vid gaveln är elektrisk infrastruktur redan framdragen då utlastning påbörjas till följd av föregående arbetssteg då borrhiggen drivs av 1000V, således bör laddning, eller motsvarande, kunna ske i närheten av arbetsområdet. Gällande mass- och materialtransporter finns naturliga laddpunkter, eller motsvarande, naturligt längs transportsträckan vid stationära anläggningar, verkstad eller personalutrymmen där även elektrisk infrastruktur finns framdragen idag. Detaljanalys

gällande effektuttag och eventuellt behov av förstärkning av elnät planeras att genomföras i fortsättningsprojektet, dock visar initialanalysen att förutsättningarna är goda. Gällande hjullastaren för lastning till vägtransport ovan jord beror laddpunkten utformning på nätkapaciteten i området och huruvida vägtransporterna ska ladda vid gruvorna eller på separat laddpunkt längs vägsträckan. Om laddplats ska delas bör denna utformas för att ackommodera både anläggningsmaskiner och vägtransportsfordon samt eventuellt utökas beroende på hur många laddpunkter fordonen har längs vägsträckan. Gällande servicemaskiner och deras nämnda låga dagliga energiförbrukning i kombination med att dessa ofta parkeras nära personalutrymmen finnes en naturlig plats där laddning där befintlig elinfrastruktur kan nyttjas. Här finns potential till delad laddinfrastruktur mellan servicemaskiner, bergbilar, servicefordon och personbilar.

Utifrån beskrivna nulägesanalys samt potentiell elinfrastrukturutbyggnad och processförändring i kombination med gapanalys gällande emissionsgenererande utrustning identifieras följande omställningsbehov:

- Bergbil och lastbil med flak för att täcka mass- och materialtransporter.
- Hjullastare för primärlastning vid gaveln under jord.
- Hjullastare för lastning till vägtransport ovan jord.
- Servicemaskin, i form av hjullastare, för vägunderhåll och mediainstallation under jord.
- Energidistribution, för ovannämnda maskiner, anpassat efter teknisk lösning, så som till exempel maskiner med inbyggda batterier, batteribytesystem eller nätanslutning. Inkluderat är även förslag på schemulering för minimering av infrastrukturbehov. Således innefattas även dimensionering av laddinfrastruktur och datahantering för schemuleringen.

Enligt analys ovan så är gynnsamheten för elektrifiering av servicemaskiner och fordon hög dock är den totala emissionspåverkan högre för produktionsmaskinerna, det vill säga bergbilen och hjullastarna, vilka står för majoriteten av bränsleförbrukningen men också en större utmaning vad gällande elektrifiering. Detta beror på hög utnyttjandegrad och hög arbetsbelastning.

Återställning av ovanjordsgruva (Maurliden)

Maurliden är en stängd ovanjordsgruva där nu återställning pågår, se figur 11. Detta innebär i detta fallet att gråberg ska förflyttas till slutupplag. Slutupplaget planeras 1-2 km från där gråberget ligger idag. Detta innebär materialhantering och förflyttning vilket kommer pågå under 10 år, även markförberedning på slutförvaringsplatsen och vägar därtill kommer behöva anläggas. Detta estimeras att kunna utföras med en flotta av 5-10 lastbärare, till exempel dumper, 2-3 lastmaskiner och 2 servicemaskin för vägunderhåll och supportmaterial.



Figur 11. En av de uttjanta öppna gruvorna i Maurliden som ska bli föremål för efterbehandling/återfyllnad.

Förutom förflyttningen av gråberget kommer dagbrottet att återfyllas med sand från anrikningsverket. Därmed finns en potentiell beröringspunkt mellan vägtransporter och anläggningsmaskiner, emellertid då elinfrastrukturen till Maurliden är väldigt begränsad i dagsläget har analysen resulterat i att det troligtvis inte är kostnadseffektivt att ladda vägtransporterna i Maurliden. Detta innebär också att mer detaljerad nätanalys planeras genomföras i fortsättningsprojektet för att möjliggöra elektrifiering av ovanstående maskiner.

Ovan beskrivna process på arbetsplatsen medför att det vore lämpligt att elektrifiera samtliga anläggningsmaskiner, det vill säga dumprar och hjullastare. Detta är även ett utmärkt tillfälle att designa laddinfrastruktur i ett område där elinfrastrukturen potentiellt är svag.

Fasta anläggningar (Anrikningsverket i Boliden och Rönnskär)

Då de fasta anläggningarna, anrikningsverket och Rönnskär, är väsentligt skilda från varandra behandlas de separat under varsin rubrik nedan.

Anrikningsverket i Boliden

Anrikningsverket domineras av stationär utrustning vilken redan är elektrifierad, dock stöds huvudprocessen av en intern lastbil, två hjullastare för materialförflyttning för att mata fickor och hantera materiallager. Utöver detta finns två grävmaskiner på arbetsplatsen för servicearbete. En naturlig beröringspunkt mellan maskiner och vägtransporter återfinns vid avlastningsfickan.

Utifrån ovan nämnt resonemang med låg daglig energianvändning på service- och supportmaskiner på anrikningsverket anses alla maskiner och bilar på området lämpliga för elektrifiering. Detta styrks även av befintlig elinfrastruktur, där ny elektrifierad utrustning analyseras tillsammans med befintlig.

Rönnskär

Stationär utrustning i Rönnskär utgör majoriteten av energiförbrukning och komplexitet i systemet, se figur 12, dessa är dock redan elektrifierade och omfattas därmed inte i analysen, förutom vad gällande existerande elinfrastruktur. Utifrån mobila

maskinperspektivet är Rönnskär fortsatt en komplex anläggning som består av flera delprocesser, så som smältverk, elektrolys, inlastning, omlastning, med olika material så som slig, slagg och elektronikskrot. Emellertid förenklas Rönnskär här till ett delsystem, detta innebär en väldigt diversifierad flotta av maskiner och fordon med olika arbetsuppgifter och hantering, allt från små servicemaskiner med pallgafflar till stora grävmaskiner och lastmaskiner med skopa. Följande uppdelning ur maskin- och fordonsperspektiv har gjorts i förstudien:

- Produktionsmaskiner, här inkluderas grävmaskin för slagghantering, hjullastare, större än 20t maskinvikt, för materialförflyttning inom Rönnskärsområdet samt dumper för upplagshantering.
- Supportmaskiner, här inkluderas hjulgrävare för rensning av tågagnar, hjullastare, mindre än 20t maskinvikt, för lättare materialförflyttning och pallhantering samt lastbilar för intertransport.



Figur 12. Översiktspild över Rönnskär, plats för Bolidens smältverk.

