

HÅLLBAR TUNN-EL: STRATEGI FÖR HÅLLBAR TUNNELDRIVNING I BYGGBRANSCHEN GENOM ELEKTRIFIERING

Maria Johansson

Sandra Frosth

Tobias Robinson

Ann Segerborg-Fick

Omslag: Effektbehov under en sprängcykel.

Visas per timme med start kl. 06:00 på morgonen för en sprängcykel som är ett dygn lång. Helfyllda fält representerar eldrivna maskiner, och streckade fält dieseldrivna (servicebil, lastbil och hjullastare). (Figur 3 ur rapporten).

HÅLLBAR TUNN-EL: Strategi för hållbar tunneldrivning i byggbranschen genom elektrifiering

Sustainable tunnels through strategic electrification

Maria Johansson, Ecoloop

Sandra Frosth, Ecoloop

Tobias Robinson, Ecoloop

Ann Segerborg-Fick, Ecoloop

FÖRORD

För att nå de svenska och internationella klimatmålen behöver alla sektorer i samhället fasa ut fossila bränslen. Elektrifiering, att ersätta bränsle drivna maskiner med eldrivna, är en delösnings som ger flera fördelar; med eldrift kan man uppnå emissionsfrihet, dvs inga lokala utsläpp av skadliga gaser och partiklar och om eltillförseln är fossilfri bidrar elektrifiering till klimatmålen.

I förstudien Hållbar TunnEL har projektparterna Svensk Kärnbränslehantering AB, Trafikverket, Epiroc och Ecoloop identifierat hinder, möjligheter och utvecklingsbehov för att till fullo kunna elektrifiera tunneldrivningsprojekt. Syftet har varit att skapa underlag för pilot- och demonstrationsprojekt som bidrar till att öka takten i tunnelbranschens elektrifiering.

Projektgruppen bestod av Mats Ohlsson och Pär Graham (SKB), Karl-Johan Loorents (Trafikverket) Eric Svedlund och Johannes Hansson (Epiroc) Ann Segerborg-Fick, Sandra Frosth, Tobias Robinson och Fredrik Meurman (Ecoloop), samt projektledaren Maria Johansson (Ecoloop).

Projektgruppen vill rikta ett stort tack till alla intervjupersoner både inom våra egna organisationer och i referensgruppen, som har bidragit med värdefull information, insikter och intressanta och klargörande diskussioner. Dessa personer är Jonas Muckenhirn, Fredrik Gustafsson, Tobias Jansson, Marie Skogsberg, Johan Sydqvist och Diego Lope-Alvarez (SKB), Anna Hartvik (Trafikverket), Tommi Salo (Sandvik), Jordi Puig (LKAB), Jonas Ranggård (Boliden), Fredrik Carlsson (Vattenfall), Maria Aronsson (Göteborg Stad), Anne Piegsa (Business Region Göteborg), Fredrik Dunér (Ecoloop), Magnus Alfredsson (NCC), Hans Sundström (Conpal/SVOA) och Sjoerd Spijkerman (Conpal/FUT).

Projektet finansierades av projektparterna samt av Stiftelsen för Bergteknisk forskning.

Stockholm i augusti 2021

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Många organisationer och beställare jobbar aktivt för att elektrifiera bygg- och anläggningsprojekt. Projektet ”Hållbar TunnEL” har fokuserat på elektrifiering av tunnelbyggen på grund av den specifika arbetsmiljön som tunnlar utgör – här finns särskilda behov av att tänka på säkerheten kring batterier och eldrivna maskiner och i den slutna miljön är emissionsfrihet särskilt viktigt. När direktivet för yrkeshygieniska gränsvärden träder i kraft år 2023 kommer det bli dyrare att ha bränsle drivna maskiner i tunnlar. Genom att elektrifiera kan man minska klimatbelastningen samtidigt som man minskar lokala emissioner och därmed förbättrar arbetsmiljön och minskar behovet av ventilation.

Projektet genomfördes i flera delar; en kartläggning av energi- och effektbehov uppdelat på arbetsmoment gjordes för ett ”medeltunnelprojekt” med borra-sprängcykel. Syftet var att få en allmän bild av maskinpark, tidsåtgång för olika moment samt effektbehov. Kartläggningen har sedan legat till grund för förslag kring hur tunneldrivningsprojekt kan bli helt elektrifierade och kring behov av framtida utveckling. Utifrån detta fokus har hinder och möjligheter för elektrifiering beskrivits.

Kartläggningen av exempelprojektet visade att utlastningsmomentet har den största energiåtgången under dygnet och även det största effektbehovet. Utlastningen är i vårt exempel, liksom i de flesta tunnelprojekt i Sverige idag, dieseldrivet och görs med hjullastare, dumprar och lastbil. Elektrifiering av utlastningsmomentet ger betydande effekt både på klimatbelastning och på lokalt skadliga emissioner och eftersom detta moment står för en så stor del av den totala energianvändningen ger det också effekt på hela projektets utsläpp – nästan 50% minskning av fossila koldioxidutsläpp och över 60% minskning av lokala, hälsoskadliga, emissioner.

Elektrifiering innebär att säkerhetsrutiner kan behöva ses över, till exempel har bränder i elmaskiner ett annat förlopp än i dieselmaskiner. Dagens elanslutningar skulle kunna klara helt elektrifierade projekt, särskilt om man använder lastutjämning och laddar maskiner långsamt. Men i vissa områden är det brist på effekt i de lokala näten och där är det av vikt att nätägarna stärker eltillgången.

Slutligen har samtliga vidtalade aktörer i värdekedjan visat stort intresse för projektet och för elektrifiering, vilket visar att det finns goda möjligheter att arbeta tillsammans för att göra det tekniskt möjligt som elektrifiering av mobila maskiner innebär.

