© 2026 Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors.

”ORTEN” TILL KOLDIOXIDFRI GRUVBRYTNING; VILKA BRYTNINGSMETODER KOMMER ATT LÖNA SIG I OCH MED 2050-MÅLEN?

THE ROAD TO CARBON FREE MINING; WHAT MINING METHODS ARE GOING TO BE ECONOMIC WHILE REACHING 2050-TARGETS?

Ottomar Brussee, Boliden

Senast år 2050 ska gruvdriften klara ett nollutsläpp av växthusgaser. Medan utsläppen från el redan är nästan noll i Norden är elektrifieringen av gruvfordon i en dynamisk fas. Stora framgångar varvas med besvikelser. Rent tekniskt är det i dagsläget möjligt att ha en utsläppsfri gruva vad avser utsläppen från energi. Ekonomiskt är det än så länge en annan fråga, men med en stor ökning av tillgången till billiga elfordon verkar det inte långt bort. Med elektrifiering går det att kapa mer än hälften av gruvdriftens utsläpp. De kvarvarande 30–50% utgörs av främst insatsvaror i form av cement, sprängmedel och olika stålprodukter. Det ser ut att vara möjligt, och ekonomiskt lönsamt, att kapa runt en tredjedel av dessa utsläpp inom en tio-årsperiod med dagens teknikläge. För resterande andel bedöms det svårare att ta bort utsläppen utan extra kostnader. Sätta ett pris på koldioxidutsläpp är ett sätt att ta bort konkurrensnackdelar för fossilfria alternativ, men detta innebär såklart en extra kostnad. Att hitta brytningsmetoder som kan minimera/eliminera delar av de här ’hard to abate’ källorna kan vara den enda fördelaktiga vägen ditt. Automation, kontinuerlig brytning, cirkularitet och alternativ till dagens bindemedel får då stor betydelse. Den mest ekonomiska vägen till nollutsläpp går då via skicklig gruvplanering och smarta teknikval.

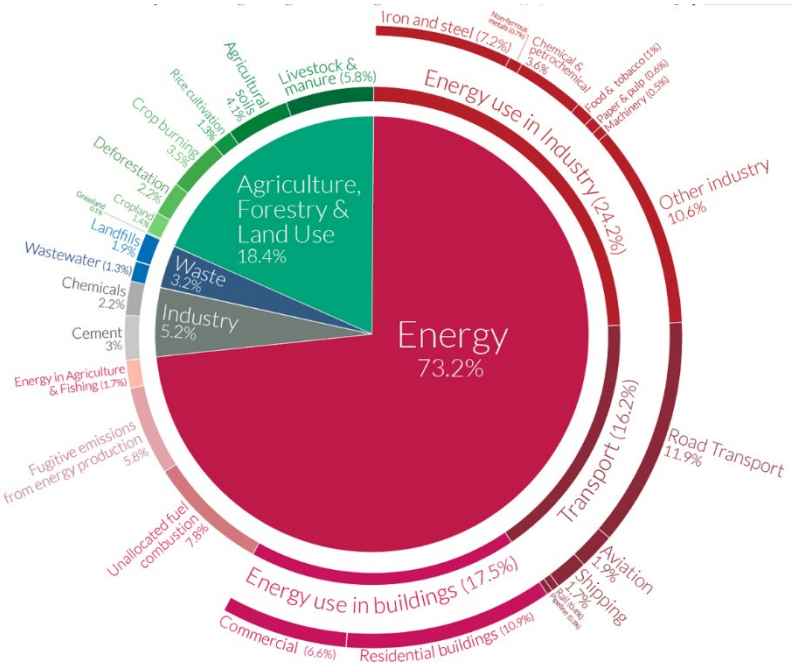
Introduktion

Inom underjordisk gruvbrytning behöver man tillreda orter för att komma fram till malmen; de här orten kan vara rätt långa, i vissa fall kräva ett mer omfattande arbete än själva malmbrytningen, och de flesta bergarbeterare spenderar den största delen av sin tid i sådana orter. Malmen ska sen täcka kostnaden för sin egen brytning, men också för orten. Att jobba mot koldioxidfri gruvbrytning kan jämföras med sådan ortbrytning; det är en konst i sig, det är en lång väg, det krävs möjligtvis fler vägar, och vissa kommer att visa sig återvändsgränder. Viktigt i den här ortbrytningen är att komma ihåg att orten måste kunna betalas av malmen sen; klimatproblemet kan inte lösas till vilken kostnad som helst, och helst väljer man den smartaste vägen. I den här utredningen ska redogöras vad som krävs för att klara riktigt fossilfri gruvbrytning, huruvida det är realistiskt innan 2050, om det är möjligt att låta vinsterna betala för kostnaderna, och vilken roll bergteknik spelar inom det här.

Världens klimatmål och gruvbranschen

Parisavtalet erkände vikten av en kraftig nedgång i växthusgasutsläppen världen runt, för att undvika allvarliga konsekvenser genom att hålla den globala uppvärmningen mellan pre-industriell tid och 2100 på mellan 1,5 och 2 grader Celsius (FN, 2026). Mest konkret innebär det här att världens nettoutsläpp år 2050 ska vara nere på 0 ton koldioxidekvivalenter. Gruvbranschen har en avgörande roll, eftersom lösningar för fossilfri elproduktion, elektrisk mobilitet samt fossilfria industriella processer utan undantag är beroende på betydligt större mängd metaller än de konventionella fossila alternativen. Annars sagt, för att lyckas med klimatmålen, krävs en väsentlig utökning av gruvbrytningskapacitet världen runt (International Energy Agency, 2026).

Om gruvbranschen vill dra nytta av den här enorma ökningen följer direkt att man också själv ska ha låga utsläppsnivåer; ju högre utsläppen av 'klimatmetallerna' är, desto mindre nytta av lösningarna. Metallbranschen kan inte gömma sig bakom klimatnyttan som deras produkterna har, men också fokusera på sitt eget utsläpp. Huvudutmaningen inom metallframställningen är på metallurgisk sida, med en enorm energiförbrukning i masugnar och smältverk. Gruvornas klimatpåverkan är främst genom användning av några koldioxid-intensiva produkter, samt transporter. Gruvbranschens påverkan förväntas däremot öka utan åtgärder, med tanke på lägre halter, större brytningsdjup, och större volymer som krävs brytas för en ökad metallframställning.