På grund av den högst diversifierade maskinflottan skiljer sig svårighetsgraden vad gällande elektrifiering av maskiner och fordon, dock gemensamt är att elinfrastruktur är tillgänglig inom området, vilket underlättar till viss grad men hänsyn till redan elektrifierad utrustning må tagas när nya elektrifierade maskiner och fordon införs i systemet. Utförd analys i förstudien gör förenklingen att dela upp maskinflottan enligt ovan där supportmaskiner kännetecknas av lägre maskinutnyttjande och arbetsbelastning och produktionsmaskinerna kännetecknas av högre maskinutnyttjande och arbetsbelastning. Detta medför att lägst tröskel för elektrifiering återfinns bland supportmaskiner medan produktionsmaskinerna utgör en större utmaning. Emellertid har inga hinder identifierats för elektrifiering av den totala maskinflottan inom Rönnskärsområdet. Dock på grund av komplexiteten i systemet behöver djupare analys göras i fortsättningsprojektet angående prioriteringsordning och angreppssätt.

Slutsats: gruvor och fasta anläggningar

God insikt gällande anläggningarna inom Bolidenområdet har införskaffats under förstudien. Inom kartläggningen av dagens verksamhet har det tydligt påvisats mognaden och lämpligheten beträffande elektrifiering av resterande verksamhet inom gruvindustrin. Detta på grund av den djupa kännedomen inom processer, material- och energiflöden inom Boliden. Utifrån initial analys, beskriven ovan, är i princip alla

stationära maskiner elektrifierade samt en delmängd av de mobila maskinerna, så som till exempel borrhugg. Resterande mobila maskiner och fordon anses, enligt ovan, vara lämpliga föremål för elektrifiering, där förenklat två maskingrupper har identifierats; produktionsmaskiner, vilka står för majoriteten av CO₂-avtrycket, och servicemaskiner, vilka utgör en utmaning gällande NO_x-avtrycket. Vad gällande de sistnämnda gör dess låga utnyttjandegrad och arbetsbelastning dem gynnsamma för elektrifiering, dock utgör de förstnämnda en större utmaning vad gällande utvidgning av befintlig elinfrastruktur. Emellertid kommer denna investering att fördelas på stor mängd utfört arbete, vilket medför en mindre påverkan på den totala operationella kostnadsbilden [kr/ton]. I en förlängning medför elektrifieringen eventuellt positiva sideeffekter på supportsystem, så som till exempel minskad ventilationssystemsutnyttjandegrad. Djupare analys krävs i fortsättningsprojektet dock indikerar förstudien och de initiala analyserna att en målbild nära kostnadsneutralitet i nollemissionsomställningen är rimlig. Däremot innebär att gå från energität diesel till batterielektrisk utrustning troligen en översyn av dagens arbetsprocesser och system, till exempel kan automation underlätta för dynamisk laddning och batteribytesystem kan öka maskintillgängligheten i vissa applikationer. Detta medför att djupare konsekvensanalys planeras utföras i fortsättningsprojektet vad gällande processförändringar vid randvillkoret elektrifierade mobila maskiner och fordon, både befintlig, redan elektrifierad utrustning och nya maskiner och fordon. Utredning angående policies har påvisat hög mognadsgrad inom berörd industri, varpå inga gap har påträffats, dock kommer bevakning fortskrida i ett eventuellt fortsättningsprojekt. Identifierade närliggande industrier som kan nyttiggöra resultat från ett fullskaligt demonstrationsprojekt är, men inte begränsat till, industriella applikationer så som återvinningsanläggningar och hamnar, ballasttillverkning, anläggnings- och infrastrukturprojekt. Resultaten är giltiga nationellt och internationellt, där fokus ligger på att ställa om från fossildrift till nollemission.

7.5 Analys av vägtransporterna samt demonstrationsbehov

Vägtransportanalysen är gjord i tätt samarbete framförallt mellan Boliden och Volvo, men även i dialog med representanter från de transportörer som är del av systemet. I ett tidigt läge i förstudien kom Boliden och Volvo överens om att fullständigt fokusera på Bolidenområdet och avvakta med ex. Gävle-Garpenberg till ett senare tillfälle. Den totala projektleveransen bedöms inte påverkas av denna avvikelse från projektansökan.

Analys av vägtransporter

Under studiebesöket till Boliden undersöktes bland annat last och lossningsplatser samt körning mellan Rönnskär och Boliden, hur lastning och lossning går till, vilka ekipage man använder idag, hur man kör och eventuella begränsningar i längd och vikt.

Malm-, slagg- och slig-transporterna ingår i ett investeringstungt industrisystem, som gör att man får anpassa sig till befintlig industri och infrastruktur. Lastbilarna kör idag i fasta flöden.

Lastning och lossningsplatserna är etablerade och går inte att ändra i ett projekt. Detta bestämmer längd och höjd på lastbärarna, då fickorna har den längd och höjd de har.

Vägnätet är väldigt bra, det har:

- Breda välhållna vägar.
- Bra parkeringsfickor anpassade för lastbilar, vilket möjliggör att chaufförerna kan gå runt bilen för inspektion.

- Många parkeringsfickor, vilket möjliggör att de kan stanna när det behövs.
- BK4 vägnät.
- I ett annat projekt har vi tillstånd att köra med 90 ton på större delen av vägnätet, enligt TSV 2024-10349.
- Väl lämpade för eldrift, eftersom det är lätt kuperat.
- Utmaning för eldrift är de stora temperaturskillnaderna och snö på vintern.

Förare som kör slagg- och slig-transporter behöver särskild utbildning för att få köra in på alla arbetsplatser. Alla förare som är inne på en arbetsplats, d.v.s. både inne på Rönnskär och inom gruv-området behöver ha en godkänd SSG (säkerhetsutbildning för entreprenörer i industrin) utbildning. Kör de blykoncentrat behöver de ha ADR utbildning. För de som kör i gruvorna så ska alla ha utbildning om räddningskammaren och användning av gasmask.

Chaufförerna har hög kompetens och stannar länge på samma arbetsplats. De kör idag samma lastbil varje dag och har utrustat dem personligt, både vad det gäller fast och rörlig utrustning/personliga saker. Detta gör att de tar väl hand om sina lastbilar och att de vet precis hur de fungerar och därmed reagerar direkt ifall något inte är som det brukar. Detta är en stor utmaning om det ska bytas bil vid varje laddning i framtiden.

Slutsatser kring vägtransporter är att:

- Mycket bra vägnät
- Fast lastning- och lossning-punkter
- Kompetenta och erfarna chaufförer
- Transportavstånden och vägarna är lämpliga för eldrift
- Temperaturskillnaderna en utmaning för eldrift
- Fordonskombinationerna måste passa i befintlig industristruktur

Idag kör de 4-axlig bil och 5-axligt släp, 74 ton, se bild nedan.



Figur 13. Lastbilsekipage som används i det aktuella systemet för transporter av slig och slagg.