Nyckelord: elektrifiering, arbetsmaskiner, tunneldrivning, emissioner

SUMMARY

Many organizations are actively working to electrify construction and civil engineering projects. The “Sustainable Tunnel” project has focused on electrification of tunnel construction due to the specific working environment that tunnels constitute - here there is a special need to think about the safety of batteries and electric machines, and in the closed environment minimizing emissions is particularly important. When the occupational hygiene limit directive enters into force in 2023, it will be more expensive to have fuel-powered machines in the tunnels. By electrifying, you can reduce the climate impact while reducing local emissions and thereby improving the working environment and reducing the need for ventilation.

The project was carried out in several parts; a survey of energy and power requirements divided into work steps was made for an “average tunnel project” with a drilling-blasting cycle. The purpose was to get a general picture of machinery, time required for various steps and power needs. The survey has since formed the basis for proposals on how tunnel construction projects can be fully electrified and on the need for future development. Based on this focus, obstacles and opportunities for electrification have been described.

The survey of the example project showed that the loading and transporting blasted rock from the tunnel has the largest energy consumption during the cycle and the largest power requirement. These work steps are in our example, as in most tunnel projects in Sweden today, diesel-powered and are done with wheel loaders, dump trucks and trucks. Electrification of the unloading element has a significant effect on both climate impact and locally harmful emissions, and since this element accounts for such a large part of the total energy use, it also influences the entire project's emissions - almost 50% reduction in fossil carbon emissions and over 60% reduction in local, harmful to health, emissions.

Electrification means that safety routines may need to be reviewed, for example fires in electric machines have a different course than in diesel machines. Today's electrical connections could handle fully electrified projects, especially if load balancing and slow charging of machines is being used. But in some areas there is a lack of power in the local grid and there it is important that the grid owners strengthen the electricity supply.

Finally, all the interviewed actors in the value chain have shown great interest in the project and in electrification, which shows that there are good opportunities to work together to make the technological leap that electrification of mobile machines entails.

Keywords: electrification, work machines, tunnelling, emissions

INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	1
2. OM STUDIEN OCH TUNNELPROJEKT	3
2.1 Metoder	3
2.2 Systemavgränsning	3
3. ENERGI OCH MILJÖ MED OCH UTAN EL	5
3.1 Borra-spräng-cykeln	5
3.2 Energi- och effektanvändning borra-spräng-cykel	6
3.3 Miljöemissioner borra-spräng-cykel	7
3.4 Mekanisk bergavverkning	8
4. GENOMFÖRBARHET – HINDER OCH MÖJLIGHETER	9
4.1 Tillgång på eldrivna maskiner för utlastning	9
4.2 Ettillförsel och laddning	10
4.3 Säkerhet på arbetsplatsen	11
4.4 Användarvänlighet	12
4.5 Lagkrav	12
6. ELEKTRIFIERINGSSTRATEGIER	13
7. UTVECKLINGSBEHOV OCH PILOTPROJEKT	15
8. SLUTSATSER	17
9. REFERENSER	19
BILAGOR	21
I) Förändrade säkerhetsrutiner med elfordon	21
II) Förslag fokus för projektet	23

1. INTRODUKTION

Många organisationer och beställare jobbar aktivt för att elektrifiera bygg- och anläggningsprojekt; Svensk Kärnbränslehantering har ett inriktningsbeslut om elektrifiering av de kommande tunnelprojekten för kärnbränsleförvaret och Trafikverket pekar i sin FoI-plan ut elektrifiering som en stark trend som är viktig för hållbarhetsmålen. Sveriges bergmineralindustrier (SBMI) har drivit projektet ”Hållbar smart elektrifiering av mindre bergtäkter” och bland kommunala byggherrar kan nämnas bland annat Göteborgs stad som har drivit projektet ”Elektrifierad bygg- och anläggningsplats” och Stockholms stad som driver demonstrationsprojektet ”Med utsikt från förarplatsen – hur fungerar elfordon i systemet?”. Längst av alla har dock gruvindustrin kommit, där alla underjordsaktiviteter numera är elektrifierade, och man inom några år planerar att ha elektrifierat även utlastningen från gruvorna.

Projektet ”Hållbar TunnEL” har fokuserat på tunnelbyggen på grund av den specifika arbetsmiljön som tunnlar utgör – här finns särskilda behov av att tänka på säkerheten kring batterier och eldrivna maskiner och i den slutna miljön är emissionsfrihet särskilt viktigt; när direktivet för yrkeshygieniska gränsvärden träder i kraft år 2023 kommer det bli dyrare att ha bränsle drivna maskiner i tunnlar. Genom att minska emissioner kan man minska även ventilationen, som är en stor energiförbrukare. Det är därför viktigt att titta på tunnelprojekt som en särskild miljö, som skiljer sig från andra anläggningsprojekt, när det gäller elektrifiering.

2. OM STUDIEN OCH TUNNELPROJEKT

2.1 Metoder

Projektet genomfördes i flera delar; en kartläggning av energi- och effektbehov uppdelat på arbetsmoment gjordes för ett ”medeltunnelprojekt” med borra-sprängcykel. Energi- och effektkartläggningen har tagits fram genom intervjuer med personer med lång bransch erfarenhet och djupgående kunskaper om tunneldrivning. Syftet har varit att få en allmän bild av maskinpark, tidsåtgång för olika moment samt effektbehov. Fakta har även samlats in genom inläsning av underlagsmaterial samt vid studiebesök hos Förvaltningen för utbyggd tunnelbana, FUT:s, arbetstunnel vid Londonviadukten i Stockholm. En viktig synpunkt som alla de intervjuade har framhållit är att varje tunnelprojekt är unikt i fråga om sprängcykler, bergegenskaper, tunnelradie etcetera. För att få fram en generell bild har energikartläggningen genomförts för ett teoretiskt ”medeltunnelprojekt” som bygger på borra-spräng-cykel.