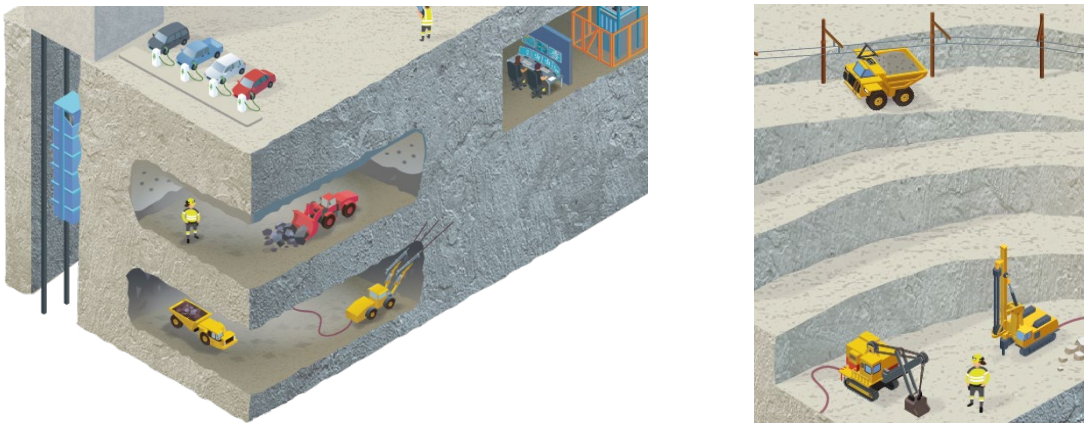


Figur 1: Global greenhouse gas emissions by sector (World Resources Institute, 2020)

Rent hypotetisk är det redan idag möjligt att bryta malm koldioxidutsläppsfri; värd att notera är att 1600-talets Falu gruva (och sina mindre kända syskon) kördes i princip utsläppsfria, med människo- och hästtransporter, stål gjord på träkol, och minimal användning av (biobaserade) krutsprängmedel. Dåtidens fossilfria ekonomi var däremot inte hållbart heller; förutom att det ekonomiska välståndet var mycket lägre, var förgiftning av gruvområden, arbetsplatsolyckor samt avskogning av gruvområden klassiska problem kring gruvbrytning (Håkansson, 2000). Att gå tillbaka i tiden är inget hållbart alternativ; det enda sättet att utveckla en genuint fossilfri gruvbrytning är genom ny teknik, som är säkra, inte förgiftar och avskogar, samt är utsläppsfria. Frågan som ska besvaras är med andra ord är om kostnaden för koldioxidfri gruvbrytning kommer att vara lägre än samhällskostnaden för utsläppen.

Avgränsningar

Först och främst är det viktigt att ha en tydlig avgränsning av diskussionen; funktionellt sett har ’bergbrytning’ definierats som allting som krävs för att förvandla fast berg till berg som är klar för anrikning och/eller transport. Hela salvcykeln och förstärkningsarbete inklusive återfyllning (vid behov) inkluderas i den här avgränsningen. Eftersom gruvverksamhet i dagsläget inte kan pågå utan stödfunktioner såsom ventilation, människonärvaro, vattenundanhållning med mera inkluderas sådana funktioner. Det som har exkluderats i geologiskt och geofysiskt arbete såsom diamantborrning och andra mätningar. Även anrikning, vidaretransportering och miljöarbete såsom vattenrening och dammbyggnad har exkluderats. Sen, för att kunna göra en bra jämförelse, så har både under- och ovanjords bergbrytning studerats.



Figur 2: Avgränsning av studieområde

Boliden driver vid artikelns skrivande sju gruvområden i fyra olika länder. För att kunna fokusera på gruvtekniska skillnader studeras tre olika gruvor; Aitikgruvan utanför Gällivare, Garpenbergsgruvan utanför Hedemora samt Kankbergsgruvan, i närheten av Boliden. De här är typiska på sitt sätt, som kommer att diskuteras senare. Basåret för använt data är 2021, med att det året har studerats bäst inom ramen för Bolidens kortsiktiga klimatmål, som avser en utsläppsminskning mellan 2021 och 2030. Sedan dess har vissa förändringar skett som till exempel produktionsökningar samt nya tillredningar, men allmänt är datat fortfarande rätt representativt för idag (2026).

Gruva	**Årsproduktion (kt malm)**	**Huvudsakliga brytningsmetod**	**Uppfodring**	**Produkter**
Aitik	40 164	Dagbrott	450t-truckar+band	Koppar, guld & silver
Garpenberg	3 052	Pallbrytning	30t-truckar+skipp	Zink, silver, bly, koppar
Kankberg	480	Igensättningsbrytning	30t-truckar	Guld, tellur & silver

Figur 3: Egenskaper diskuterade gruvor

Figur 4: Exempelgruvor; Aitik (överst), Garpenberg (mitten), Kankberg (under)

Växthusgasutsläpp är ett ekonomiskt problem, inget miljöproblem

Ett vanligt misstag är att klassa klimatproblemet som ett klassiskt miljöproblem. ’Miljö’ definieras som ’omgivande förhållanden’ (Ordböcker, 2026), det vill säga omgivningen av något lokalområde. Ett miljöproblem är alltså ett problem som påverkar lokala förhållandena. Det här är någonting som gruvbranschen har en lång historia med; redan på romersk tid orsakade romerska gruvor i Europa stora föroreningar i deras omgivning till exempel (Susanne Preunkert, 2019). Värd att notera här är att de problemen uppstod specifik i området kring gruvorna, ett tydligt lokalt problem, och att lösningar till problemet därför också brukar bli lokala.

’Klimatproblemet’ är väsentligt annorlunda, och handlar i grund och botten om globalt förhöjda koldioxidnivåer i atmosfären. Det här är i sig själv inget problem, och inte heller är den (genomsnittliga) globala uppvärmningen som är en konsekvens av de här höjda nivåerna i atmosfären ett problem i sig själv; det som är ett problem däremot är konsekvenserna av den här uppvärmningen, såsom överdödlighet i specifika samhällsgrupper som en konsekvens av en ökning i naturkatastrofer och en ökning av klimatkänsliga sjukdomar. Ett annat stort problem är påverkan på olika biotoper, som förvirrar de redan stora hot mot biodiversiteten, som orsaker ytterligare matförsörjnings- och hälsoproblem (Pfenning-Butterworth, 2024). Ett tredje problem som följer ett snabbt förändrat klimat, är stora ekonomiska skador, till exempel mot infrastruktur och bostäder, på grund av översvämningar, uttorkning, överhettning och så vidare. Annars

sagt; den av mänsklig aktivitet orsakade snabba förändringen av klimatet innebär en stor kostnad, som slår världen runt. De här problemen kan uppstå var som helst, och har ingen direkt koppling als mellan orsak och skada. Det är inte ett ’svart-vit’ problem; naturkatastrofer, artutrotning samt sjukdomar uppstår även utan klimatförändring, klimatförändring förvärrar däremot utmaningen. Användningen av fossila bränsle innebär också stora samhällsfördelar; olja och gas är en oslagbar energibärare när man kollar på energitäthet, och kol spelar en avgörande roll inom samhällskritiska metallurgiska processer till exempel. Med andra ord; det finns en kostnad i att använda fossila bränslen, men det finns också en kostnad i att inte göra det.