Simulering av energibehov för vägtransporter

Den enskilt största tekniska utmaningen i att elektrifiera Bolidens transporter är att lösa energibehovet för fordonen, både tillräcklig lagringskapacitet på fordonet samt tillförsel av energi vid rätt tillfälle och på tillräckligt kort tid. En hel del analys och beräkningar har redan gjorts av Boliden, men för att bekräfta/komplettera detta mättes vägsträckorna

upp på plats m.h.a. GPS baserad loggutrustning från Volvo för att möjliggöra simulering av rutterna i Volvos utvecklingsverktyg.

Baserat på vägtransportanalysen gällande förutsättningar i form av fordonsvikter och vägsträckor samt input från både Boliden Minerals och Renfors åkeri om den flexibilitet som krävs i fordonsflottan, beslutades att fokusera simuleringsjobbet på den mest krävande rutten, dvs Boliden-Kristineberg tur och retur. Visserligen förväntas en justering av denna rutt i form av att de flesta transporter skall köra sand från Boliden till Maurliden för att sedan fortsätta till Kristineberg, men den blir mindre krävande ur ett energiåtgångs perspektiv.

Viktiga förutsättningar för bibehållen produktivitet och lönsamhet är att de elektrifierade fordonen kan bära med sig lika mycket eller mer nyttolast, och då batterielektriska fordon ofrånkomligt väger mer än fossildrivna, valdes att simulera transporter upp till 90 tons totalvikt. Dessutom simulerades påverkan av de viktigaste externa parametrarna, dvs temperatur samt rullmotstånd.

Summary

Results : Boliden – Kristineberg – Boliden

	Units	74t		90t	
		T = 15 °C Low RR	T = -15 °C High RR	T = 15 °C Low RR	T = -15 °C High RR
Energy consumed (total value)	kWh	502	626	576	720
Energy regenerated from motors	kWh	134	93	146	104
Energy consumed (net value)	kWh	368	533	430	616
Energy consumed (per driven distance)	kWh/km	2.7	3.4	3.1	3.9
Braking energy	kWh	45	43	70	60

Figur 14. Resultat av mätningar och simuleringar av energiförbrukning för olika typer av ekipage på sträckan Boliden – Kristineberg - Boliden.

Resultaten visar på ett stort span av energibehov (från 368 till 720kWh) beroende på temperatur och hur mkt regenerering som är möjlig (sämre vid halt underlag).

Som komplement simulerades även Boliden-Rönnskär tur och retur vilket är en kortare och därmed mindre krävande rutt, men även här ses en stor påverkan på energiförbrukningen beroende på de externa faktorerna

Summary

Results : Rönnskärverket – Boliden – Rönnskärverket

	Units	74t		90t	
		T = 15 °C Low RR	T = -15 °C High RR	T = 15 °C Low RR	T = -15 °C High RR
Energy delivered and lost by the ESS	kWh	322	397	375	460
Energy regenerated by the motors	kWh	89	71	100	78
Energy consumed (net value)	kWh	233	326	274	382
Net energy consumed (per driven distance)	kWh/km	2.2	3.0	2.5	3.5
Braking energy	kWh	50	42	68	58

Figur 15. Resultat av mätningar och simuleringar av energiförbrukning för olika typer av ekipage på sträckan Rönnskär – Boliden - Rönnskär.

På grund av det relativt komplexa logistiksystemet av malm, slig/slag och sand behöver en djupare analys göras av det kompletta transportsystemet. Denna analys som får ingå i ett fortsättningsprojekt bör innehålla hur systemet kan optimeras och då inte bara när det är komplett elektrifierat utan även hur en mixad flotta bäst optimeras för att ge bästa totalekonomi.

Malmrutterna från Kankberg respektive Renström till Boliden mättes inte upp med loggutröstning, men bedöms ha liknande förutsättningar som sträckan Kristineberg till Boliden och därmed liknande energiförbrukning/km. Baserat på det antagandet samt information om längden på de mycket kortare sträckorna har en ungefärlig total energiförbrukning räknats ut, vilken då också är avsevärt lägre, se tabell nedan.

Tabell 2. Tabell över energiförbrukning, körsträckor etc. för samtliga Boliden rutter

Rutt	Körsträcka (km)	Körtid	GCW	Förhållanden	Energiförbrukning per km (Netto)	Energiförbrukning totalt (Netto)
Malmtransport						
Boliden-Kristineberg, ToR	180	3 h	74	Varmt/torrt	2	364
			74	Kallt/fuktigt	2,9	526
			90	Varmt/torrt	2,3	425
			90	Kallt/fuktigt	3,3	610
Boliden-Kankberg ToR	22		74	Varmt/torrt	2	44
	22		74	Kallt/fuktigt	2,9	64
	22		90	Varmt/torrt	2,3	51
	22		90	Kallt/fuktigt	3,3	73

Boliden - Renström ToR	36		74	Varmt/torrt	2	72
	36		74	Kallt/fuktigt	2,9	104
	36		90	Varmt/torrt	2,3	83
	36		90	Kallt/fuktigt	3,3	119
Slagg och slig						
Boliden-Rönnskär ToR	108	2h 25min	74	Varmt/torrt	2,2	233
			74	Kallt/fuktigt	3	326
			90	Varmt/torrt	2,5	274
			90	Kallt/fuktigt	3,5	382

Sammanfattningsvis kan konstateras att för att lösa det svåraste fallet Boliden-Kristineberg tur och retur utan mellanladdning behövs ett fordon med avsevärt mycket större energilager än vad som finns på marknaden idag, medan övriga sträckor skulle klarar sig med ett fordon som finns tillgängligt idag. Tillkommer gör såklart komplexiteten kring hur själva logistikupplägget ser och hur mycket tid som finns för laddning vilket i praktiken troligen innebär att det med dagens elektrifierade produkter är svårt att upprätthålla produktiviteten och lönsamheten. I ett fortsättningsprojekt behövs både fortsatt fördjupad simulering av det kompletta logistiksystem samt kompletterande verklig körning med specialbyggt fordon med tillräckligt med energi även för de svåraste fallen.

Analys av möjliga vagnskonfigurationer

Baserat på analysen av dagens transportsystem, simuleringar och dialog med transportör, gjordes en initial analys av möjliga elektriska fordonskombinationer som skulle kunna utföra transportuppdraget.

1. Behåll lastbärarnas storlek.
2. Kombinationer som passar i befintliga lagkrav
3. Kombinationer som skulle kunna köras på tillstånd för teknisk provning från Transportstyrelsen.
 - a. Kompensera för den adderade vikten från eldrivlinan.
 - b. Längre kombinationer med ett extra släpfordon.