Kartläggningen har sedan legat till grund för förslag kring hur tunneldrivningsprojekt kan bli helt elektrifierade och behov av framtida utveckling. En lista på förslagen hittas i bilaga II). Förslagen har diskuterats med projekt- och referensgruppen, och tillsammans valde man att fokusera fortsatta projektinsatser på utlastningsmomentet, och framför allt på förutsättningarna för och effekterna av att ersätta dieseldrivna hjullastare och lastbilar med eldrivna maskiner. Utifrån detta fokus har aspekter kring säkerhet och genomförbarhet beskrivits, med hjälp av intervju personer i referensgruppen och inläsning av bakgrundsmaterial, och potential för minskade miljöemissioner har beräknats.

2.2 Systemavgränsning

Det finns två huvudtyper av tunneldrivning: borra-spräng samt mekanisk bergavverkning. Projektet har fokuserat på borra-spräng som är den absolut vanligaste metoden i Sverige idag. En beskrivning av borra-spräng-cykeln finns i avsnitt 3.1. Efter energikartläggningen fokuserades arbetet på elektrifiering av utlastningsmomentet i borra-spräng.

Det system som studerats är tunnellen samt de aktiviteter som sker inom byggetableringen, se Figur 1. Transporter utanför grindarna räknas inte in och el-lastbilar räknas in enbart om de laddar inom etableringen.

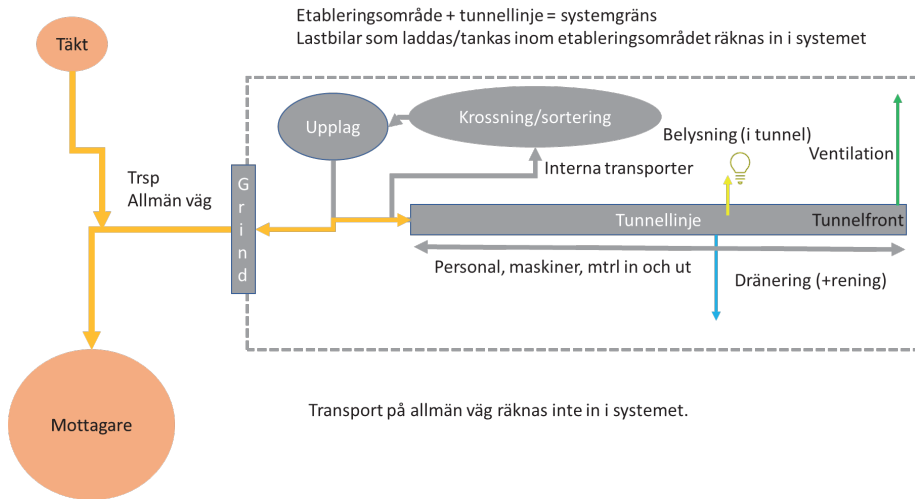


Figure 1. Delimitation of the project's energy mapping and sustainability calculations.

3. ENERGI OCH MILJÖ MED OCH UTAN EL

3.1 Borra-spräng-cykeln

Metoden innebär att berg sprängs ut vid tunnelfronten i omgångar för sedan transporteras bort. Arbetet görs i cykler, se Figur 2. Starten på cykeln är att hål borrar in i berget. De fylls med sprängmedel som detoneras och det utsprängda berget lastas ut, efter att spränggaserna ventilerats bort. Till denna process kommer ofta även injektering av cement, skrotning av berg (bortknackning av lösa bergbitar som annars riskerar ramla ner från tunnelväggarna), bergstabilisering för att undvika ras, samt betongsprutning.

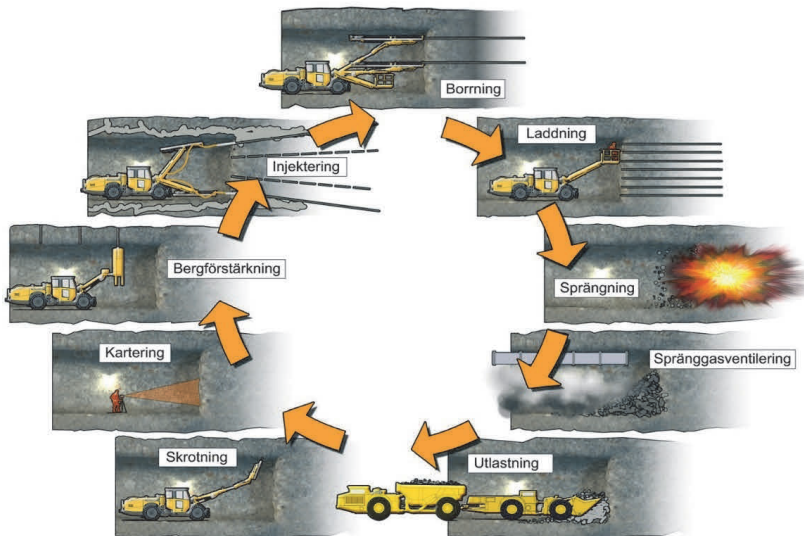


Figure 2. Work cycle for a drill and blast project. Picture: SKB.

Borriggar, injekteringsriggar och ”bergförstärkning” är ofta redan idag elektrifierade i de delar som utför själva huvudsysslan; borring, injektering etcetera. Maskinens förflyttning är dock oftast dieseldriven. Förflyttningen består av korta sträckor med många start och stopp. Det är inte optimalt för en dieselmotor och den kan ha svårt att hinna komma upp i optimal temperatur. Elektrisk framdrift kan vara mer gynnsamt av den anledningen. Sladdanslutning finns redan till riggar och andra arbetsfunktioner. Förflyttningen skulle därmed kunna gå på direkt nätanslutning eller batteri som laddas via den framdragna elen. En annan fördel jämfört med dieseldrift är att det är färre rörliga delar i elmotorer vilket gör att det blir mindre underhåll. SKB har tagit fram en