Förenklat sagt orsakar en ton koldioxid som har släppts ut i Sverige lika stora problem som en ton koldioxid som har släppts ut i Uruguay eller Kazachstan. Två viktiga slutsatser är de följande; den första är att detta skapar möjligheten att räkna ut en standardkostnad för utsläppen av en ton koldioxid, som i princip är samma för hela världen. Den andra slutsatsen är att geografi inte bör bestämma vilket utsläpp får ske (som med klassiska miljöproblem), snarare är frågan om kostnaden för utsläppen överskrider det ekonomiska mervärdet av den genomförda aktiviteten. Värd att notera, redan idag, i en värld som är långt ifrån perfekt när det gäller internationell avstämning: 28% av världens utsläpp, dock också över två tredje delar av världens ekonomi, omfattas av koldioxidprissättande system (World Bank Group, 2025).

Konsekvensen av det här är att klimatproblemet i grund och botten inte är ett (lokalt) miljöproblem, men ett ekonomiskt problem; var finns den optimala punkten mellan kostnaden för utsläpp av koldioxid gentemot överlåtelse av fungerande fossila alternativ? Den här optimala punkten av koldioxidutsläpp kommer att bestämmas främst av teknikläget. Lösningar till klimatproblemet blir automatiskt teknikcentrerade, helst med fördelar utöver klimatnytta. Över tid kommer tillgängliga lösningar öka, i och med vidare teknikutveckling. Inom de koldioxidprisande lagsystem som finns runt om i världen, kommer de som lyckas med en snabb resa till noll ha en naturlig fördel gentemot konkurrenter, så länge lösningar själva är ekonomiskt effektiva. Rent teoretiskt kan vi köra 100% nettonollutsläpp gruvbrytning redan idag. Frågan blir däremot vilka brytningsmetoder och tekniker redan är (nästan) koldioxidfria idag, vilka som kommer att kunna vara det inom närtid, och vilka som har en chans innan 2050, på ett sätt som sparar pengar, eller åtminstone är billigare än koldioxidkostnaden.

När man utvecklar en ny underjordsgruva tillreder man först en (eller flera) ort för att nå fram till malmen; det här är initialt bara en kostnad, men när orten kommer att ta sig förbi malmkroppen kommer de potentiella intäkterna öka. På samma sätt har antalet tillgängliga fossilfria gruvtekniker ökat, men frågan är hur mycket fortfarande behövs för att utnyttja den fulla potentialen av fossilfri gruvbrytning.

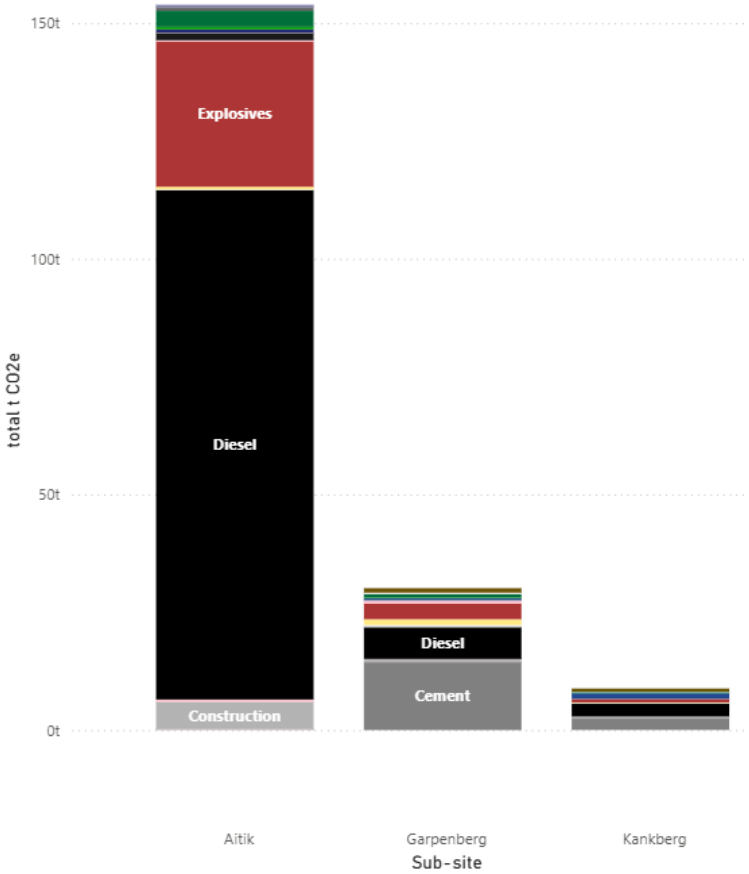
Hur bedömer man klimatprestandan av en gruva?

Gruvans klimatpåverkan bedöms utifrån mängden använt material som släpper ut koldioxid eller andra växthusgaser i sin framställning, transport till anläggningen eller användningen på anläggningen. För att bedöma Bolidengruvornas klimatpåverkan har en stor studie genomförts, på alla insatsvaror som användes år 2021. Sedan dess har klimatpåverkan per gruva såklart ökat eller minskat, mest beroende på produktionsnivåer, förändringar i tillämpat teknik samt tillgången till fossilfri el samt effektivitetsförbättringar.

Varje insatsvara har fått en emissionsfaktor per enhet; för de större volymkategorier som cement, sprängmedel och bränsle en faktor från leverantören, för sekundära insatskategorier genomsnittsfaktorer från internationella databaser, och för tertiära kategorier (stolar, handverktyg, papper osv.) har schablonvärden använts. Sen har mängden förbrukat material multiplicerats med respektive emissionsfaktor, och klassificerats enligt tillämpningsområde. Totalutsläppen har sen fördelats för att åstadkomma analys-KPI'er, såsom utsläpp per mängd producerat metall, utsläpp per mängd malm producerat, utsläpp per mängd berg, osv. Resultatet av den här studien är grunden av gruvornas dagens utsläpp (Söderström, 2023).