Se tabell nedan med de olika kombinationerna:

74 ton (Inom befintliga lagkrav)

- Jämnlast + släp (kombination 1)
- Dragbil + link (kombination 2)

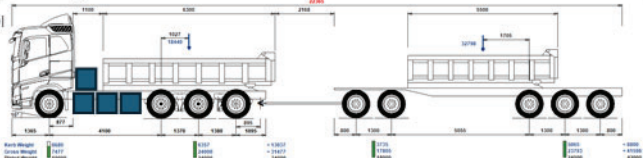
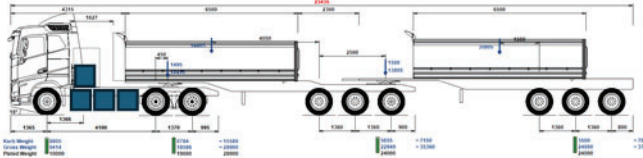
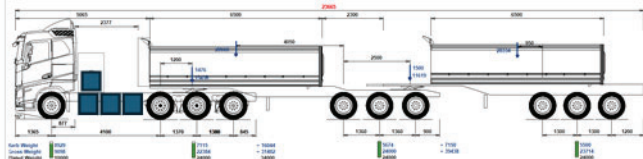
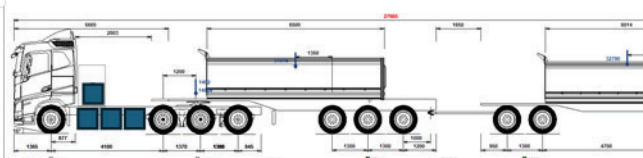
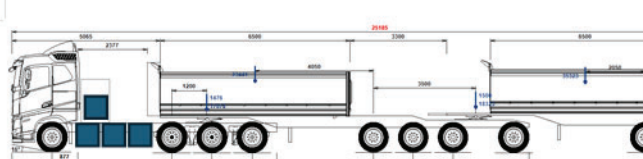
80 ton (Kompensation för el-drivlina)

- Dragbil med link + trailer (kombination 3)

90 ton (4-axelgrupp och flera släp)

- Dragbil, trailer + släp (kombination 4)
- Drag med link + trailer (kombination 5)

Tabell 3. Illustration över de identifierade kombinationer aktuella för tester i systemdemonstrationen.

Namn	Ritning	maxvikt
1, Nordisk kombination		74t
2, B-dubbel		74t
3, B-dubbel		80t
4, A-dubbel		90-93t
5, B-dubbel		90t

I tabellen är framgår illustrationer på hur batterier skulle kunna placeras, hur de placeras på eventuella försöksfordon kommer att utredas i huvudprojektet.

För vikter över 74 ton behövs tillstånd för teknisk provning av Transportstyrelsen, detta är en process som initieras av transportören ihop med Volvo. Trafikverket och Transportstyrelsen har informerats om att en ansökan kan komma i närtid.

4-axliga gruppen i kombination 5 är laglig i Finland och vi skulle behöva denna även i Sverige.

Val av kombination i ett huvudprojekt kommer att göras i det projektet.

Analys av laddsite

Boliden har slutfört en förstudie med syftet att utvärdera vad som krävs för att förverkliga batterielektriska fordon (BEV) på allmän väg inom Boliden-området. Studien innefattande huvudsakligen nödvändig laddningsinfrastruktur (placering, design, förutsättning) men även förändring i upphandling samt förbättring simulering och beräkning.

Studien fann att BEV-transport är lönsam vid ett dieselpriis mellan 16–17,5 SEK/l, exklusive moms. Lönsamheten var starkt beroende på investeringskostnad laddhubb

och inköp dyrare fordon. De nödvändiga laddningsplatserna identifierades vid Anrikningsverket, Kristineberg samt eventuellt Rönnskär, beroende på utvecklingen av batterikapacitet. Det rekommenderas att Boliden erbjuder de nödvändiga laddningsuttagen för att motverka monopol. Transportörer bör utbildas med nyckeldata om energiförbrukning och körsätt. Kontraktstiden bör anpassas på grund av den längre livslängden på fordon med fordonsbyte (stillestånd laddtid).

Snabbare laddning innebär mindre ställtider för fordonen. Därför ansågs det nödvändigt att laddhubben förbereds för MCS laddning. Gruvan är en levande verksamhet varav det är nödvändigt att designa en flexibel laddhubb. Ett krav var att det skulle vara möjligt att byta ut CCS-snabbladdningshandskar mot MCS-kontakter, exempelvis genom att byta dispenser och öka kraftförsörjning. Studien beräknade behovet av drift- och nattladdningsuttag (laddning under längre pauser, parkerade fordon).

Anrikningsverket, som en tydlig knypunkt, skulle erbjuda 32 ladduttag varav 12st snabbladdning upp mot 4MW. Den stora mängden är för natt-/depåladdning. Kristineberg samt Rönnskär ansågs erbjuda laddningsmöjlighet för toppladdning, med 3–5 uttag och 2MW samt 1–2 uttag och 400kW. Implementering av BEV behöver ske i avtalsförnyelse, och beräknades som stegrande från 25% 2027 till 100% 2029.

Som nästa steg har Boliden initierat en mer detaljerad studie av laddinfrastrukturen. Syftet är att ta fram en tydligare design för laddhubben och att noggrant kalkylera slutkostnaden med en felmarginal på +/-10 %. Rapporten betonar vikten av att denna fördjupade analys ger ett stabilt underlag inför framtida beslut om investeringar och genomförande tillsammans med utförandeprojektet.

Eventuella byggandet av laddinfrastrukturen stämmer inte helt överens med projektutförandet. En temporär laddningsplats planeras första året innan några permanenta ladduttagen från studien är byggda. Den temporära laddningsplatsen kan helt eller delvis återanvändas till en permanent laddhubb samt kommer att ge värdefull insikt om design.

Påverkan av service och reparation vid elektrifiering

Baschassiet för en batterielektrisk lastbil och en traditionell dieseldriven lastbil är väldigt likvärdigt utifrån ett service och reparationsperspektiv. Den största skillnaden blir för drivlinan; kraftelektronik, elmaskiner och batterier jämfört med förbränningsmotor, bränsle-, ureasystem och tankar.

Utifrån ett systemperspektiv är förbränningsmotorsystemet mer komplext än ett BEV system p.g.a. fler rörliga delar, komplext bränsleinsprutningssystem och efterbehandlingssystem. BEV systemet innehåller mer komplex elektronik, termiskt system mm som är mer komplext vid tillverkningen av fordonet.

Slutsatsen blir därmed att för icke drivlinerelaterade servicepunkter som tex luftfilter, hjulupphängning etc. så blir det ingen påverkan vid elektrifiering. För drivlinan däremot kommer servicebehovet bli mindre för ett batterielektriskt fordon. Däremot kommer reparationer relaterat till batterier som skadas vid en eventuell olycka som bli mer avancerat p.g.a. den höga vikten och de extra säkerhetsrutiner som erfordras. Den batterielektriska tekniken är fortfarande i sin linda och mer erfarenhet och bättre batterikunskap i framtiden kommer minska dessa utmaningar. Ett annat mycket viktigt område att fördjupa sig inom är batterilivslängd, batteriet är en central del av systemet som dessutom är väldigt dyr som därmed får väldigt stor påverkan på TCO (Total Cost of Operation) för hela logistikupplägget. Batterier åldras främst genom totalt "genomlupen" energi samt kalendertidsåldring, men åldringen påverkas även av temperaturer, vibrationer mm. Denna typ av tunga och krävande transporter förbrukar

väsentligt mycket mer energi än övriga "vanliga" transporter på publik väg. Det blir därför av yttersta vikt att utvärdera batteri-livslängd/hälsa under verkliga förhållanden i vagn för de berörda applikationerna i ett kommande huvudprojekt. Projektet kommer ge avgörande kunskap för att avgöra funktionalitet och lönsamhet för det kompletta batterielektriska logistikekosystemet samt utvärdera val av batteriteknologi. Totalt sett kommer ett batterielektriskt fordon bättre ut ifrån ett serviceperspektiv än ett motsvarande förbränningsmotorfordon för samma typ av applikation.

