

DYNAMISK OPTIMERING AV BETONGKONSTRUKTIONER

*LCA och LCC som metoder att nå klimatneutral användning av
sprutbetong i tunnlar*



Larissa Strömberg

2021-08-30

FÖRORD

Rapporten presenterar resultatet av forskningsprojektet *Dynamisk optimering av betongkonstruktioner*, vilket är en integrerad del av en större forskningssatsning mellan svenska entreprenörer och Institutionen för Bygghvetenskap på KTH. I satsningen ingår tre separata projekt:

- Etapp A: *Dynamisk optimering av betongkonstruktioner*
 - Avslutat seniorforskningsprojekt som presenteras i denna rapport
 - Finansierades av SBUF (ID 13518), InfraSweden2030 och byggindustrin
- Etapp B: *Anpassning av vägdimensionering för LCA och LCC*
 - Pågående seniorforskningsprojekt
 - Finansieras av SBUF (ID 13722) och byggindustrin
- Etapp C: *Effektiv reparation av betongvägar*
 - Pågående doktorandprojekt
 - Finansieras av Trafikverket.

SBUF:s projekt genomförs av samma projekt- och referensgrupp. Arbetet utförs hos KTH Bygghvetenskap, avdelningen för Betongbyggnad. För projektledning ansvarar Larissa Strömberg (NCC/Svevia/KTH). I projektgruppen ingår Adj. Prof. Malin Löfsjögård (KTH och Svensk Betong), Prof. Anders Ansell (KTH), Docent Fredrik Johansson (KTH), Adj. Prof. Staffan Hintze (KTH och Trafikverket) och Prof. Johan Silfwerbrand (KTH).

För satsningen finns en branschgemensam referensgrupp som fungerar som ett bollplank för att hämta erfarenheter, diskutera förslag och sammanfatta rekommendationer. I referensgruppen ingår representanter från flera svenska entreprenörsföretag och beställare: Åsa Lindgren (Trafikverket), Kenneth Domeij (Region Stockholm), Anders Lindström (Svevia AB) och Thomas Lindgren (Svensk Byggtjänst).

Projektet *Dynamisk optimering av betongkonstruktioner* hade en styrgrupp bestående av Adj. Prof. Staffan Hintze (ledamot i styrelsen för InfraSweden2030) och Tekn. Dr. Camilla Byström (programchef hos InfraSweden2030).

Inom doktorandprojektet, *Effektiv reparation av betongvägar*, har en doktorand anställts på Avd för Betongbyggnad på KTH på två år fram till licentiatexamen.

Författarnas tack går till styrgruppen och referensgruppen samt till alla som bidragit med sina kunskaper i projektet. Vårt speciella tack går till Dr Alun Thomas (All2plan Consulting ApS, Danmark) för givande synpunkter och granskning av dimensioneringsdata för sprutbetongförstärkning.

SAMMANFATTNING

Nya krav på utveckling av innovativa och klimatneutrala betongkonstruktioner ställs från beställarsidan. Byggnad och drift av tunnlar är en av de mest energi- och materialintensiva delarna av transportinfrastrukturen och det är därför särskilt viktigt att analysera dem utifrån ett livscykelerspektiv. Den största klimatpåverkan kommer från användning av stålarmering, stålbulvar och sprutbetong. I dag finns det få alternativ för att ersätta de traditionella materialen med miljövänligare. Tekniska dimensioneringsstandarder för bergförstärkning begränsar också valmöjligheterna. Detta på grund av de strikta kraven på bland annat frostbeständighet, livslängd och bärande förmåga.

Svenska byggindustrin står inför en omfattande omställning där traditionella byggmaterial, byggnadstekniker och hela anläggningskonstruktioner måste bytas ut mot mer klimatneutrala för att uppnå klimatmålet för den svenska infrastrukturen. Därför har denna studie fokuserats på två frågeställningar med syftet att undersöka möjligheter för minskning av klimatpåverkan från sprutbetongförstärkning i bergtunnlar. För det första finns det ett behov av att jämföra klimatpåverkan från traditionella respektive innovativa material för bergtunnlar. Nuvarande metoder för livscykelanalys, LCA och livscykelkostnader, LCC används oftast enbart för jämförelse av likvärdiga material och byggprodukter för samma tillämpningsområde och saknar tillämpningar för jämförelse av alternativa byggdelar (inklusive olika material). För det andra finns det många nya innovativa material som tagits fram för att ersätta traditionella material för bergförstärkning, men vilka ännu inte blivit godkända av svenska beställare. De nya materialen och produkterna saknar dock ofta verifierat på sin klimatpåverkan eftersom det kan bli dyrt att ta fram en miljövarudeklaration, EPD eller göra en LCA för en produkt som finns på marknaden men ännu inte är godkänd för att användas i anläggningsprojekt.

För att få svar på den första frågeställningen utfördes en omvärldsanalys av de senaste internationella standarderna för Hållbarhetsbedömning av anläggningskonstruktioner (EN 15643-5 och EN 17472). I standarderna presenteras en teoretisk ram för tvärdisciplinär optimering av hållbarhet för anläggningskonstruktioner. De befintliga standarderna beskriver övergripande principer för tillämpning av LCA och LCC för samtliga typer av anläggningskonstruktioner, men utelämnar tillämpningar på särskilda typer som broar, vägar och tunnlar och hänvisar för detta till nationella byggnormer och regler. Denna studie har överbryggt de otydligheterna i standarderna och utvecklat en metodik för tillämpning av LCA och LCC för bergtunnlar baseras på svenska nationella normerna för teknisk dimensionering av bergförstärkning.