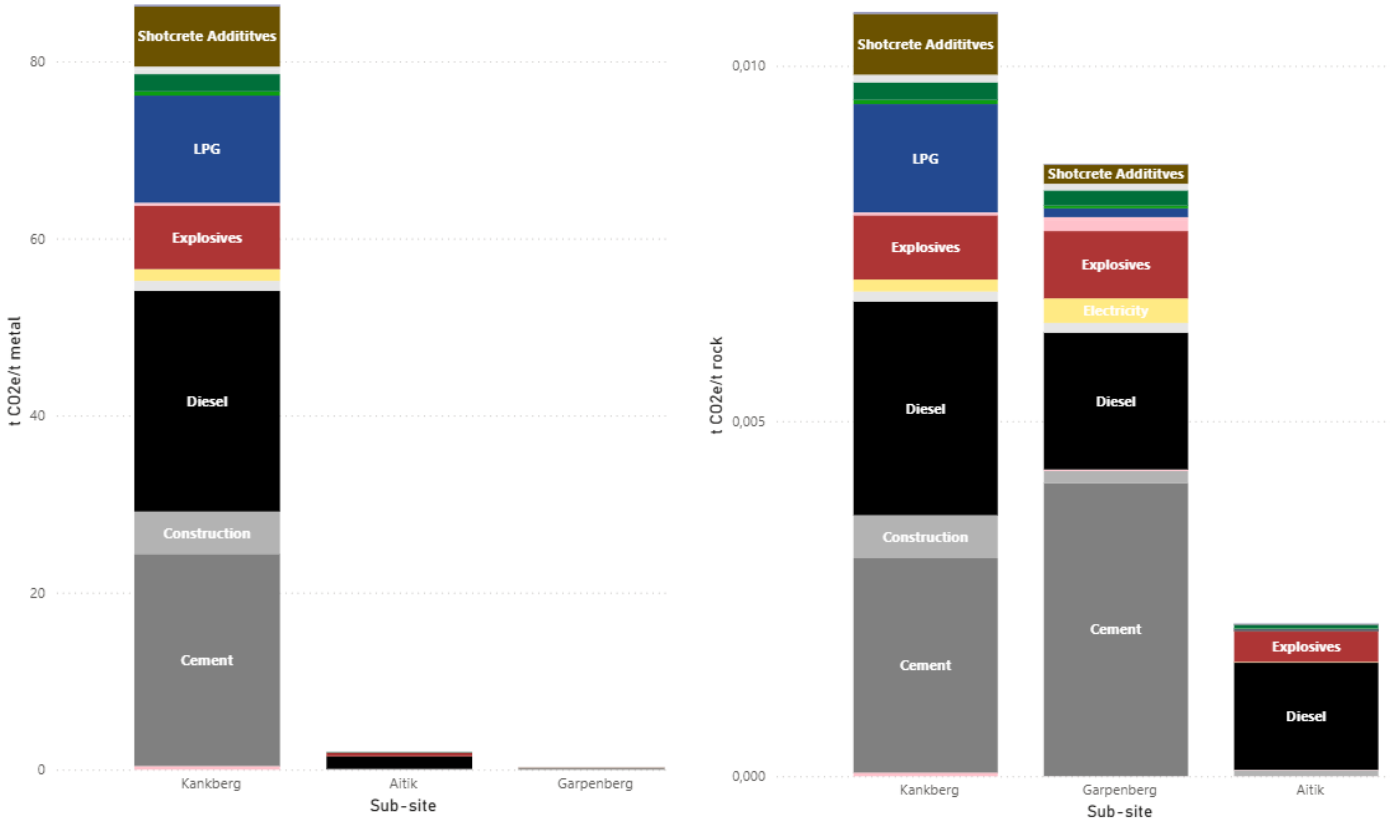
Det första som noteras när man kollar på gruvornas totala utsläpp är att Aitikgruvan sticker ut över Garpenberg och Kankberg; detta beror främst på de stora volymerna som behöver fraktas när man bryter ett stort dagbrott som Aitik. Det som följer med de här transporterna är också den stora dominansen av diesel i det totala fotavtrycket av dagbrottsbrytning. Garpenberg har också ett större fotavtryck än Kankberg, men det är värd att notera att Garpenberg också är en mycket större gruva än Kankberg. När man kollar på underjordsbrytning är det också tydligt att cement är den mest dominanta utsläppskällan.

För att göra en mer vettig jämförelse är det bättre att kolla på andra KPI'er. Först per mängd metall, i slutändan är metallerna hela anledningen att man överhuvudtaget vill bedriva gruvdrift, och samhället är mest intresserat i klimatpåverkan av den färdiga produkten, och sen per mängd metall, eftersom det möjliggör en mer ingenjörsmässig analys av utsläppsorsakerna.



Figur 5: Totalutsläpp per exempelgruva (2021)

Intressant att se när man kollar på analysen per mängd metall är att Kankberg, som primärt bryter guld och tellur, kan leva på väldigt låga halter av metall för att gå runt. Med andra ord kommer insatserna för att bryta relativt små mängder av metall bli mycket större, och detta gör att utsläppen per mängd metall blir mycket högre. När man jämför utsläppsmängden per mängd malm får vi de mest jämlika utsläppsnivåerna; mest intressant här är att se att Aitikgruvan har den absolut lägsta utsläppen per mängd bruten malm. Det här beror på att ekonomin på mer höghaltiga malmer rättfärdigar under jordsbrytning, som kräver mycket mer infrastruktur, mer komplexa tillredningar och mindre storskaliga (=effektiva) brytningsmetoder och transporter. Större insatser motsvarar förenklat sagt högre utsläpp, och det här syns i utsläppen av cement med additiver (för bergförstärkning och återfyll), LPG (för ventilationsuppvärmning), och relativt fler byggprojekt, som orsakar den största delen av den extra utsläppen. Även när man kollar på förbrukade mängder diesel och sprängmedel är Aitik lite mer effektivt, det här är helt enkelt skalfördelen, som också förklarar varför Garpenberg, som bryter storskaligt, är lite mer effektivt än Kankberg. Sammanfattningsvis är frågan vad som är en ’klimatvänlig’ gruva svårt att besvara, utan att ge en tydlig definition; menar man klimatvänlig i absoluta termer (då är mindre bättre), produkttermer (då vill man ha höga malmhalter), eller produktionstermer (då är mer effektiva system bättre).