Byte av dragbil

Totalt installerad energi på fordonen kombierat med förbrukningen per km, laddtid, pauser tillgängliga för laddning samt kör och vilotider ger en komplicerad funktion som skall optimeras för de beskrivna rutterna. Även lastkapaciteten påverkas eftersom den blir lägre om man installerar mer (tyngre) batterier. Som visas i tabell 2 ovan varierar körsträckorna från gruvorna till Bolidenområdet från 22km till 180km. Eftersom samma fordon utnyttjas för de i sträcka kraftigt varierande körningarna ger det en ytterligare ökad komplexitet när man skall dimensiona logistiksystemet. Dessa transporter med relativt hög GCW förbrukar i många fall mer energi än vad man kan ersätta via laddning på de gängse pauserna. Denna utmaning kan man lösa genom att man istället byter själva dragbilen. På den centralt placerade laddplatsen finns det ett antal övertaliga fordon som står på laddning. För att korta "laddtiden" byter man helt enkelt fordon, man pakerar det fordon man precis kör och ansluter till laddaren och byter till ett redan full-laddat fordon. Man kan minska antalet efterfordon genom att man kopplar av/på dessa i samband med fordonsbytet, det finns både för och nackdelar med detta vilket behöver utredas mer. En eventuell efterfordons av-/påhängning ställer höga krav på smidighet, automation och ergonomi. I fortsättningsprojektet kommer de planerade pilotbilarna ge input för vidare studier om vilken kvot av extra bilar som behövs och hur det påverkar TCO. De olika logistiska lösningarna behöver optimeras utifrån ett komplett TCO perspektiv.

Eftersom tjänstevikten ökar på grund av elektrifiering av transporter behöver en ökad maximal tillåten bruttovikt utforskas för att bibehålla dagens produktivitet. Ca 4-5 ton mer kommer tjänstevikten uppskattningsvis öka för den mest krävande sträckan bland transporterna, Kristineberg- Boliden. Idag utförs transporterna med 74t maximal bruttovikt. Ett antal förslag på kombinationer togs fram som skulle kunna med tillstånd köras med 80-90t bruttovikt. Att öka max bruttovikt till 80t skulle alltså medföra ungefär samma lastvikt och 90t skulle öka lastvikten med ca 7-8t jämfört med 74t diesel. Energiåtgång skulle öka med ca 7% på grund av ökning av bruttovikt från 74 till 80 ton. Att öka bruttovikt från 74 till 90 ton ger ökning på ca 19%. Detta utifrån erfarenhet från tidigare försök med ellastbilar, men kan variera på grund av yttre omständigheter som tex väglag.

För ett fortsättningsprojekt behöver en ansökan om tillstånd för teknisk provning av tilltänkta kombinationer upp till 90 ton. Inom fortsättningsprojekt behövs vidare analys och dialog med myndigheterna om hur Boliden skall kunna få tillstånd att köra med 80-90 ton i kommersiell drift bortom projektfasen.

7.6 Planering av systemdemonstrationen och förberedelser

Under förberedelseprojektet har stort fokus lagts på att förstå och beskriva det underliggande produktionssystemet som ska bli föremål för den tilltänkta systemdemonstrationen. Konsortiet har genom studiebesök, tidigare framtaget material samt intervjuer kunna bygga upp en bild över produktionssystemet, de ingående

delsystem samt de olika processer som pågår inom dessa. Beskrivningen över det aktuella systemet inklusive gruvor, de fasta anläggningarna samt vägtransporterna återfinns i Kapitel 7.1.

En drivkraft bakom elektrifiering inom gruvnäringen och särskilt i underjordsgruvorna är de utsläpp som uppstår vid användning av förbränningsmotorer. I förberedelseprojektet har de gällande regelverken kring arbetsmiljö i gruvor uppmärksamats och undersökts. Avgaser från dieselmotorer är skadliga för människors hälsa och har klassificerats som cancerframkallande av Internationella cancerforskningsinstitutet (IARC) [10]. I Sverige regleras exponering för dieselavgaser på arbetsplatser av Arbetsmiljöverket, som fastställer gränsvärden för tillåtna nivåer av luftföroreningar i arbetsmiljön [11]. För att bedöma om nivåerna av dieselavgaser ligger inom tillåtna gränser mäts två nyckelindikatorer: elementärt kol (EC) och kvävedioxid (NO₂).

I Tabell 4 anges specifika gränsvärden för dessa ämnen. Noterbart är att:

- elementärt kol kommer att bli en reglerad parameter från och med februari 2026, med ett gränsvärde på 0,05 mg/m³ beräknat som ett 8-timmars tidsvägt genomsnitt.
- kvävedioxid har varit reglerad under en längre tid, men de tillåtna exponeringsgränserna skärptes år 2023 för att harmonisera med uppdaterade EU-direktiv. Det nya gränsvärdet från 2023 är 0,96 mg/m³ över ett 8-timmars tidsvägt genomsnitt.

Tabell 4: Gränsvärden för dieselavgaser i arbetsmiljö

Ämne	Gränsvärde* [mg/m ³] (Tidigare värde)	Kortidsgränsvärde [mg/m ³]	Gäller från**	Kommentarer
Elementärt kol	0,05 mg/m ³	-	21 februari 2026	cancerframkallande
Kvävedioxid	0,96 mg/m ³ (2 mg/m ³)	1,9 mg/m ³ (10 mg/m ³)	21 augusti 2023	

*Den del av arbetstiden som mäts ska vara representativ för exponeringen. Exponeringen ska beräknas som ett tidsvägt genomsnitt. En normal arbetsdag är 8 timmar, vilket innebär att mätningar behöver genomföras under minst 75 % av denna tid.