Den utvecklade metodiken har använts för att besvara den andra frågeställningen och testats för att räkna klimatpåverkan från utförande av bergförstärkning med traditionella material (stålfibrer för sprutbetong och stålbergbulvar). Resultatet visade att medelvärde för klimatpåverkan från byggande av svenska bergförstärkningar med traditionella byggmaterial (sprutbetong med stålfibrer och stålbergbulvar) ligger på 776 kg CO₂-e per 1 (längd-) meter av tunnel under 120 år. Klimatpåverkan är starkt beroende av typ och mängd av byggmaterial, vilka i sin tur dimensioneras i relation till olika bergkvaliteten och varierar från 545 kg CO₂-e till 943 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år beroende av bergkvalitet där tunneln byggs. I testdelen utvärderades även minskningen av klimatpåverkan vid användande av två innovativa produkter som finns på marknaden och som har bevisat att de uppfyller teknisk och funktionell prestanda för bergförstärkning. Genomförda LCA:n visade att vid ersättning av stålbulvar och stålfibrer i sprutbetong med mer miljövänliga material som glasfiberarmerade polymerer (GFRP) bulvar och

makrosyntetiska fibrer minskar CO₂-e med 5% för byggfasen. När man tar hänsyn till klimatpåverkan från både bygg- och reparationsfasen verkar ersättning av traditionella stålbultar och stålfibrer för sprutbetong med GFRP-bultar och makrosyntetiska fibrer ge en minskning på 33%. Den totala klimatpåverkan från de mest förekommande bergförstärkningsklasser för bygg- och reparationsfaser varierar från 767 kg CO₂-e till 1 343 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år. Resultaten visar vikten av att inkludera drift- och underhållskedet i klimatberäkningar samt utformning av optimeringsåtgärder. Framtida reparationer har en stor påverkan på LCA:s och LCC:s resultat, och scenarierna med mindre underhåll kommer att ha den lägsta totala klimatpåverkan och samhällsekonomiska kostnaden. Utveckling och godkännande av nya innovativa material borde också göras baserat på dess potential att minska den totala klimatpåverkan och inkludera alla livscykelstege; byggande, drift och underhåll samt återvinning/återanvändning vid rivning.

LCA- resultat från denna studie kan användas för att uppdatera PCR för tunnlar (2019) och justera ingående standardvärden för bergförstärkning i Trafikverkets Klimatkalkylmodell. Det finns ett akut behov att förbättra de standardiserade värdena samt detaljeringsgraden för uppdelning i olika byggdelar utifrån faktisk klimatpåverkan, som ofta är kopplad till hur vissa byggdelar dimensioneras. Detta skulle, i ett tidigt skede, kunna förbättra det klimatrelaterade arbetet anläggningsprojekt och dessutom säkerställa att Trafikverkets strategier för klimatreducerande åtgärder för anläggningsinfrastruktur är baserade på mätbara verifierade utsläppsvärdena. Allt med syfte att uppnå en 100 % minskning av utsläppen av koldioxidekvivalenter fram till år 2045. Sådana faktiska utsläppsvärdena för klimatpåverkan från de mest förekommande svenska bergförstärkningsklasser, har tagits fram i denna studie.

Byggtekniska åtgärder för minskning av klimatpåverkan i anläggningsprojekt behöver kunna mätas och jämföras med syfte att identifiera kostnadseffektivitet för varje åtgärd, till exempel vid utvärdering av användande av en ny klimatneutral produkt istället för en traditionell produkt. Investeringskostnader för nya oprövade produkter är ofta högre än för traditionella produkter. Av den anledningen demonstreras en övergripande princip för valet av alternativa produkter för att uppnå önskvärd reduktion av CO₂-e utsläpp på ett för samhället kostnadseffektivt sätt i LCC-del av studien. Olika scenarier med olika kombinationer av byggmaterial/produkter rangordnades utifrån dessa klimateffektivitet, från värde på 12 kr/kg CO₂-e för bästa scenarion till 207 kr/kg CO₂-e för sämsta scenarion.