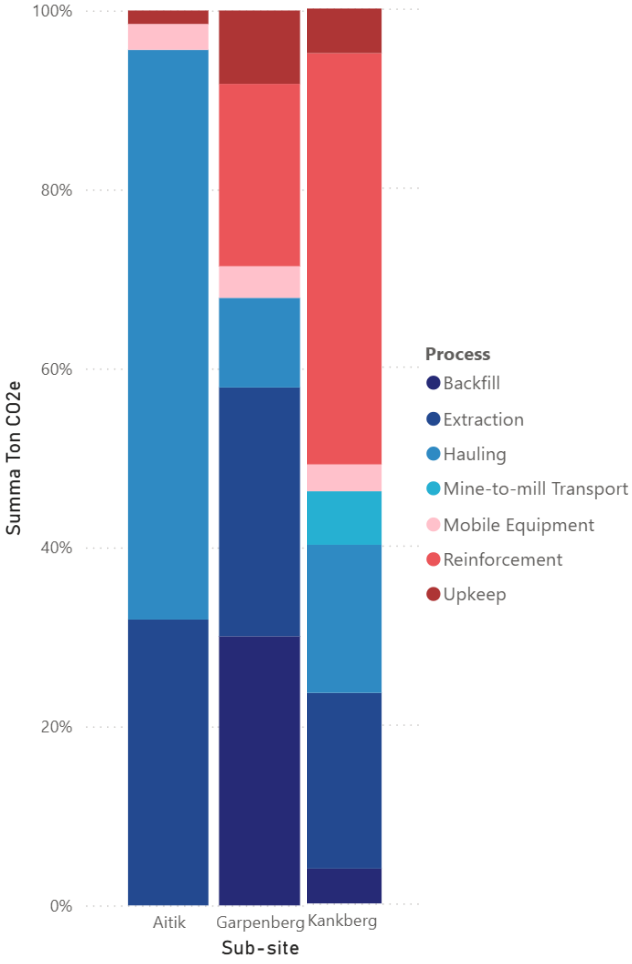
Figur 6: Utsläpps-kpi'er per exempelgruva (2021)

Vilka funktionella delar orsakar gruvans koldioxidutsläpp

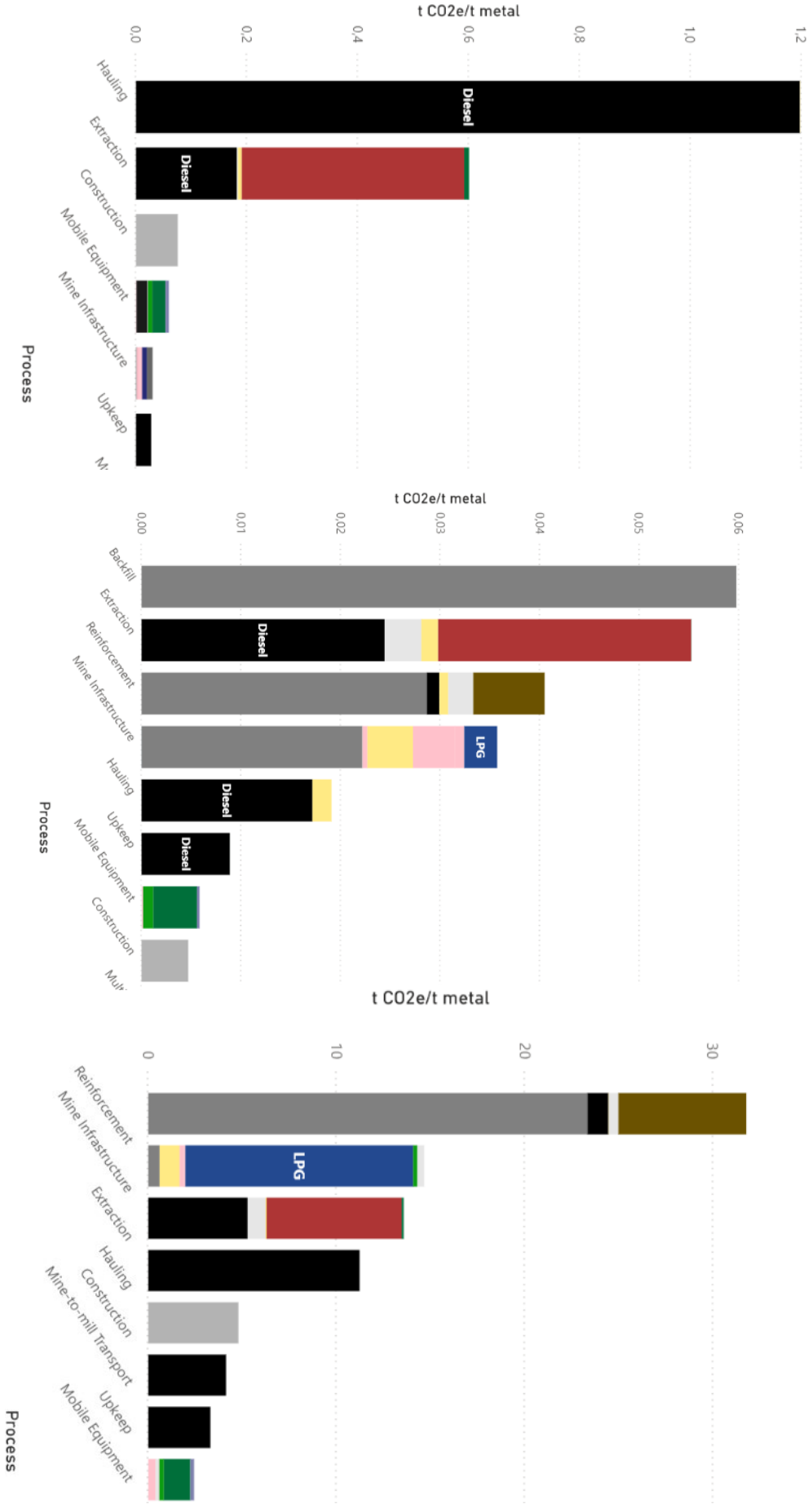
Utsläppsnivåer korrelerar starkt med teknikval. Alla teknikval syftar till att uppnå ett visst mål inom olika processer inom bergbrytningen. Bergbrytningen har fördelats i olika processer för vidare analys;

- Losshållning: Borrning, laddning, sprängning, salvvattning och utlastning
- Transport: Förflyttning av berg från lastmaskninen till anrikningsverket
- Förstärkning: Skrotning, betongsprutning, nätning, bultning
- Återfyll: återfyll av utbrutna områden med berg, pasta osv
- Fordon: reservdelar för nödvändiga fordon
- Underhåll: Persontransporter, gruvinfrastruktur, byggprojekt, övrigt