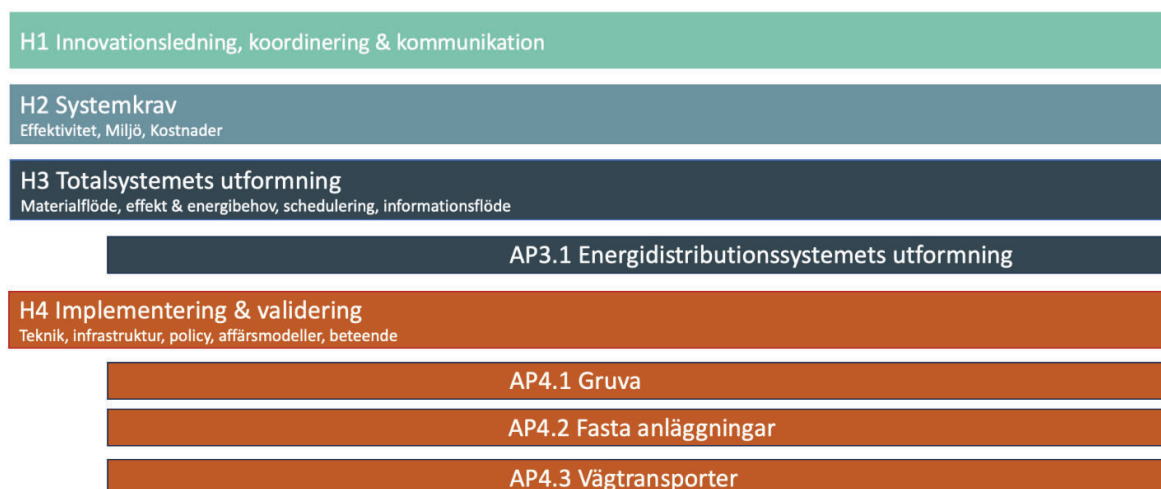
**vid gruvdrift under jord.

Boliden och projektkonsortiet har bedömt elektrifiering som en viktig åtgärd för att kunna åstadkomma de uppsatta miljömålen. Förbättrad arbetsmiljö, minimering av behovet för produktionsstopp, minskade rörliga kostnader kopplade till ventilation var några av de förväntade aspekter innan genomförande av förberedelseprojektet. Det gällande regelverket kopplat till exponeringen för olika typer av utsläpp är en aspekt som har fått ökad betydelse under förberedelseprojektets gång vilket gör att den kommande elektrifieringen får ytterligare ett argument till att genomföras och påvisar vikten av att sprida kommande lärdomar till den övriga gruvnäringen.

Förberedelseprojektet har genom undersökningar, analys, simuleringar och observationer av det aktuella systemet kunnat identifiera platser i det totala systemet som är särskilt lämpliga för elektrifiering och således demonstrationer inom ramen för ett huvudprojekt. Demonstrationerna i det kommande huvudprojektet föreslås att delas upp utifrån det aktuella logistik- och produktionssystemets subsystem i form av gruvor, fasta anläggningar och vägtransporter. Fasta anläggningar delas i sin tur upp i anrikningsverket och smältverket. Vidare delas gruvor upp i underjordsgruvor och återställning av dagbrott. Demonstrationer föreslås att genomföras i tre arbetspaket

utifrån subsystemen där demonstrationen ska ske: gruva, fasta anläggningar och vägtransporter. Uppdelningen sker för att kunna säkerställa att lösningen testas så nära behovsägarna (kravställare och användare) som möjligt. Fokus kommer att föreligga i att förstå hur lösningar verkar inom de aktuella delsystemen i form av enskilda arbetsprocesser. Konsortiet bedömer att det även skapar goda förutsättningar för att utvärdera de olika lösningarna utifrån de fem systemperspektiven då man verkar i det aktuella delsystemet tillsammans med behovsägarna. Samtliga demonstrationsarbetspaket ska generera underlag för hur det totala systemet ska kunna inkorporera de nya lösningarna och hur en storskalig elektrifiering inom gruvnäring och relaterade processer kan genomföras.

Ett arbetspaket (AP1) föreslås för innovationsledning, koordinering och kommunikation för effektiv styrning av projektet och spridning av projektresultat utifrån den i förberedelseprojektet framtagna kommunikationsstrategin och vidareutvecklad kommunikationsplan. Ett andra arbetspaket (AP2) föreslås för insamling av de systemkrav som ställs i de olika delsystemen och dess överliggande subsystemen samt vilka konsekvenser det medför för totalsystemet. Det handlar om krav på själva tekniska lösningar från de olika typer av användare och kravställare som är direkt berörda av de föreslagna lösningar men även andra kravställare i systemet som har en önskad produktionstakt som den huvudsakliga motivationen. Insamlingen av dessa krav ska vidare användas som en input till beskrivningen över det totala systemet i AP3 samt hur lösningarna matchar kraven inför demonstrationerna i AP4. Ett tredje arbetspaket (AP3) föreslås där en designhypotes över det totala elektrifierade systemet som utgör föremål för demonstrationer ska tas fram med fokus på effekt- och energibehov, planering och styrning samt databehov. Det underliggande materialflödet i systemet kommer att vara i fokus i syfte av att upprätthålla en önskad produktionstakt och uppnå en TCO-neutralitet med lösningarna. Utformningen av energidistributionssystemet kommer att behandlas i ett särskilt arbetspaket (AP3.1) med hjälp av optimeringar och simuleringar. Implementeringen och valideringen av de tänkta lösningarna ska ske i ett fjärde arbetspaket (AP4). Förberedelserna och analyserna sker i AP4 medan demonstrationerna sker uppdelade på de respektive subsystemen och hanteras i respektive arbetspaket. Resultat från demonstrationerna ska användas som input till AP3 medan lösningarnas funktion och prestanda ska utvärderas utefter de fem systemdimensionerna och kraven erhållna i AP2. I AP4 ska resultaten från demonstrationer omsättas i generella slutsatser för gruvnäringen i stort relevanta för aktörer nationellt och internationellt samt för aktörer i angränsande industrier för att kunna accelerera lösningarnas implementering och uppnå en högre transformationshastighet.



Figur 14. Föreslagen projektstruktur för huvudprojektet.

De tekniska lösningar i form av produktions- och serviceutrustning (både maskiner och fordon) som kommer att föreslås för tester inom systemdemonstratorn befinner sig på tre olika mognadsnivåer (TRL-nivå). De mest mogna lösningar är redan i serieproduktion, eller ligger väldigt nära marknadsintroduktion. I den andra nivån finns produkterna som kommer att kunna introduceras på marknaden om ett par år. I den tredje nivån återfinns koncept- och prototyplösningar som identifierats och kräver vidare utveckling för nästa generations fordon, maskiner och lösningar till gruvnäringen. Konsortiet anser att alla tre nivåer av lösningar är viktiga att driva vidare inom en framtida systemdemonstrator för att i slutändan höja den totala systemlösningens mognadsnivå (SRL-nivå). Fokus inom demonstrationerna blir på att förstå hur systemets mognad kan öka för att påskynda omställningen till elektrifierade lösningar i gruvrelaterade processer för brytning, materialhantering, service och transporter. Demonstrationer som föreslås att ske kopplat till vägtransporter kommer baseras på anpassningar av befintliga batterielektriska lösningar för transporter av malm, slig, slagg och sand med målet om att ta fram ett ändamålsenligt batterielektriskt ekipage och minimering av logistikförluster.