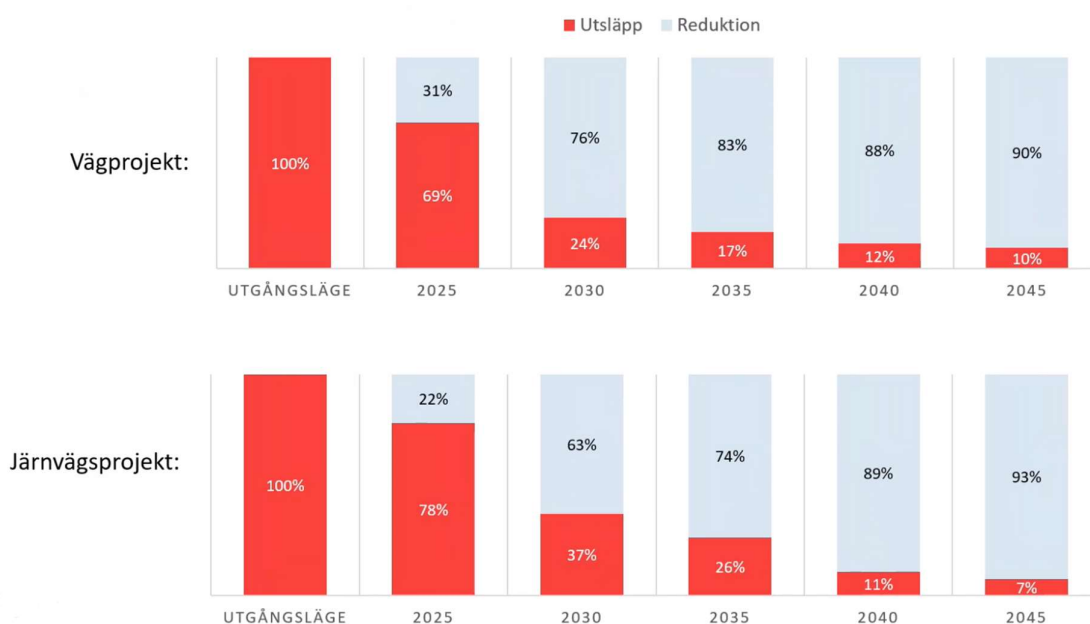
Forskningen som utfördes i projektet är ett första steg mot en implementering av de senaste standarderna för hållbarhetsbedömning av anläggningskonstruktioner. Projektet ger en ökad förståelse för vilka utmaningar som finns med vidareutveckling av byggstandarder, teoretiska beräkningsmetoder, upphandlingsmodeller samt styrning mot de politiska målen för reduktion av klimatpåverkan. Metodiken som utvecklades i projektet kommer att kunna tillämpas på andra typer av anläggningskonstruktioner både av betong och andra material. Resultaten kan också användas som en vägledning för entreprenörer och konsulter vid planering av åtgärder för reduktion av klimatpåverkan från bergtunnlar samt för svenska beställare vid utformning av upphandlingskrav och beräkningsmodeller för reduktion av klimatpåverkan.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND	5
2. SYFTE	7
3. GENOMFÖRANDE AV ETAPP A	7
3.1 INLEDANDE WORKSHOP	8
3.2 OMVÄRLDSANALYS	8
3.3 BESKRIVNING AV FÄLTSTUDIEN.....	8
3.4 PUBLICERADE ARTIKLAR	9
4. METODIK	10
4.1 Q-METOD	10
4.2 LCA METODIK.....	11
4.2.1 LCA för tunnlar.....	11
4.3 LCC METODIK.....	13
4.3.1 Nuvärdemetoden	13
4.3.2 Kostnadseffektivitet av åtgärder för minskad klimatpåverkan.....	13
5. RESULTAT	14
5.1 UNDERLAG FRÅN DIMENSIONERING	14
5.2 VAL AV ALTERNATIVA MATERIAL	14
5.3 DEFINITION AV FUNKTIONELL EKVALENT OCH SYSTEMGRÄNSER FÖR STUDIEN.....	16
5.3.1 Funktionell ekvivalent för LCA och LCC.....	16
5.3.2 Systemgränser för LCA och LCC.....	16
5.4 GENOMFÖRANDE AV LCA.....	17
5.4.1 Datainsamling för LCA	17
5.4.2 Beräkning av miljöpåverkan	18
5.4.2.1 Miljöpåverkan från byggfasen.....	18
5.4.2.2 Miljöpåverkan från bygg- och reparationsfasen.....	21
5.4.2.3 Jämförelse med andra studier.....	21
5.5 GENOMFÖRANDE AV LCC.....	22
5.5.1 Datainsamling för LCC	22
5.5.2 Beräkning av LCC.....	23
5.5.3 Beräkning av kostnadseffektivitet	23
6. SLUTSATSER	24
7. NÄSTA STEG	25
8. LITTERATURFÖRTECKNING	26

1. BAKGRUND

Under de närmaste åren kommer investeringar med nybyggnation av anläggningsinfrastruktur att ske i till exempel projekten Västlänken i Göteborg och Förbifart Stockholm. Beställare ställer idag allt högre krav på att byggindustrin ska minska sin klimatpåverkan. Trafikverket har satt ett mål att minska klimatpåverkan från den svenska infrastruktursektorn med 100% år 2045 jämfört med utgångsläge år 2015 (Trafikverket 2019a). Reduceringsmålet kommer att skärpas för varje anläggningsprojekt inom kommande åren, till exempel i vägprojekt som avslutas år 2030 ska klimatpåverkan minska med 76%, se Figur 1 (Trafikverket 2021). Det är inte säkert att det går att uppnå den minskningen med nuvarande tekniska byggmetoder och traditionella byggmaterial. Svenska byggindustrin står inför en omfattande omställning där traditionella byggmaterial, byggtekniker och hela anläggningskonstruktioner måste bytas ut mot mer klimatneutrala för att kunna uppnå klimatmålet för svenska infrastruktursektorn.



Figur 1: Förslag på klimatmål för väg- och järnvägsprojekt fram till år 2045 (Trafikverket 2021).

Byggtekniska åtgärder för minskning av klimatpåverkan i anläggningsprojekt behöver kunna mätas och jämföras med syfte att identifiera kostnadseffektivitet för varje åtgärd, till exempel vid utvärdering av användande av en ny klimatneutral produkt istället för en traditionell produkt. Det behöver skapas en ökad förståelse om hur vetenskapsbaserade metoder för beräkning och optimering av klimatprestanda som livscykelanalys, LCA och bedömning av ekonomisk prestanda, livscykelkostnadsanalys, LCC kan integreras med traditionella byggstandarder, offentlig upphandling, styrning mot klimateffektiv produktutveckling, projektering, produktion och förvaltning.