Värd att notera är att de olika funktionerna har en väsentligt annan andel i gruvans utsläpp, beroende på brytningsmetod. För dagbrottsbrytning står transporter av berg samt losshållning för nästan all utsläpp; under jord är processerna mer jämnfördelade, med bergförstärkning och återfyll som står för runt hälften av gruvans totala klimatpåverkan, men var även losshållning och transport står för en relativ stor andel av utsläppen. Andelen för transport är större i Kankberg än i Garpenberg, eftersom kankbergsgruvan saknas en skipp för bergtransporten till ovan jord. Igensättningsbrytningen i Kankberg leder till en större andel av bergförstärkning, medan pastafyllen i Garpenberg ökar deras klimatpåverkan på återfyllssidan. Underjordsgruvor har också en relativt större andel för underhåll, medans andelen för olika typer av maskiner står för en ungefär lika stor andel i alla gruvtyper. Kankbergsgruvan har en liten andel för transporter från gruvan till anrikningsverket, eftersom anrikningsverket inte finns på samma plats som gruvan. Om man skulle jämföra från år till år skulle man också notera att utsläppen kan variera kraftigt på transportsida, på grund av variationer i körsträckor, medans losshållning och bergförstärkning är stabila så länge bergproduktionen inte varieras. Mängden nödvändig infrastruktur beror på gruvans storlek och kompakthet.



Figur 7: Andel utsläpp per brytningsprocess



Figur 8: Utsläppsorsaken per brytningsprocess för Aitik (längst upp), Kankberg (mitten) och Garpenberg (längst ner);

OBS: notera att skalan är olika per gruva.

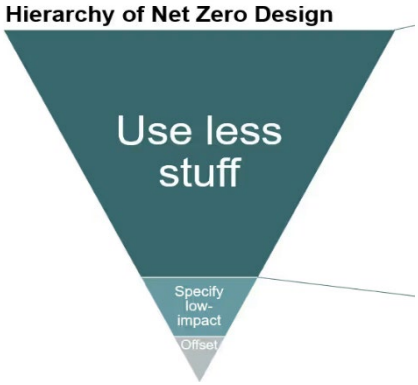
Hur brytningsmetod påverkar utsläppen

Brytningsmetodens val är avgörande, både för dagens utsläppsnivåer, men också när man kollar på hur svårt det kommer att bli i framtiden att jobba för utsläppsfri gruvbrytning. Om vi kollar på de olika processteg i mer detalj (Figur 8), så står två utsläppskällor för över 90% av gruvans utsläpp, fördelat i två gruvprocesser, nämligen diesel och sprängmedel transport och losshållning. För den större och mer komplexa underjordiska Garpenbergsgruvan så dominerar cement, som också används i fyra olika processer, nämligen bergförstärkning, återfyll, gruvinfrastruktur och övriga byggprojekt. Diesel är den näst största källan, relativt jämnfördelat mellan losshållning, transporter och persontransporter. I den relativt okomplicerade och mindre Kankbergsgruvan blir bilden någorlunda jämförbart med Garpenberg, däremot tar LPG en större andel, eftersom gruvan behövde år 2021 fortfarande ventilationsuppvärmning med LPG. Återfyllen skedde bara med gråberg, som också gjorde att utsläppen från återfyll räknades in under transport, och inte krävde extra utsläpp.

Dagbrottsbrytning har relativt höga utsläppsnivåer, eftersom stora mängder av berg som behöver loshållas och flyttas. Detta gör utmaningen också simpel däremot; det finns två stora ’bovar’ när man kollar på dagbrottens utsläpp; sprängmedel och bergtransporter. Underjordsgruvor är mer komplicerade; mer selektiv brytning av mer höghaltiga malmer leder till lägre utsläppsnivåer på losshållning och transport. Däremot krävs också ett mycket mer omfattande bergförstärkningsarbete, i vissa fall återfyll, samt en mer komplex gruvinfrastruktur, med bergschakt, komplexa ramper och tillredningsvägar, ventil‡ ionsanläggningar och fler människor per ton av berg. Speciellt utmanande är det stora behovet av cement, som är omöjligt att ersätta med de flesta bergbrytningsmetoder, och är omöjligt att göra utsläppsfri, eftersom det krävs koldioxidutsläpp när man förvandlar kalk till cement. Inom underjordsbrytning finns det däremot fler alternativ; man kan till exempel notera att rasbrytning (som Boliden inte tillämpar) slipper återfyllnad. Intressant nog finns det två motsatta orter mot klimatvänligt underjordisk gruvbrytning; antingen så kör man mer mot väldigt selektiva brytningsmetoder, som minimerar materialhanteringen och på så sätt minskar klimatpåverkan, eller så kör man mot mer storskalig gruvbrytning, som försöker utnyttja skalfördelarna så mycket som möjligt.

Vilka åtgärder är realistiska

Frågan nu är vilka åtgärder bergbrytningsbranschen kan ta för att få nollutsläpp i 2050. Bäst är alltid att först se om en viss aktivitet överhuvudtaget ska ske; detta är, om inte någonting annat, bra för gruvans ekonomi. Många utsläppskällor finns till exempel för att vi behöver ha människor vid gaveln för att genomföra bergarbete. Tänk på en hög nivå av bergförstärkning som också skyddar mot mindre stenras, gruvventilation (behövs delvis för en



Figur 9: Hållbarhetens åtgärdshierarki (The Institution of Structural Engineers, 2026)

mänsklig arbetsmiljö och delvis för bränslemotorer) och persontransporter. Här kan automation små småningom komma att gå hand i hand med koldioxidfri gruvbrytning, speciellt för underjordisk gruvdrift.

Ett annat exempel är kvaliteten på prospekteringsarbete och gruvplanering; om man skulle kunna slippa bryta gråberg så mycket som möjligt, och begränsa sig till de mest höghaltiga malmzonerna, skulle det vara möjligt att också väsentligt minska utsläppen. Just för den här anledningen har Garpenbergsgruvan i dagsläget den överlägsen lägsta utsläppen per mängd metall; brytningskostnaden per mängd metall är här helt enkelt som lägst, tack vare en gynnsam geologi och tillräckliga halter. Även effektiv gruvinfrastruktur som minimerar bergtruckskörning, såsom bergskippar och transportband, minskar utsläppen från bergtransporter. Ett sista exempel är utformningen och storleken på bergbrytningen; normalt sett behövs mindre bergförstärkning och sprängmedel per ton malm, när man spränger större pallar. Man kan konstatera att man kan reducera ordentligt med bra gruvplanering, men för det sista krävs det ytterligare åtgärder.