Konsortiet i förberedelseprojektet har utökats till totalt 15 parter. Behovsägare utökas från Boliden Mineral som är kravställare utifrån sin roll som ägare av det aktuella produktions- och logistiksystemet till att även inkludera behovsägare i form av användare och kravställare gentemot fordonsleverantörer. Gruvbolaget LKAB har attraherats till att delta i systemdemonstrationerna och analyserna i huvudprojektet i sin roll som användare och kravställare. Underentreprenörer som brukar maskiner och fordonen i de olika delsystemen har attraherats. En komponentleverantör kommer att involveras tillsammans med ett mätföretag för att övervaka och utvärdera de specifika fordonskomponenters prestanda under demonstrationerna. Den lokala återförsäljaren för lastbilar kommer att involveras för att utgöra fordonsleverantörs förlängda arm och upprätthålla ett bra informationsflöde, säkerställa en hög tillgänglighet på de implementerade lösningarna samt förmedla vidare innovationsbehov. Akademin föreslås att involveras för ett arbete kopplat till dimensionering av, och schemulering inom, energisystemet som krävs för en storskalig omställning av den aktuella fordons och maskinflottan i det aktuella systemet med hjälp av simulering. Ett energibolag som ska bidra med sin kompetens avseende energidistribution och laddinfrastruktur föreslås att delta. Energibolaget kommer att genom sitt eldistributionsbolag bidra med

expertis som ska användas i en gemensam utvärdering av energiförsörjningslösningar. Slutligen föreslås offentliga sektorn i form av kommunerna där anläggningarna är belägna samt Trafikverket att involveras som referensparter för en kontinuerlig dialog med konsortiet kring behov av tillstånd för framförande av de batterielektriska ekipagen som ska köras inom ramen för demonstrationen på allmän väg.

Projektförslaget kommer att skickas in till utlysningen FFI Accelerera för systemdemonstratorer hösten 2025. Huvudprojektet föreslås att starta 1 december 2025 och pågå till 30 november 2028.

7.7 Avslutande kommentarer

I det efterföljande huvudprojektet föreslår projektkonsortiet en systemdemonstration av lösningar och koncept för elektrifierade transporter och hanteringsutrustning i form av tunga lastbilar och arbetsmaskiner samt till dessa kopplade laddlösningar. För att säkerställa acceptans för den nya tekniken föreslås deltagande från underentreprenörer som i regel kör de olika typer av fordon och maskiner i det aktuella systemet. Systemutmaningar från de fem systemperspektiven har blivit identifierade i förberedelseprojektet och dessa kommer att adresseras i det kommande huvudprojektet. De olika processer och miljöer kopplat till det aktuella produktions- och logistiksystemet samt gruvmiljö i stort skapar en utmanande applikation för elektrifierade lösningar. De lösningar som har identifierats som mogna att implementeras i det aktuella systemet i det kommande projektet kommer att nyttjas av behovsägarna i form av uppdragsgivare och användare av lösningarna i form av fordon, maskiner och laddlösningar. Merparten av de lösningar som ska introduceras i projektet ligger på höga TRL-nivåer varför projektets huvudfokus kommer att vara på att identifiera och adressera utmaningar kopplat till introduktionen av dessa lösningar i ett system. Där lösningar med hög teknisk mognadsgrad saknas avser projektet även inkludera lösningar av lägre teknisk mognadsgrad för att bygga kunskap om nästa generations fordon, maskiner och supportsystem. Lärdomar som huvudprojektet förväntas att ge kommer att vara av stor betydelse för fortsatt fordons- och maskinutveckling och de kringliggande delsystemen så som laddning, planering och styrning. Stor vikt kommer att läggas vid att översätta projektresultaten till en extern kontext bortom det aktuella systemet genom deltagande från andra gruvbolag i projektet och andra forum både nationellt och internationellt. Vidare disseminering planeras till industrier där resultaten kan replikeras och nyttjas för vidare påskyndning av omställningen till nollemission.

Fokus för det kommande huvudprojektet föreslås vara produktions- och logistiksystemet i Bolidenområdet samt flera olika subsystem hos LKAB. Det skapar förutsättningar för att studera introduktionen av de föreslagna lösningar i ett större system som sträcker sig från gruvbrytning till transport av färdig produkt och därmed täcka flera delar av de arbeten och processer som återfinns inom gruvnäringen. Det skapar även förbättrade förutsättningar för att kunna generera relevanta resultat för en större del av gruvnäringen och utökar projektets potential. Bolidens gruva i Garpenberg att bli ett föremål för demonstrationer i det kommande projektet. Transportflödet i Kevitsa, Finland kommer att inkluderas i omfånget av huvudprojektet i form av en on-site analys av det aktuella vägtransportsystemet. Demonstrationer kring autonoma lösningar kommer att hållas utanför huvudprojektet och fortsätta inom andra pågående insatser. Fokus för huvudprojektet kommer därmed att vara på analys och implementering av elektrifierade lösningar.

8 Spridning och publicering

8.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	I förberedelseprojektet har konsortiet undersökt och beskrivit det aktuella produktions- och logistiksystemet. Genom beräkningar och simuleringar har specifika lämpliga processer i de olika delsystemen identifierats för demonstrationer i huvudprojektet. Systemutmaningar i form av exempelvis behov av ändrade arbetsprocesser samt ökat effekt- och energiförsörjning för att möjliggöra omställningen till elektriska lösningar har identifierats. Dessa utmaningar kommer att adresseras i det efterföljande huvudprojektet och kommer att bidra till fortsatt fordonsutveckling och vidare kommersialisering av de testade lösningarna.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	De initiala analyser i förberedelseprojektet och vidare tester förväntas bidra till vidareutveckling av de prototyper och koncept i form av maskiner, fordon och supportsystem som föreslås bli föremål för systemdemonstrationen.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Demonstrationer av de lösningar i form av fordon och maskiner som befinner sig på de högre TRL-nivåerna förväntas generera input till fortsatt utveckling av dessa och den efterföljande kommersialiseringen.
Introduceras på marknaden	X	I den efterföljande demonstrationen föreslås en mix av lösningar som befinner sig på höga TRL-nivåer. Syftet med demonstrationerna är att öka kunskap om hur nivån för det systemet där dessa ska demonstreras ska kunna öka för att påskynda marknadsintroduktionen. Marknadsintroduktion av delar av systemlösningen förväntas ske inom 2-3år efter fortsättningsprojektets avslut.
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut	X	Konsortiet i förberedelseprojektet har identifierat behov av att ta fram ändamålsmässiga lastbils kombinationer för elektrifierade malmtransporter på väg. För att kompensera för ökad totalvikt för den elektriska drivlinan och nyttolasten kan tyngre lastbils kombinationer än de tillåtna på det aktuella vägnätet blir aktuella. Demonstrationerna av dessa kommer därmed generera underlag till beslutsfattare om lämpligheten av dessa ekipage, deras påverkan på väginfrastrukturen och konsekvenserna för andra trafikanter.