I svenska infrastrukturprojekt är det nu obligatoriskt att beräkna klimatpåverkan och genomföra klimatminskningsåtgärder utifrån standardvärdena för mest typiska byggmaterial och byggdelar. Dessa finns definierade i Trafikverkets Klimatkalkylmodell (Trafikverket 2021). Verktöget är baserat på principerna för LCA. Klimatpåverkan från byggmaterial står ofta för den största delen av infrastrukturprojektens totala klimatpåverkan (Trafikverket 2019b). Det framgår tydligt av

nationella planen 2018 - 2029 (2019b) att cement och betong står för den största klimatpåverkan (43%), följt av bränsle, (25%) och stålarmering (11%) i infrastrukturprojekt.

Byggnad och drift av tunnlar är en av de mest energiintensiva och materialintensiva delarna av transportinfrastrukturen. Det är därför särskilt viktigt att analysera dem utifrån ett livscykelperspektiv (Huang et al 2015). Sprutbetong och stålprodukter, som används i den primära bergförstärkningen vid byggande av tunnlar och bergrum, utgör idag en betydlig miljöpåverkan i anläggningsprojekt. Trafikverkets Klimatkalkylmodell har testats i flera tunnelprojekt, till exempel Förbifart Stockholm och Västlänken, där beställaren satt ett mål att reducera klimatpåverkan 10% respektive 25% av utgångsläget (Trafikverket 2015 och 2016c). Det visade sig att det inte finns ett mer miljövänligt alternativ för ersättning av den traditionella sprutbetongen. Tekniska dimensioneringsstandarder begränsar valmöjligheter eftersom det ställs högre funktionella krav på frostbeständighet och teknisk hållbarhet av bergförstärkningskonstruktioner än för en vanlig anläggningsbetong.

Det finns flera metodmässiga utmaningar med implementering av Klimatkalkylmodell för identifiering av de mest effektiva åtgärderna för minskning av klimatpåverkan för tunnlar. För det första är det nuvarande verktyget begränsat till optimering av klimatpåverkan av enskilda byggmaterial vilket innebär att klimatpåverkan från bergtunnlar kan minskas på två sätt, antingen genom att minska mängden material eller genom att använda material med lägre klimatpåverkan än ett standardvärde i Klimatkalkylmodell (Trafikverket 2021). Mängd och typ av material för en tunnel (främst cement, sprutbetong och stålarmering) beror dock på kvalitén på berget genom vilken tunneln ska passera (Lia 2012). Det är tunnelns geotekniska design (Trafikverket 2016a och 2016b) som avgör typ av material samt mängd. Kriterier som inte kan ändras för att förbättra klimatprestanda i ett senare skede när klimatberäkning görs. Rapporten Klimatkalkyl – Översyn/uppdatering av resursschabloner (Tyréns 2019) lyfter fram utvecklingsområden med Trafikverkets Klimatkalkylmodell. Den menar dels att de befintliga standardvärdena för klimatpåverkan från bergtunnlar måste justeras eftersom underlaget enbart är baserat på studier för Botniabanan för järnvägstunnlar (EPD for railway tunnels on the Botnia Line 2016) och Förbifart Stockholm för vägtunnlar. Dels förespråkar den att modellen utvecklas och uppdateras genom att representera ”vanligt/genomsnittligt” utförande för ingående byggdelar i tunnlar för att kunna bli relevant. Klimatpåverkan från bergbultar uppskattas i modellen bara från stål som ingår i bultar och omfattar inte klimatpåverkan från cementblandning som injekteras för att förankra bultarna. I modellen finns endast bult som används tillsammans med sprutbetongen i avseende att förstärka berget. Bult mängdas dock separat för förstärkningen vilket innebär att bult normalt dubbelräknas om mängder förs in i Klimatkalkylmodell.

För det andra rapporteras för närvarande klimatpåverkan i ett tunnelprojekt efter att anbudet lämnats in och är en del av projekteringsarbete när alla dimensioneringsbeslut avseende materialtyp och material mängder redan har tagits. Förmågan att minska klimatpåverkan i ett infrastrukturprojekt är dock avsevärt mycket större i ett tidigt skede enligt en brittisk standard Carbon Management in Infrastructure (PAS 2020), där uppskattas att klimatpåverkan kan minskas med upp till 100 procent (i jämförelse med ett utgångsläge) i det tidiga planeringsstadiet. Detta är dock inte möjligt om detaljerade miljödata om tekniska lösningar och inköpt material saknas. Entreprenörerna är vanligtvis inblandade i detaljprojekteringskedet och byggskedet. I en totalentreprenad, där entreprenören utför detaljerad projektering och bygger, är det möjligt att minska klimatpåverkan med 20-60 procent (PAS 2020). I en utförande entreprenad, där entreprenören bara bygger, är en minskning med cirka 20 procent möjlig. Den nuvarande dimensioneringsprocessen är inriktade att uppfylla de tekniska kraven genom att

fastställa en slutlig lösning ganska tidigt i planeringskedet. Dessa ”låsta” tekniska lösningar blir senare svårare att ändra utifrån miljökraven.

För det tredje finns det ingen möjlighet att lägga in projektspecifika materialtyper och mängder för drift- och underhåll, utan klimatpåverkan från den fasen räknas ut automatiskt utifrån inlagda standardvärdena för byggfasen. En minskning av klimatpåverkan från underhållsfasen, till exempel ett minskat behov av reparationer, accepteras inte som en "reduceringsåtgärd" av Trafikverket.