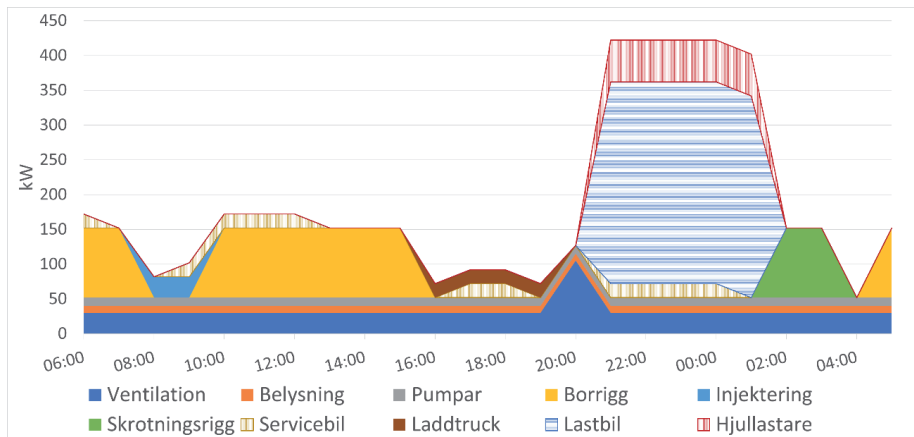
eldriven multiplattform för olika verktyg just för att kunna öka eldriften (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2019).

Utlastning och borttransport av berg är idag främst dieseldriven och görs med hjullastare, dumper och lastbil. Det är också de momenten som, jämte borrhning, kräver mest energi.

Tidsåtgången för en cykel ser väldigt olika ut i olika projekt, och beror av hur stor tunneldiameter man har, bergkvalitet med mera som bestämmer hur ofta man kan göra sprängningar – allt från flera sprängningar (cykler) per dag till några sprängningar i veckan.

3.2 Energi- och effektanvändning borra-spräng-cykel

Energi- och effektanvändning per timme under ett dygn visas i Figur 3. I exemplet antas att man hinner med en sprängning per dag, det vill säga en cykel per arbetsdygn. Som beskrivits i avsnitt 3.1 är flera installationer i tunnelprojekt eldrivna redan idag. De som drar mest el är fläktsystem och pumpar, som står på dygnet runt.



Figur 3. Effektbehov under en sprängcykel. Visas per timme med start kl 06:00 på morgonen för en sprängcykel som är ett dygn lång. Helfyllda fält representerar eldrivna maskiner, och streckade fält dieseldrivna (servicebil, lastbil och hjullastare).

Figure 3. Power needs during a drill and blast cycle. Shown per hour, starting at 6 am for a 24-hour cycle. Filled fields represent electrified machinery and striped fields represent diesel fuelled machinery (service vehicle, truck and wheel loader).

Toppeffekten, den högsta energianvändningen per tidsenhet, avgör vilken kvalitet på laddinfrastrukturen som krävs för att kunna driva ett tunnelprojekt helt elektrifierat. Den totala energianvändningen är viktig för att kunna avgöra skillnader i emissioner och kostnader mellan dagens typ av tunnelprojekt och helelektrifierade projekt.

I vårt exempel är den totala energianvändningen drygt 5 600 kWh per dygn, varav hälften, 2 800 kWh, i form av elenergi. Den högsta totaleffekten på el är 150 kW. Eftersom kartläggningen är gjord per timme kan det inte uteslutas att den dimensionerande toppeffekten är högre, fast under kortare tid än en timme. I tunneldrivningen vid Londonviadukten är installerad el-effekt 1 600 kW.

Den största energiåtgången under dygnet, 1 750 kWh, och även den största effekten, har utlastningsmomentet. Detta är i vårt exempel, liksom i de flesta tunnelprojekt i Sverige idag, dieseldrivet och görs med hjullastare, dumprar och lastbil. Skulle utlastningsmomentet utföras med motsvarande eldrivna maskiner skulle det totala energibehovet minska, eftersom de har ungefär 70% mindre energibehov för motsvarande arbete. Det totala energibehovet skulle alltså kunna minska ända till cirka 4 400 kWh. Projektets fortsatta fokus har varit på möjligheterna för och potentialen med elektrifiering av utlastningsmomentet.

För att diskutera toppeffekten om utlastningsmaskinerna vore eldrivna måste man diskutera vilken typ av elmaskin man ersätter med. Vore det maskiner med sladd så blir energianvändningsmönstret likt det i Figur 3, men med en lägre toppeffekt, på grund av elmotorernas energiomvandlingseffektivitet. Om maskinerna är batteridrivna kommer toppeffekten bestämmas av det laddmönster man använder. Dagens eldrivna maskiner måste troligen laddas under arbetsdagen. Snabbladdare för lastbilar, kan ge 150 kW effekt. En laddare skulle alltså dubbla uppnådd toppeffekt på vår exempelarbetsplats, men är fortfarande under exempelvis den installerade effekten på arbetsplatsen vid Londonviadukten.

Utlastning kan också göras med andra maskiner, såsom med transportband och rälsdrivna vagnar. Dessa alternativ har kommit upp i intervjuer och diskussioner under projektet, men har inte varit huvudfokus, varför inga energiberäkningar gjorts för dem.

3.3 Miljöemissioner borra-spräng-cykel

De emissioner som studerats i projektet är fossil koldioxid (som orsakar klimatförändring), NOx (kväveoxider som orsakar både försurning, och lokala hälsorisker), partiklar (som orsakar lokala hälsorisker) och kolmonoxid (som orsakar försämrade syreupptagningsförmåga hos människor, och i slutna miljöer som tunnlar kan vara en allvarlig hälsorisk). Alla emissioner orsakar sämre arbetsmiljö i tunneln och är anledningen till att den måste ventileras dygnet runt. Med lägre emissioner kan ventileringsbehovet, och därmed det totala energibehovet för tunnelbygget, minska. I analysen nedan ingår inte spränggaser, eftersom mängden av dessa är densamma oavsett vilken teknik som används för maskinerna i borra-spräng-cykeln. Behovet av forcerad ventilering efter sprängning är alltså detsamma.