När man går vidare till lösningar som inte kan lösas genom skicklig bergsingenjörskonst är nästa steg att kolla vilka utsläppskällor går att bytas ut mot utsläppsfria alternativ; el är redan idag fossilfri i Sverige, men en större utmaning finns inom elektrifiering; mot dagens exceptionella priser för batterifordon i gruvbranschen verkar detta omöjligt; om man däremot jämför med kostnadsutvecklingen i det bredare samhället verkar det oundvikligt att elektrifierade gruvfordon innan 2050 kommer att ha en lägre total cost of ownership än bränslefordon (Ranggård, 2025). Bredvid finns det redan framgångsrika implementeringar av till exempel värmeväxlare för gruvuppvärmning. Bränslen verkar med andra ord inte ett stort problem på längre sikt, förutsatt att elpriser inte kommer att öka mycket. Naturgasfria sprängmedel har utvecklats; utmaningen hittills är att de inte kan användas i alla gruvmiljöer. Det är rimligt att förvänta sig att de här problemen kan komma att åtgärdas inom de närmsta 20 år; kostnaden kan däremot inte förväntas att bli lägre än för kvävenitratbaserade sprängmedel. Boliden varit framgångsrikt med ersättning av slaggar som kan uppfylla en del av bindemedelsfunktionen i stället för

Reduceringspotential	**Aitik**	**Garpenberg**	**Kankberg**	**2030**	**2050**
Fossilfri el	-0,4%	-4%	-1,5%		
Elektrifiering	-71%	-23%	-44%		
Utsläppsfria sprängmedel	-16% (20%)	-8% (-11%)	-6% (-8%)		
Utsläppsfri cement	-0%	-24% (-47%)	-10% (-26%)		
Utsläppsfri stål	-7%	-12%	-15%		
Total	**-94,4%**	**-71%**	**-71,5%**		
Övrigt	1,6%	2%	5,5%		

Figur 10: Reduktionspotential per utsläppsfri teknik;

konkurrenskraftig (grön), finns allmänt tillämpningsbar på marknaden men till högre kostnad (gul), delvisa lösningar tillgängligt (orange), inte fullskaligt och konkurrenskraftigt tillgängligt (röd); sprängmedel anses kunna kraftigt minska sitt utsläpp när man byter ut nitraten mot väteperoxid, däremot finns det ännu större potential när man skulle kunna byta ut bränslet. På samma sätt skulle en maximerad användning av cementersättningar kunna åstadkomma en väsentlig reduktion. För ytterligare förbättringar krävs däremot att

cement, på ett lönsamt sätt; Portlandcement kan däremot aldrig ersättas helt. Till sist behövs fossilfritt stål, även från järnmalm. Delvis levererar flera stålbolag redan idag fossilfritt stål från återanvänd skrot; kostnaden förväntas däremot med dagens teknik inte bli lägre än för kolbaserat stål. Slutsatsen redovisas i Figur 10; sammanfattningsvis verkar det rimligt att utsläppen kan reduceras för en relativt liten kostnad mellan 70% för underjordsgruvor och över 90% för dagbrott; mer konservativt, när man inte accepterar någon extra kostnad för utsläppsfri gruvbrytning, är den förväntade reduktionen på över 70% för dagbrott, och runt 50% för underjordsgruvor. De kvarvarande 30-50% reduktionen som kostar pengar kräver en form av koldioxidprissättning för att gå runt även i en vanlig affärsplan.

Gröna ekonomiens ekonomi

De resterande 30% (dagbrott) och 50% (under jord) av utsläppen som inte kan åtgärdas med åtgärder som *sparar* pengar kräver åtgärder som åtminstone kommer att kosta mindre än världens koldioxidkostnad. Det finns olika åsikter om vad det här priset borde vara, eftersom den exakta ekonomiska skadan som kan förväntas av klimatförändring är oklart; ovanpå det blir det framför allt en etisk fråga hur de kostnaderna bäst fördelas över olika generationer. För att inte förvandla den här avhandlingen alltför mycket till en nationalekonomisk diskussion används en spann mellan två möjliga koldioxidpriser; dagens ETS-pris (som är det faktiska priset företag inom koldioxidintensiva branscher inom EU redan betalar idag) på en sida, och en studie av Biden-regeringen som satte den sociala kostnaden för en utsläppt ton koldioxid på 190 USD~2000 SEK på dåtidens kronkurs (Milano, 2025). När man multiplicerar de här kostnaderna med utsläppsintensiteten per mängd metall får vi tre kraftigt varierande priser per gruva, som återigen bekräftar hur nära de verksamheten är från koldioxidfri gruvbrytning (Figur 11). För att ställa kostnaden i perspektiv jämförs detta med ett ungefärligt värde för producerat metall. Annars sagt, rimligtvis får brytningskostnaderna inte stiga med mer än 17% för Kankberg, eller 1,5% för Garpenberg, annars blir nackdelarna för koldioxidåtgärderna för stora. Med andra ord, gruvor som är redan bättre idag, behöver göra mindre för att bli kompatibelt med 2050-målet, även när man följer ekonomins logik. Notera att de använda utsläppsmängder motsvarar utsläppen år 2021; de verkliga kostnaderna kommer med andra ord sannolikt vara betydligt lägre, när man tar hänsyn till alla lönsamma åtgärder som är möjliga. Notera också att koldioxidkostnaden för bergbrytningen är bara en del av den totala utsläppen av slutmetallen kommer någorlunda högre, när man också tar hänsyn till anrikning och smältning. Utsläppen från anrikning och smältning är däremot betydligt lägre än för bergbrytning. Frågan är nu om man kan åtgärda även de ’hard to abate’ koldioxidutsläppen.

Värde per ton ekonomisk metall (kSEK)	**Kankberg**	**Aitik**	**Garpenberg**
Utsläppskostnaden	65-172	1,5-4	0,173-0,46
Marknadsvärde producerat metall	1000	115	30
Maximal rimlig kostnadsökning	6,5-17,2%	1,3-3,5%	0,6-1,5%

Figur 11: Kostnadsutrymme fossilfria åtgärder per gruva

Framtidens gruva som kolsänka

Dagens lagringskostnader för koldioxid är någonstans mellan 1000 och 2800 SEK/ton koldioxid, och inte tillämpbara för alla koldioxidkällor (ING, 2026). Med en förväntad acceptabel kostnad på mellan 750 och 2000 SEK/ton koldioxid är det tydligt att koldioxidlagring, åtminstone med dagens teknikläge, inte är konkurrenskraftigt. Precis när det gäller behovet för lösningen för de sista 10-50% av behovet för koldioxidfria lösningar genom lagring av koldioxid som ända rimliga alternativ har gruvdriften möjligtvis lösningar tillgängligt. I dagsläget finns det två spår som kan ha kostnader som ligger under dagens koldioxidlagringskostnader, och möjligtvis även under samhällskostnaden för koldioxid. Den första är att snabba upp koldioxidlagringen i (ultra)mafisk gruvavfall, som naturligt lagrar koldioxid. Ett andra spår är att använda sig av återfyllen i underjordiska gruvor, genom att blanda koldioxidlagring med cementerat återfyll. De här två forskningsspår är i ett tidigt skede, men kan i det bästa fallet till att gruvbranschen kan kompensera för de kvarvarande utsläppen, och möjligtvis mer.