Därför har denna studie fokuserats på två frågeställningar med syftet att undersöka möjligheter för minskning av klimatpåverkan från sprutbetongförstärkning i bergtunnlar. För det första finns det ett behov av att jämföra klimatpåverkan från traditionella respektive innovativa material för bergtunnlar. Nuvarande metoder för livscykelanalys, LCA och livscykelkostnader, LCC används oftast enbart för jämförelse av likvärdiga material och byggprodukter för samma tillämpningsområde och saknar tillämpningar för jämförelse av alternativa byggdelar (inklusive olika material). För det andra finns det många nya innovativa material som tagits fram för att ersätta traditionella material för bergförstärkning, men vilka ännu inte blivit godkända av svenska beställare. De nya materialen och produkterna saknar dock ofta verifierat på sin klimatpåverkan eftersom det kan bli dyrt att ta fram en miljövarudeklaration, EPD eller göra en LCA för en produkt som ännu inte är godkänd och används på marknaden.

2. SYFTE

Ett övergripande syfte med alla tre projektetapper A, B och C är att analysera befintliga tekniska, LCA- och LCC-metoder för tidstypiska anläggningskonstruktioner och korrigera befintliga beräkningsmodeller med syfte att anpassa teknisk dimensionering till LCA och LCC.

Syftet med etapp A som avrapporteras i och med denna rapport är dels att skapa en vägledning för entreprenörer och konsulter vid planering av åtgärder för reduktion av klimatpåverkan i anläggningsprojekt. Dels att ge svenska beställare guidning vid utformning av verifieringsbara upphandlingskrav och mer projektanpassade beräkningsmodeller för reduktion av klimatpåverkan.

Målet med etapp A är att skapa en metodik för dynamisk optimering av klimatneutrala betongkonstruktioner. Metodiken ska testas på sprutbetongförstärkning i bergtunnlar och bergtrum för bedömning av miljöprestanda, ekonomisk prestanda och uppfyllande av de högt uppsatta tekniska och funktionella kraven i ett pågående tunnelprojekt.

3. GENOMFÖRANDE AV ETAPP A

Utifrån projektets syfte och mål användes olika arbetsmetoder.

1. En inledande branschgemensam workshop
2. Omvärldsbevakning och analys av nationell och internationell forskning
3. Genomförande av en fältstudie (LCA och LCC för ett tunnelprojekt)
4. Publicering av vetenskapliga artiklar om projektet.

3.1 Inledande workshop

Den 12 mars 2019 organiserade projektet en branschgemensam workshop ”LCA och LCC som metoder att nå klimatneutral användning av sprutbetong i tunnlar”. Syftet med workshopen var att skapa en tydlig målbild och ett önskeläge för den teknisk dimensionering för användning av sprutbetong i bergtunnlar, där ”nya” parametrar, som LCA och LCC används. Grupparbetet på workshopen fokuserades på att kartlägga avgörande parametrar för klimateffektivisering av sprutbetong i bergtunnlar. Vad saknas i nuvarande tekniska standarder för att kunna ta med en miljötanke redan i ett tidigt projekteringsarbete? Vilka hinder och möjligheter med miljövänlig sprutbetong för etablering av innovativa och klimatsmarta marknader? Kan innovativ klimatneutral sprutbetong uppfylla kraven i gällande byggföreskrifter och beställarkraven? Målgruppen var LCA- och LCC-expert, experter på tunnlar, inköp, projektchefer och upphandlingsansvariga hos beställare, utförare/entreprenörer och högskolor.

Totalt deltog 16 personer; entreprenörer (NCC och Svevia AB), beställare (Trafikverket, Region Stockholm och Swedavia), konsulter (Tyréns och SWECO), branschorganisationer (BeFo, Svensk Byggtjänst och InfraSweden2030) samt högskola (KTH) i workshopen. På workshopen beslutades om projektets omfattning och avgränsningar. Beslut togs om att underlaget efter dimensionering av teknisk prestanda för bergförstärkning med hjälp av Q-metoden, skulle användas som indata för en fältstudie med LCA och LCC.