I Tabell 1 jämförs exempelprojektet vars energikartläggning visas i Figur 3, med samma projekt där maskinerna för utlastning av berg ersatts med eldrivna motsvarigheter. Precis som diskuterats i 3.2 har elmotorer ungefär 70% mindre energibehov för

motsvarande arbete än dieseldrivna, men då är inte energibehovet under livscykeln, exempelvis för batteritillverkning, medräknad. I beräkningarna har antagits att projektets el kommer från nordisk elmix (SMED 2021), som innehåller mycket liten del fossila energikällor. Underlag för utsläpp från dieselbränslen kommer från Naturvårdsverket (Naturvårdsverket 2018, Naturvårdsverket 2020). Elektrifiering av utlastningsmomentet ger betydande effekt både på klimatbelastning och på lokalt skadliga emissioner och eftersom detta moment står för en så stor del av den totala energianvändningen ger det också effekt på hela projektets utsläpp – nästan 50% minskning av fossila koldioxidutsläpp och över 60% minskning av lokala, hälsoskadliga, emissioner.

Tabell 1. Emissioner och energiåtgång för exempelprojektet. Nuläge jämfört med scenario då maskiner för utlastning av berg var eldrivna. Siffrorna gäller energi och emissioner under ett dygn.

Table 1. Emissions and energy use for the example project. Today's best practice is compared to a scenario where machines for loading and transporting of crushed rock are driven by electricity. The values represent energy and emissions per 24 hours.

	Energi (kWh)	Fossil CO2 (kg)	NOx (g)	Partiklar PM2,5 (g)	CO (g)
Nuläge	5 640	900	42 300	310	310 000
Elektrifierad utlastning	4 420	450	16 000	120	118 000
Förändring	-22%	-50%	-62%	-62%	-62%

3.4 Mekanisk bergavverkning

Mekanisk bergavverkning är idag inte så vanlig i Sverige, men ökar i och med att metoderna utvecklas samt att utländska entreprenörer, som är mer vana vid mekanisk bergbrytning, i högre grad anlitas för tunnelbyggen. TBM (Tunnel Boring Machine) har bedömts vara mest aktuell i Sverige på grund av vår dominans av hårda bergarter såsom granit och gnejs.

Förutsättningarna för elektrifiering av projekt med mekanisk bergavverkning skiljer sig från borra-spräng-projekt; själva TBM:en är elektrifierad redan idag och har en matarsladd till en strömkälla. Effektbehovet varierar stort beroende på diameter och bergtyp. Exempel från litteraturen visar på projekt från 1500 kW till 8000 kW (Brox 2013).

4. GENOMFÖRBARHET – HINDER OCH MÖJLIGHETER

4.1 Tillgång på eldrivna maskiner för utlastning

Utlastning av berg kan ske med olika kombinationer av maskiner. I energiberäkningsexemplet användes en hjullastare som skopar upp berg och lägger det på ett lastbilsflak. Lastning av lastbilen sker inne i tunneln – då behövs nischer för vändning av lastbilen och nischer för lastning som rymmer hjullastarens med höjd skopa. Hjullastaren kan också köra upp för att lasta lastbilen utanför tunneln eller lossa på en hög. Att backa lastbilen längre sträckor i tunneln är opraktiskt och långsamt. I gruvindustrin är det vanligt att använda frontlastare, som ”skrapar” upp bergmaterialet på ett kort transportband inne i maskinen. Denna lösning gör det möjligt att ha kontinuerlig lastning, så länge frontlastaren har något att lasta av på. Det kan vara en längre bandtransportör som går ut ur tunneln, rälsbundna vagnar, en lastbil eller dumper. Bandtransportörer är en mogen teknik som det finns en etablerad marknad för, men i Sverige är det vanligare att använda hjullastare och lastbil i anläggningsprojekt.

Eldrivna hjullastare med sladd har funnits på marknaden ett tag, men är inte populära bland köpare, eftersom sladden anses opraktisk. Hjullastare med batteri är en marknad i tidig utveckling. Tillverkarna har hittills haft fokus på elektrifiering av mindre maskiner såsom hjullastare, minigrävmaskiner och dumprar med en batteristorlek på max 40 kWh. För större maskiner planerar man i första hand för hybridalternativ. Anledningen är kostnaderna, batteridrivna maskiner är 2–3 gånger dyrare än sina dieseldrivna motsvarigheter, och en stor del av merkostnaden är batterikostnaden. Det är ett hinder för entreprenörer som behöver få tillbaka investeringskostnaden för arbetsmaskiner under entreprenadavtalstider på 3–4 år. Det minskar intresset från maskinköparna, och gör att omställningen av maskinmarknaden går långsamt.

Merkostnaderna måste vägas mot det minskade behovet av underhåll och högre effektivitet (Cömert och Semakala, 2019). På grund av både den större energieffektiviteten och elprisets nivå jämfört med diesel behöver en eldriven maskin inte bli dyrare än en dieseldriven om man räknar på total kostnad (Mejhert och Ryberg, 2015).

Gruvindustrin har kommit längre med sin elektrifiering, och där finns elektrifierade arbetsmaskiner att tillgå för alla moment. Dessa är dock av större storlekar som passar sämre i anläggningsbranschens tunnelprojekt.

Utvecklingen av elektrifierade lastbilar går snabbt just nu, delvis på grund av EU:s krav på utsläppsminskning från fordon. Flera modeller av eldrivna lastbilar har kommit på marknaden de senaste åren. Precis som arbetsmaskiner är lastbilarna dock beroende av utvecklingen av batterier, och batteridrivna lastbilar är flera gånger dyrare än dieseldrivna. Men lastbilar finns att köpa, även om leveranstiderna är långa för tillfället.

4.2 Eltillförsel och laddning

4.2.1 Laddmönster och omloppstider

Korta omloppstider vid utlastning av berg är avgörande för tunnelentreprenadens ekonomi. Eldrivna maskiner får inte innebära väsentligt längre omloppstider eller stopp i produktion. Då är drifttid och laddningstid viktiga parametrar att ta hänsyn till vid val av utrustning och upplägg av transportkedjor.