Slutsats

Gruvdriftens växthusgasutsläpp orsakas av olika källor, som är likadana för olika gruvor, men mycket annorlunda i storlek beroende på brytningstyp. Detta gör att en gruvans växthusgasutsläpp i dagsläget bestäms först och främst av gruvans geologi, och sen på hur man väljer att bryta malmen. Först så är frågan om malmen bryts genom dagbrottsbryttning eller från under jord avgörande. Dagbrottsbrytning har normalt sett en större påverkan, eftersom man är tvungen att flytta större mängder material, även när själva förflyttningen av material är mycket mer klimatvänligt sett i ton koldioxid per ton malm. Dagbrott har också allmänt sin största utsläpp från transporter av berg, och näst störst från losshållning. Underjordsbrytning är normalt sett mindre koldioxidintensivt sett per ton metall producerat, eftersom man är mer selektivt med att bryta högre malmhalter. Per ton malm har man dock en högre utsläpp, eftersom det krävs en mer omfattande gruvinfrastruktur, och transporterna blir mer småskaliga. Inom underjordsbrytning bestäms mycket av den valda brytningsmetoden; är man tvungen att fylla med pasta eller andra cementhållande återfyll kommer utsläppen vara högre för återfyllen än när man inte behöver göra det. På andra sidan brukar utsläppen från mängden sprängmedel och antal meter tillredning per mängd malm vara mindre. Brytningsmetodvalet skapar alltså förutsättningarna för hur hög koldioxidutsläppen är idag, men bestämmer också hur stor uppgiften blir när man vill göra brytningen hel koldioxidfri. Då kan man konstatera att storskalig underjordsbrytning idag verkar ha lägst koldioxidavtryck. När man vill jobba mot koldioxidfri bergbrytning är det ingen fråga *om* det är möjligt att bryta koldioxidfri; koldioxidfri bergbrytning har funnits sen romersk tid. När man väger in andra teknik- och samhällskostnader däremot blir frågan däremot annorlunda. Koldioxidfri gruvbrytning är inte hållbart när det får andra (indirekta) kostnader som överstiger kostnaden för det koldioxidintensiva alternativet. Bergbrytningens utsläpp orsakas främst av fem källor; el, bränsle, cement, sprängmedel och stål. I Sverige är elen redan idag praktiskt sett koldioxidfri, gruvbranschen behöver alltså inte jobba mycket där längre. Bränslen hanteras bäst genom elektrifiering. Delvis är gruvtransporter och gruvuppvärmning redan elektrifierat idag, genom skippar,

transportband och värmeväxlare till exempel. Förväntan är också att elektrifiering kommer också vara lönsamt i alla fall innan 2050. Cement är tuffare att göra utsläppsfri. Det finns alternativa bindemedel, som kan i det bästa fallet halvera återfyllens och betongens utsläpp; helt cementfri kan det däremot aldrig bli, och det innebär att man då är beroende på koldioxidinfångning. Fossilfria sprängmedel har utvecklats, men funkar i dagsläget ännu inte i alla förhållande, och är i dagsläget inte heller billigare än fossilbaserade sprängmedel. Fossilfritt stål är det sista steget som behövs; i dagsläget är detta inte heller billigare. Sammanfattningsvis kan man konstatera att en 70% reducering i utsläpp för dagbrott och 50% reducering för underjordsbrytning verkar rimligt till lägre brytningskostnader år 2050. För att klara de sista stegen mot fossilfri gruvbrytning krävs åtgärder som sänker kostnader för de här ’hard to abate’ kategorierna, och ett koldioxidpris som är högre än merkostnaden. Orten till koldioxidfri gruvbrytning är lång, men verkar ha ett slut.

Bibliografi

FN. (den 19 02 2026). *The Paris Agreement*. Hämtat från United Nations: https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement

Håkansson, M. (2000). *Skogsencycklopedin.* Stockholm: Sveriges Skogsvårdsförbund.

ING. (den 22 01 2026). *Carbon capture and storage enters a new era of progress*. Hämtat från Think.ing.com: https://think.ing.com/articles/energy-ccs-entering-a-new-era-of-progress/

International Energy Agency. (den 19 02 2026). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. Hämtat från iea.org: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025

Milano, B. (den 06 03 2025). *The 'social cost of carbon'*. Hämtat från Harvard Law Today: https://hls.harvard.edu/today/the-social-cost-of-carbon/

Ordböcker, S. A. (den 18 02 2026). *Sök i tre ordböcker på en gång*. Hämtat från svenska.se: https://svenska.se/?activeTab=so&q=milj%C3%B6&id=244513&homografNr=&highlightLabel=&exactMatch=true

Pfenning-Butterworth, A. e. (2024). Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. *The Lancet Planetary Health*, Volume 8, Issue 4, e270 - e283.

Ranggård, J. (2025). *Electrification Open Pit Mining.* Skellefteå: Boliden.

Susanne Preunkert, e. a. (2019). Lead and Antimony in Basal Ice From Col du Dome (French Alps) Dated With Radiocarbon: A Record of Pollution During Antiquity. *Geophysical Research Letters*.

Söderström, V. (2023). *Boliden's Climate Impact.* Skellefteå: Boliden.

The Institution of Structural Engineers. (den 15 02 2026). *The hierarachy of net zero design*. Hämtat från istructe.org: https://www.istructe.org/resources/blog/the-hierarchy-of-net-zero-design/

World Bank Group. (den 10 06 2025). *Global Carbon Pricing Mobilizes Over $100 Billion for Public Budgets*. Hämtat från Worldbank.org: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/06/10/global-carbon-pricing-mobilizes-over-100-billion-for-public-budgets#:~:text=The%20report%2C%20*State%20and%20Trends%20of%20Carbon,capital%20*%20Channel%20funds%20to%20development%20priorities

World Resources Institute. (den 05 05 2020). *A global breakdown of greenhouse gas emissions by sector*. Hämtat från Visual Capitalist: https://www.visualcapitalist.com/a-global-breakdown-of-greenhouse-gas-emissions-by-sector/