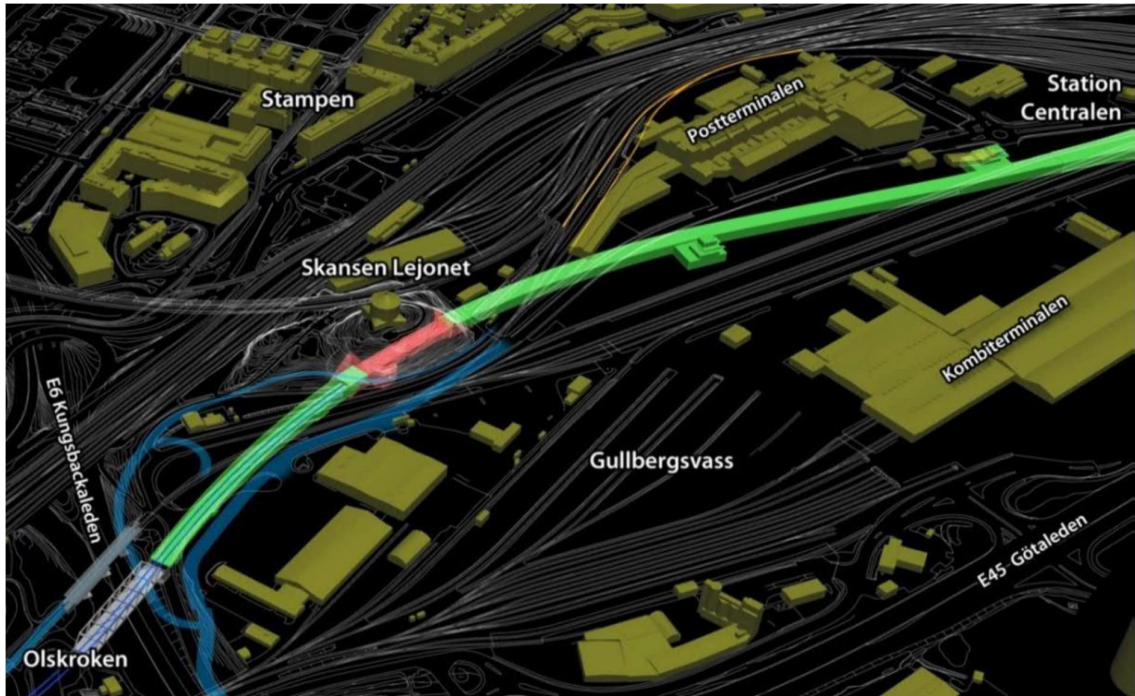
3.2 Omvärldsanalys

Omvärldsbevakningen fokuserade på att kartlägga tidigare utförda LCA:er samt en nuvarande praxis med klimatberäkningar i tunnelprojekt. De senaste standarderna för hållbarhetsbedömning av anläggningskonstruktioner (EN 15643-5 och prEN 17472) har använts för att utveckla en metodik för koppling mellan traditionell dimensionering av bergförstärkning enligt Q-metoden och LCA och LCC.

3.3 Beskrivning av fältstudien

I Göteborg byggs en sex kilometer lång dubbelspårig järnväg för pendeltåg och regionaltåg, Västlänken. Projektet startar vid Göteborgs centralstation, Centralen, där storskaliga tunneldrivningsarbeten ska genomföras i stadens centrum mellan 2018 och 2026. Projektet har delats in i flera entreprenader för uppförande av broar, bergtunnlar, betongtunnlar och flera stationer. I entreprenaden Centralen ingår en bergtunnel genom Gullberget, vars längd genom Gullberget är ca 98 meter med två bergportaler på östra och västra sidan, se Figur 2. Bergtunneln byggs enligt den svenska borra-och spräng-metoden för tunneldrivning och bergförstärkningen har dimensionerats enligt svenska normer för bergförstärkningsklasser med armerad sprutbetong och bergbultar. Mängder och typer av material som krävs för att uppfylla funktionella och tekniska kraven har hämtats från projektets materialmängdförteckning (MMF 2018). Projektet befinner sig nu i byggfasen. Dimensioneringsunderlaget föreskriver användning av traditionell stålfiberarmerad sprutbetong och traditionella stålbultar för bergförstärkning (PM 2018). Det var inte möjligt att ersätta dessa material och produkter med mer innovativa och klimatvänliga material och produkter på grund av projektets avtalsvillkor. Det fanns således tekniska och funktionella krav för tunnelns geotekniska design och konstruktion som inte var möjliga att ändra under projektets senare skede. Hela entreprenaden Centralen har krav på en minskning av klimatgasutsläpp med 25% jämfört med utgångsläget som var definierat av Trafikverket (2016c). I nuläget har flera klimatreducerande åtgärder genomförts i entreprenad Centralen, men inga av

dem berör bergtunneln, eftersom det ställdes så höga funktionella krav på frostbeständighet och teknisk hållbarhet för bergförstärkningskonstruktionen.



Figur 2. Berörd bergtunnel är rödmarkerad. Före och efter bergtunneln går Västlänken genom av betongtunnlar som är grönmärkade (PM 2018).

3.4 Publicerade artiklar

I projekt *Dynamisk optimering av betongkonstruktioner* (Etapp A) har flera vetenskapliga artiklar publicerats:

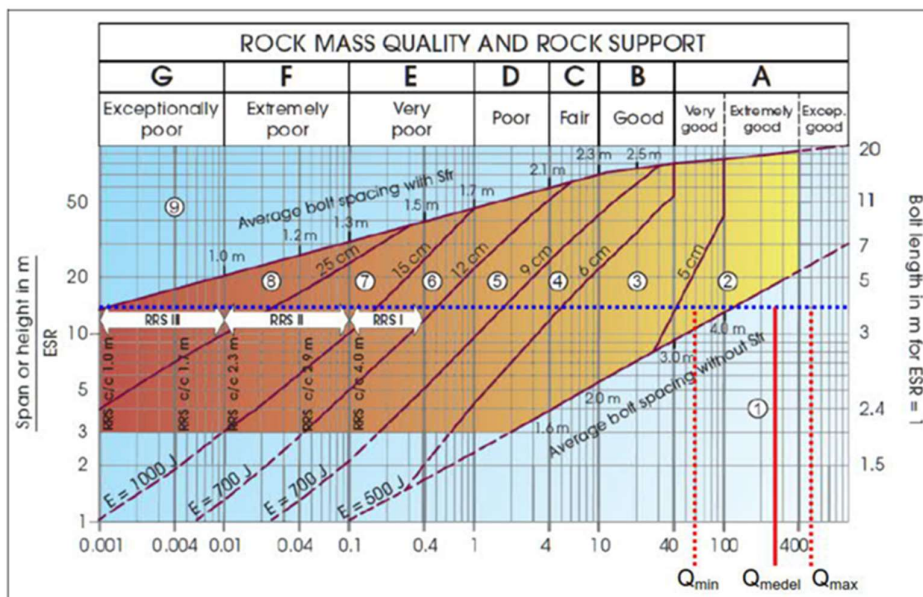
1. Strömberg L., Löfsjögård M, Ansell A. and Hintze S.: Optimization parameters sets for sustainable concrete in tunnels, Proceedings of the 10th International Structural Engineering and Construction Conference, Interdependence between Structural Engineering and Construction Management, 21-23 May 2019, Chicago, USA, Edited by Ozevin, D., Ataei, H., Modares, M. Gurgun, A., Yazdani, S., and Singh, A., ISBN: 978-0-9960437-6-2, 2019.
2. Ansell A., Nordström E. and Strömberg L.: Durability of Shotcrete Tunnel Linings due to Steel Fibre Corrosion in Cracks, Proceedings of World Tunnel Congress, WTC 2020, Kuala Lumpur, Malaysia, 15-21 May 2020.
3. Strömberg L., Johansson F., Ansell A., Hintze S., Silfwerbrand J.: Life Cycle Assessment and Strategies for Reducing the Greenhouse Gas Emissions Associated with Hard Rock Tunnels: a Swedish Case Study on Rock Support, ett manuskript är inskickat till International Journal of Life Cycle Assessment, november 2021.
4. Strömberg L., Ansell A., Johansson F., Hintze S., Silfwerbrand J.: Adapting Rock Tunnel Design to Life Cycle Assessment: Challenges, Driving Forces and Solutions, accepterad