Laddningstid för en hjullastare för gruvdrift är cirka två timmar och ger cirka fyra timmars körtid enligt Epiroc. I gruvindustrin undviker man stillastående maskiner genom att ha flera batterier man kan byta mellan – några som är i drift i maskinerna och några som står på laddning. Batteribyte kan ta cirka 5 minuter. Rena transportfordon såsom dumper behöver i tunneldrivning ofta åka mycket uppför från tunnelfront till tunnelmyning. Detta sänker drifttiden betydligt ner till kanske 40 minuter på två timmars laddningstid.

Möjliga laddmönster och omloppstider beror på hur hela transportkedjan är uppbyggd. Mejhert och Ryberg (2015) har till exempel jämfört två transportkedjor med elektrisk frontlastare respektive dieseldriven hjullastare. De kom fram till att de har ungefär samma teoretiska omloppstid; frontlastaren är visserligen snabbare eftersom den kan lasta kontinuerligt, men eftersom lastbilen måste backa en sträcka under mark blir kedjan på totalen långsammare. Använder man bandtransportörer för att lasta ut material från tunneln kan man få kontinuerlig utlastning av berg hela vägen och det kan gå snabbt, men det krävs att tunneln är stor nog.

4.2.2 Laddinfrastruktur

Tunnelprojekt har byggelsavtal med den lokala nätägaren. Ofta är de i form av effektabonnemang, där toppeffekten under en timme sätter elpriset under den timmen. Anslutningen innebär också ett tak för vilken toppeffekt som är möjlig att ta ut. Elektrifiering innebär ökade toppeffekter, och därmed dyrare abonnemang, men totalkostnaden jämfört med dieselinköp är konkurrenskraftig (Mejhert och Ryberg, 2015; Cömert och Semakala, 2019). Beräkningarna i avsnitt 3.2 visar inte på så stora toppeffekter jämfört med de effektabonnemang som är vanliga idag, men de är inte tillräckligt detaljerade för att visa på kortvariga toppeffekter, och de visar inte heller troliga laddmönster om maskinerna för bergutlastning skulle vara batterielektriska.

Kan man lastbalansera, dvs släta ut effektbehovet, är mycket vunnet. Lastbalansering kan till exempel göras genom laddstrategier som tillåter långsam laddning, med system där man använder flera batterier och laddar några i taget, eller genom utlastningsupplägg som tillåter kontinuerlig utlastning.

Tunnelentreprenader försiggår under kort tid jämfört med exempelvis gruvdrift. Enligt intervjuade i branschen är det därför viktigt med flexibla upplägg som kan etableras

snabbt. Här kan elanslutning vara en flaskhals eftersom det kan ta lång tid att få en nätstation etablerad. Vid arbetena för bussterminalen vid Slussen i Stockholm tog det till exempel sex månader. Trafikverket beställde elframdragning till tunneldrivning för Norrbotniabanan ett år i förväg. Det kan även bli konkurrens om elanslutning mellan projekt som ligger tätt. För branschen som helhet är det av vikt att tiden för framdragning av el blir snabbare för att tunnelprojekten inte ska förlora tid i etableringsfasen.

4.3 Säkerhet på arbetsplatsen

När mobila dieseldrivna maskiner byts ut mot elektrifierade kommer riskbilden i tunnelprojekt att ändras. El på arbetsplatsen finns redan och risker kopplade till det är delvis redan hanterade i befintliga riskhanteringsplaner. Men med utökad elektrifiering tillkommer stora batterier och fordon som står på laddning under flera timmar.

Flera av de intervjuade i projektet ansåg att säkerhetsfrågan är hanterbar, men viktig att arbeta med eftersom den innebär förändrad planering av arbetsplatsen, och kräver fortbildning av de som arbetar där.

Följande exempel på förändrade riskbilder med elektrifierade mobila fordon togs upp av de intervjuade:

- Brandrisk i batterier. Dessa är inte nödvändigtvis värre bränder än i dieselfordon, men de ser annorlunda ut, och riskhanteringsplaner behöver ta det i beaktande. Brandrisken är särskilt att beakta vid laddstationer, där fordonen står uppställda under laddning i flera timmar. Ur brandrisksynpunkt är det bra att placera dessa ovan jord.
- Urladdning av mobila maskiners batteri. Av säkerhetsskäl behöver man alltid kunna köra ut maskinen ur tunneln, därför måste det finnas möjlighet till laddning även nere i tunneln, om man inte använder hybridmaskiner.
- Tillförsel av el med kabel eller strömavtagare. För de fall man inte använder batterier utan andra sätt att försörja maskiner med el. Kabelanslutna mobila maskiner är ovanligt idag och det innebär att beteenden och vanor måste anpassas för att minska olycksrisker.
- Påkörningsolyckor. Eldrivna fordon är tystare, vilket innebär större risk för påkörning när personal på platsen inte uppfattar dem.

Flera av riskerna kan hanteras med god planering och organisering av arbetsplatsen och med utbildning i risk- och olyckshantering kopplat direkt till elmaskiner. Exempel på förändrade rutiner som framkommit från intervjuerna finns i bilaga I).

Aktörerna i tunnelbranschen samarbetar om frågor om elsäkerhet och brand i Tunnel Underground Safety Center (TUSC) som drivs av RISE.

4.4 Användarvänlighet

Enligt uppgift vill köparna ha batteridrivna mobila maskiner för flexibel hantering, inte mobila maskiner med sladd. Men det kräver att det antingen går att ladda dem snabbare än idag eller att batteribyten kan göras snabbt på plats.

Vissa förare kan uppleva att dieseldrivna hjullastare är mer kraftfulla än batteridrivna. Egentligen behöver dieselfordon en tid för uppvärmning vilket eldrivna fordon inte behöver, så upplevelsen kan överraska. Det kan, enligt branschsakkunniga, bero på att föraren kör på låg effekt för att inte batterierna ska ladda ur för fort.