Den initiala analysen, beräkningar och simuleringar som har genomförts inom ramen för förberedelseprojektet kopplat till vägtransporterna har i sin tur koppling till FFI-finansierade projektet DHEELS. Projektet DHEELS syftar till att testa och påskynda introduktionen av längre och tyngre fordonskombinationer på allmän väg i Sverige. Ett

antal fordonskombinationer bestående av med batterielektriska lastbilar, konventionella lastbilar med fossilfria drivmedel samt e-trailers samt testas i olika tillämpningar som timmertransporter, volymtransport och containertransporter. De initiala resultaten från OREEL som pekar på ett behov av framtagande av en ny fordonskombination för gruvnäringens ändamål för möjliggörande av batteridrift, tas tillvara i DHEELS projektet då flera organisationer inkl. Volvo Technology och Volvo Trucks deltar i båda projekten. Eftersom malm, slig, slagg och sandtransporterna i Bolidens system utgör ett utmanande fall kommer lärdomar från utveckling och drift av denna typ av kombination bidra till fortsatt fordonsutveckling och utvidgning av applikationer för batterielektriska tunga lastbilar.

8.2 Publikationer

Resultaten från förberedelseprojektet har inte lett till några vetenskapliga publikationer eller publikation i form av konferensbidrag vilket har inte heller varit målsättningen för projektet. Det efterföljande huvudprojektet kommer att innehålla specifika leveranser kopplade till vetenskapliga artiklar, rapporter och konferensbidrag för en effektiv och bred dissemination av projektresultat och omsättning av dess till en extern kontext utanför Bolidens produktions- och logistiksystemet.

9 Slutsatser och fortsatt forskning

Projektkonsortiet har gemensamt etablerat en bas för en framtida systemdemonstration inom det aktuella produktions- och logistiksystemet i Bolidenområdet. Konsortiet har undersökt det aktuella systemet och identifierat de olika delsystemen där det finns särskilt gynnsamma förutsättningar för demonstration och vidare uppskalning i närtid. Projektkonsortiet har utökats med fler behovsägare i form av användare och kravställare, representanter från offentliga sektorn, energibolag, representanter från akademien och forskningsorganisationer, återförsäljare och komponentleverantörer för att gemensamt skapa goda förutsättningar för att kunna adressera de olika systemutmaningarna. Resultaten från systemdemonstratorn bedöms vara av stor nytta för andra verkande aktörer inom gruvnäringen nationellt och internationellt, samt angränsande industrier. Potentialen är stor med tanke på det totala antalet underjordsgruvor i världen samt intresset för att elektrifiera dessa i högre grad utifrån de förväntat erhållna fördelarna i form av bland annat förbättrad arbetsmiljö och besparingar i rörliga kostnader för ventilation.

Spridning av resultaten föreslås att ske genom vetenskapliga- och konferensartiklar, rapporter samt genom de forum där behovsägare i form av gruvbolag och användare inom projektet deltar. Behov för en särskild forskningsinsats har identifierats i form av framtagandet av en total behovsbild för energiförsörjning i de olika delsystemen. Huvudprojektet avser att bidra till detta genom en forskningsinsats i form av simulering av behoven utifrån de arbetsprocesser som sker i syfte av att beskriva de gapen och avvägningar som behöver iaktas i dimensioneringen av ett helelektrifierat system för underjordisk gruvdrift och vid de fasta anläggningarna. I tillägg har behov identifierats i form av att undersöka hur elektrifieringen och energiförsörjningen behöver interagera med planering och flottstyrning för att säkerställa de önskade produktionsnivåerna och inte introducera logistikförluster. I tillägg behöver behoven av digitala informationsflöden iaktas kopplat till planering och övervakning. Systemdemonstratorn förväntas bidra till att beskriva de kraven som ska ställas på de olika fordon och arbetsmaskiner som ska

verka inom systemet vilka ska föras vidare till fortsatt utveckling av fordon och systemlösningar samt beskriva kommande innovationsbehov. Slutligen har konsortiet identifierat utrymme för test av olika energiförsörjningslösningar för att bidra till identifieringen och utformningen av det optimala sättet för att ladda fordonen och arbetsmaskiner sett till de krav som systemet ställer.

10 Deltagande parter och kontaktpersoner

Deltagande organisationer	Kontaktpersoner	E-Mail
Boliden Mineral	Dennis Forslund	dennis.forslund@boliden.com
CLOSER vid Lindholmen Science Park	Nikita Zaiko	nikita.zaiko@lindholmen.se
Volvo Construction Equipment	Bobbie Frank	bobbie.frank@volvo.com
Volvo Technology	Per Bengtsson	per.bengtsson@volvo.com
Volvo Trucks	Per Hasselberg	per.hasselberg@volvo.com

11 Referenser

[1] SGU. (2025) *Bergverksstatistik 2024*.

<https://resource.sgu.se/dokument/publikation/pp/pp202501rapport/pp2025-1-rapport.pdf>

[2] Trafikanalys. (2025) *Lastbilstrafik 2024*.

<https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/lastbilstrafik/2025/lastbilstrafik-2024.xlsx>

[3] Boliden. (2025) *Strategi och mål*.

<https://investors.boliden.com/sv/investerare/boliden-som-hallbar-investering/strategi-och-mal>

[4] CLOSER (2023) REEL. Regional electrified logistics. Case overview report.

<https://closer.lindholmen.se/sites/default/files/2024-01/reel-report-202312.pdf>

[5] CLOSER (2025) DHEELS. Demonstration av högtenergieffektiva logistiksystem

<https://closer.lindholmen.se/projekt/dheels>

[6] LBC Frakt (2025) LBC Frakts världsunika elektrifierade flisbil.

<https://lbcfrakt.com/nyheter/lbc-frakts-varldsunika-elektrifierade-flisbil/>

[7] Global data (2025) *Development of Electric Vehicles in Surface & Underground Mining, 2025*

[8] Volvo Lastvagnar (2025) Boliden Elektrifierar Gruvan. <https://www.volvotrucks.se/sv-se/news/magazine-online/2025/mar/Boliden.html>

- [9] Pettersson, A. (2025) *Bolidens gruva har byggts ut – invigd med pompa och ståt: Stolt.* Norran. <https://www.norran.se/nyheter/kristineberg/artikel/bolidens-gruva-har-byggts-ut-invigd-med-pompa-och-stat-stolt/jdov58vl>
- [10] International Agency for Research on Cancer (IARC) (2012). *IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic.* Lyon: World Health Organization. <https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr213>
- [11] Arbetsmiljöverket (2023) *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd (AFS2023:14 om gränsvärden för luftvägsexponering i arbetsmiljön.* <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202314/>