4. METODIK

4.1 Q-metoden

Tunneldesign är specifik för varje land och beror på klimat, trafik, bergkvalitet och nationella tekniska riktlinjer. I Sverige används en väletablerad metod för geoteknisk dimensionering av bergförstärkning, Q-metoden (Trafikverket 2016a och 2016b). En geologisk undersökning av berg, där tunnel ska byggas, utförs med avseende att identifiera bergkvalitetsindelning enligt Rock Mass Rating, RMR-systemet (Bieniawski 1989). Sedan används Q-metoden, en empirisk dimensioneringsmetod som ursprungligen utvecklats av Barton et al (1974). Den används för att dimensionera typer av bergförstärkning som behövs för olika områden med olika bergkvalitet. Dimensioneringsresultat blir en uppdelning av en tunnel i standardiserade sektioner med homogena geomekaniska berggenskaper inom vilka ett begränsat antal (2 eller 3) bergförstärkningsklasser används.

Varje standardsektion har föreskrivna tekniska lösningar för att säkerställa att övergripande funktioner för en tunnel uppfylls för samtliga byggdelar till exempel injekteringsarbete, sprängning, tunneldrivning, bergförstärkningsarbete mm. Figur 3 illustrerar sambandet mellan bergkvalitet (Q-värde) och dimensioner för tjocklek för sprutbetong och längd och diameter av stålbultar. Volymen av sprutbetong och mängden av bultar ökar från kategori A till kategori G. Sporadisk bultning används endast för A- och B-kategorierna medan systematisk bultning appliceras från C och vidare. Sprutbetong används för alla kategorier utom för mycket stabilt berg i kategori A.



Figur 3: Exempel på användning av Q-metoden (PM 2018) för dimensionering av bergförstärkning.