Förare av eldrivna lastbilar upplever dem som tystare och med mindre vibrationer i hytten. Man uppskattar också att de inte avger avgaser.

4.5 Lagkrav

År 2023 kommer direktivet för yrkeshygieniska gränsvärden¹ få betydelse för tunneldrivning. Gränsvärden för partiklar, NO_x och HC, det vill säga luftföroreningar som är vanligt förekommande i avgaserna från fordon och arbetsmaskiner oavsett om dessa använder fossila eller förnybara drivmedel, kommer bli begränsande och kräva mycket mer ventilation än i dagens projekt. Eftersom kraven är på gränsvärden i luft påverkar det även befintliga maskiner, inte bara nya maskiner. Elektrifierade maskiner släpper inte ut dessa avgaser, och kommer bli en bättre investering när man jämför med ökade ventilationskostnader om man skulle använda bränsledrivna maskiner.

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017L0164>

6. ELEKTRIFIERINGSSTRATEGIER

Eftersom tillgången på batterieldrivna arbetsmaskiner är begränsad och innebär stora merkostnader är det svårt att i dagsläget kräva att ett tunnelprojekt ska vara helt elektrifierat. Det är ändå viktigt för beställarorganisationer att sätta upp mål om 100% fossilfrihet och emissionsfrihet i tunnelprojekt, för att skapa engagemang och riktning. Organisationen kan istället be enskilda projekt ge förslag på hur de kan öka elektrifieringen, och på så sätt bidra till organisationens lärande.

Projektet sammanställde följande tips som kan underlätta för beställare när de utvärderar möjligheten att öka elektrifieringen i ett projekt, med särskilt fokus på utlastningen som är det energintensivaste arbetsmomentet:

1. Diskutera val av utlastningsmetod

Kan man använda bandtransportörer eller annan teknik som kan ge kontinuerlig och kabelansluten elförbrukning? Eller ska man använda batterielektriska hjullastare och lastbilar?

2. Marknadsöversikt

Utvecklingen av eldrivna maskiner går snabbt, samtidigt är det långa leveranstider för dem. För utlastningsmetoder som är mindre vanliga på svenska marknaden kan man behöva ha dialog med leverantörer för att förstå hur de kan användas på ett optimalt sätt. Skicka därför ut en "request for information", RFI, för att kunna ha dialog med maskinleverantörer om deras erbjudanden i god tid.

3. Diskutera upphandlingsmodell

Entreprenörer kan ha svårt att ta investeringen för maskiner som är flera gånger dyrare än de vanligaste alternativen på marknaden. Under en övergångsperiod kan det därför beställaren underlätta marknadsintroduktionen av maskiner genom att själva köpa in dem och leasa ut dem till entreprenören.

4. Effektbehov och laddinfrastruktur

Koppla in elektriker tidigt för beräkning av toppeffekter och överblick och lokalisering av eventuella laddstationer.

5. Säkerhet

Koppla in säkerhetsansvariga tidigt för att diskutera lokalisering av laddstationer, och säkerhetsåtgärder kring batterier och eldrivna maskiner.

6. Totalkostnadsberäkning

Genomförs för att värdera olika alternativ för tunnelprojektet mot varandra, och för att ta ut rätt pris för leasade maskiner. Totalkostnadsberäkningen bör inkludera kostnader för energi och service.

7. Upphandlingsformer

För att kunna handla upp maskiner som är dyrare än ledande marknadsalternativ kan olika upphandlingsstrategier användas, till exempel som nämnts ovan kan beställaren köpa in maskinen för att leasa den till entreprenören, eller att handla upp från leverantörer som erbjuder leasing av batterier. Möjligheten att söka statliga bidrag för inköp av ny, innovativ teknik bör också undersökas.

8. Planering projekt och utbildning

Projekt med ny teknik behöver planeras extra noggrant, både med avseende på rutiner för laddning och hantering av maskiner, för riskbedömningar och riskhanteringsplaner för brand och med arbetsplanering.

7. UTVECKLINGSBEHOV OCH PILOTPROJEKT

Projektet har identifierat följande hinder som kan underlättas genom fortsatt fokus i utvecklingsprojekt:

- **Kostnad för batterier** – hur kan batteristorlek, batterianvändning och laddmönster optimeras? Hur kan nyttjandegraden av batterierna ökas genom affärserbjudanden såsom ”battery-as-a-service”? Teknikutveckling av själva batterierna är nödvändig, men ligger utanför projektets avgränsning.
- **Tillgänglighet av större batteridrivna entreprenadmaskiner på marknaden** – hur kan beställare, entreprenörer och maskinleverantörer samarbeta för att underlätta marknadsintroduktion av större entreprenadmaskiner?
- **Översättning av klimatkrav till upphandlingskrav** – hur kan beställarorganisationernas klimat- och miljökrav översättas till upphandlingskrav som möjliggör för tekniksprång som eldrivna maskiner?
- **Tillgång till eleffekt på arbetsplatsen** – hur ser laddstrategier ut som håller nere kostnaderna för effektabonnemang? Hur kan tiden för att få byggel kortas?
- **Utbildning kring bränder i elfordon** – bränder i elfordon bör hanteras på ett annat sätt än bränder i dieselfordon, och detta kräver utbildning av personal. Sådana utbildningar kan lämpligen anordnas bland annat i samband med demonstrationsprojekt.

För pilotprojekt som är direkta fortsättningar på Hållbar TunnEL bör fokus ligga på:

- Utlastningsmomentet – med olika eldrivna tekniker.
- Kostnads/nyttoanalyser med elektrifierade lösningar, inklusive miljönytta, för att kunna diskutera fördelning av kostnader.

Under projektets gång har diskussioner med maskinleverantörer och beställare gjorts om möjligheter till pilotprojekt. Intresset och viljan från beställare att testa eldrivna mobila maskiner är stort, men få projekt har möjlighet att ta de kraftigt ökade kostnaderna. Här är möjligheterna till utvecklingsfinansiering mycket viktiga, för att möjliggöra marknadsintroduktion av eldrivna maskiner i fler storleksklasser.

8. SLUTSATSER

Elektrifiering av alla arbetsmoment i tunnelprojekt är en stark trend, som kommer förstärkas mer av de kommande kraven på yrkeshygieniska gränsvärden; efter år 2023 kan det bli svårt att ha dieseldrivna maskiner i tunnlar.

Elektrifieringen har stor potential att förbättra arbetsmiljön och sänka klimatbelastningen från tunnelprojekt.

Utlastningsmomentet är det moment som drar mest energi, effekt och är minst elektrifierat i dagens projekt. Utvecklingen av batteridrivna mobila maskiner för utlastning, såsom hjullastare, frontlastare och lastbilar går framåt, men dessa är fortfarande flera gånger dyrare än sina dieseldrivna motsvarigheter, framför allt på grund av batterikostnaden. Under det tekniksprång som branschen just nu gör från dieseldrift till eldrift kan beställare och statliga finansärer spela en stor roll för att stötta marknadsintroduktionen av eldrivna mobila maskiner.

Utlastning måste inte ske med mobila maskiner, man kan också använda bandtransportörer i vissa projekt. Därför är det viktigt att tänka brett i projekteringsfasen och även räkna på möjligheten att använda andra tekniker än mobila maskiner.

Elektrifiering innebär att säkerhetsrutiner kan behöva ses över, till exempel har bränder i elmaskiner ett annat förlopp än i dieselmaskiner. Inget tyder dock på att säkerhetsriskerna skulle vara större i helt eldrivna projekt än i dagens projekt.

Dagens elanslutningar skulle kunna klara helt elektrifierade projekt, särskilt om man använder lastutjämning och laddar maskiner långsamt. Men i vissa områden är det brist på effekt i de lokala näten och där är det av vikt att nätägarna stärker eltillgången. Byggelanslutning tar också mycket lång tid att få i vissa områden, det riskerar att försena projekt, och även av den anledningen behöver tillgången på el stärkas.

Under projektets gång har alla parter i värdekedjan visat stort intresse för elektrifieringsfrågan och för värdekedjeövergripande samarbeten, vilket visar både på hur stor potential elektrifiering har för att olika organisationers hållbarhetsmål, och på att nya lösningar som fördelar riskerna med ett tekniksprång till helt elektrifierade tunnelprojekt är möjliga.

9. REFERENSER

- Brox, D. 2013. Technical considerations for TBM tunneling for mining projects. 2013 TRANSACTIONS OF THE SOCIETY FOR MINING, METALLURGY, AND EXPLORATION.
- Cömert, E. och Semakala, C. 2019. "En jämförande studie mellan diesel- och eldrivna tunneldrivningsmaskiner för masshantering i tunnel" Examensarbete. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Mejhert, J. och Ryberg, R. 2015. "Utlastning av bergmassor vid konventionell tunneldrivning, Jämförelse av elektrisk maskin för kontinuerlig lastning och dieseldriven hjullastare" *Examensarbete*. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Naturvårdsverket 2018. "Arbetsmaskiners klimat- och luftutsläpp – Redovisning av regeringsuppdrag om kartläggning och förslag för minskade utsläpp". Rapport 6826.
- Naturvårdsverket 2020. "Emissionsfaktorer och värmevärden 2020". Underlag till Sveriges växthusgasinventering för utsläppsåren 1990-2018 till UNFCCC
- SMED 2021. "Emissionsfaktor för nordisk elmix med hänsyn till import och export". SMED rapport Nr 4 2021.
- Svensk Kärnbränslehantering AB, 2019. "Äspö Hard Rock Laboratory Annual Report 2018". TR-19-10

BILAGOR

I) Förändrade säkerhetsrutiner med elfordon

Dagliga rutiner

Servicebil

- Servicebil risk för påkörning
- Ovana vid laddning och elektricitet
- Beakta nya risker vid laddning
- Separata tunnlar för laddning med sluss
- Rutiner vid brand i elbil/ellastbil/elhjulastare
- Säkerhetscontainer kan behöva andra karantän/säkerhetstider/rutiner
- Användning av elbilar kräver nya rutiner för hur man ska agera vid brandtillbud.
 - o Exempel hur ta hand om den brinnande bilen, hur ska bemanningen agera och evakuera/sättas i säkerhet, hur ska säkerhetspersonal ta sig in och agera.

Generella/allmänna säkerhetsrutiner rörande hela verksamhetsområdet

- Är generellt utformade efter användning av bensen/dieseldrivnet (bla. pga tradition). Kan behöva kompletterande rutiner med avseende på hur verksamheten utvecklas kopplat till elektricitet och eldrivna fordon och maskiner.

Eldrivna hjullastare källa (svans/batteri/etc)

- Svansdrivna maskiner kräver mycket säkerhetstänkande kring hur sladdar ska hanteras. Svansmaskin innebär dock mindre risk pga slipper laddinfrastrukturen, och risken för batteriincidenter.

Veckorutiner/övergripande rutiner

Ellastbilar behöver säkra laddstationer

- Se ovan

Ellastbilar transportkedja

- Inte lasta om till diesel, köra hela vägen med el. I dagsläget kan inte ellastbilar köra så långt som ibland önskvärt på en laddning. Säkerhetsfrågor vid omlastning bör beaktas.

Påkörning och olyckor

- Elfordon kan upplevas tystare, då svårare att upptäcka. Något annorlunda körsätt, fordonen agerar något annorlunda.

II) Förslag fokus för projektet



Utlastning med batteridrivna maskiner istället för dieseldrivna



Luftkabel istället för sladd på marken



Bygga elinfrastruktur för driftsfas så att den kan används i byggfas



Utlastning med transportband istället för hjullastare/lastbil



Box 55545
SE-102 04 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Sturegatan 11, Stockholm

ISSN 1104-1773