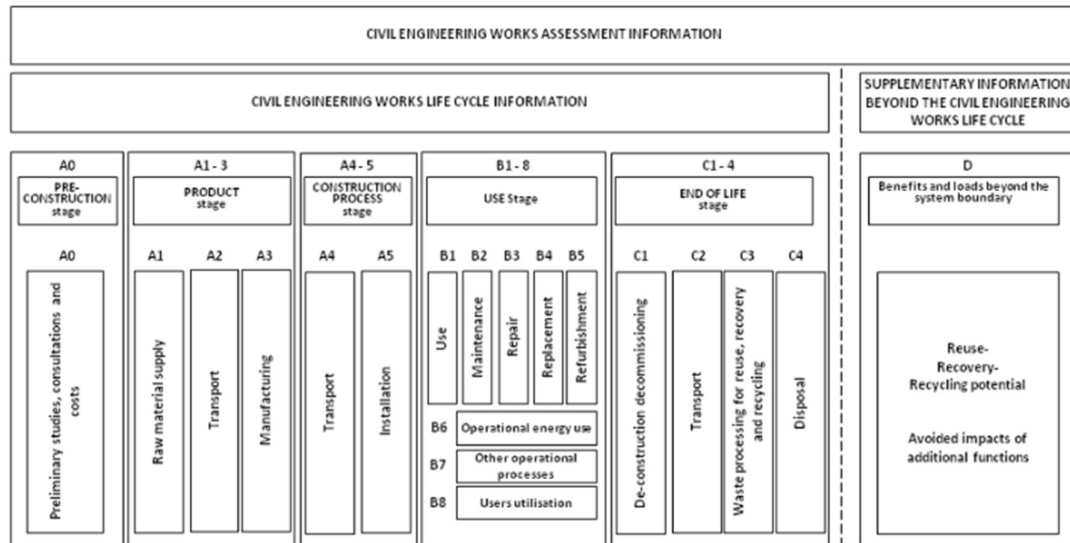
4.2 LCA metodik

4.2.1 LCA enligt olika standarder

LCA är en etablerad metod för att kvantifiera en produkts miljöprestanda och används ofta för att jämföra miljöprestanda för olika byggmaterial. Det finns flera publicerade LCA-studier för tunnlar, men på grund av olika antaganden och använda systemgränser är resultaten inte jämförbara. I projektet har flera LCA-studier för bergtunnlar byggda enligt borra-och sprängmetod studerats (Miliutenko et al 2012; EPD for the Botnia Line 2016), Norge (Lia 2012; Fremo Kalvå 2015; Huang et al 2015, 2020) och Kina (Guo et al 2019). De studierna genomfördes dock med olika systemgränser, olika LCA-metoder och olika sätt att modellera hela livscykeln, vilket gör att resultaten blir ojämförbara (Strömberg et al 2019). ISO 14040 (2006) och ISO 14044 (2006) standarderna beskriver grunden för en LCA, och dessa standarder användes av Miliutenko et al (2012), Lia (2012), Huang et al (2015, 2020), Fremå Kalvå (2015) och Guo et al (2019). Vid framtagande av en miljöproduktdeklaration, EPD för Botniabanan (2016) användes Produktspecifika regler, PCR (PCR 2013) och ISO 14025 (2006) som regelverken för utförande av en LCA.

LCA och klimatberäkningar för tunnlar är ofta begränsade till att uppskatta miljöpåverkan från byggnadsmaterial men utan att ta hänsyn till helheten. Det innebär att sammansättning av flera byggmaterial som kan påverka bland annat underhållsbehovet och livslängden på hela konstruktionen inte inkluderas i beräkningen. Huang et al (2015, 2020) och Guo et al (2019) har gjort ett ytterligare steg för att integrera LCA med teknisk dimensionering av tunnlar och har utfört flera LCAer för olika byggdelar i en tunnel, bland annat bergförstärkningsarbete. LCA på byggnadsverksnivå har genomförts i ett fåtal tunnelprojekt (Miliutenko et al 2012, EPD for the Botnia Line 2016), men inte enligt de senaste standarderna som EN 15643-5 (2017) eller prEN 17472 (2020). Trafikverkets riktlinjer (2019) hänvisar inte till EN 15643-5, fast denna standard har speciellt utvecklats för hållbarhetsbedömning av ett komplext tekniskt system som en tunnel är.

Inom det internationella standardiseringssamhället pågår ett aktivt arbete med att utveckla en teoretisk ram för tvärdisciplinär optimering av hållbarhet för anläggningskonstruktioner som broar, tunnlar, vägar etc. Målet är att utveckla metoder för att bedöma och jämföra byggnadsverk (inklusive olika material) på ett rättvist sätt. Enligt EN 15643-5 (2017) måste hållbarhetsbedömning, som inkluderar LCA, LCC och en social LCA, för alternativa lösningar för en anläggningskonstruktion utföras enligt samma systemgränser och en funktionell ekvivalent för att skapa jämförbarhet. Framtagande av en funktionell ekvivalent för jämförelse av miljö- och ekonomisk prestanda ligger utanför de standarderna, men uppmuntras att göras med hjälp av nationella vägledningar och standarder för teknisk dimensionering. Det nya tillgångssättet skapar en tydligare koppling mellan metoder för traditionell teknisk dimensionering och metoder för beräkning och optimering av hållbarhetsprestanda. Dessa är i dag inte kopplade till varandra och utförs dessutom vid skilda tillfällen i anläggningsprojekt. EN 15643-5 (2017) beskriver flera livscykelsteg eller informationsmoduler som kan ingå i en hållbarhetsbedömning för en anläggningskonstruktion, se Figur 4.



Figur 4: Livscykelsteg eller informationsmoduler som används vid bedömning av miljö, social och ekonomisk prestanda för anläggningskonstruktioner (EN 15643-5 2017).

Standarden exemplifierar vilka livscykelsteg kan ingå i en hållbarhetsbedömning:

- Modul A: Byggsfasen
 - Förberedelse och etablering (A0)
 - Utvinning av råmaterial (A1)
 - Transport av råmaterial till tillverkningsfabriker (A2)
 - Tillverkning av byggmaterial (A3)
 - Transporter till byggarbetsplats (A4)
 - Byggande (A5)
- Modul B: Drift och underhållsfasen
 - Drift (B1)
 - Underhåll (B2)
 - Reparation (B3)
 - Ersättning av byggdelar (B4)
 - Ombyggnation (B5)
 - Energianvändning under driftsfasen (B6)
 - Vattenanvändning under driftsfasen (B7)
 - Användning av anläggningen, till exempel bränsleanvändning för bilar som kör genom en tunnel (B8)
- Modul C: Avvecklingsfasen
 - Avveckling (C1)
 - Transport (C2)
 - Avfallshantering för återanvändning och återvinning (C3)
 - Bortskaffande (C4)
- Modul D: Bidrag till andra produkter och projekt
 - Återvunna och återanvända resurser till andra byggprojekt.

4.3 LCC metodik

4.3.1 Nuvärdemetoden

LCC kan beräknas med olika metoder. I denna studie har nuvärdemetoden använts, eftersom den rekommenderas av prEN 17472 (2020) och Trafikverket (2020). Nuvärdemetoden, även kallad kapitalvärdemetoden, går ut på att man jämför alla inkomster och utgifter vid nolltidpunkten, som motsvarar investeringstillfället. Alla framtida årliga överskott räknas om till nuvärde (Net Present Value) genom diskontering, se Ekvation 1.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Där:

- NPV- summa av alla kostnader och tillgångar relaterad till gjorda investering inklusive investeringskostnad
- R_t – kostnad av investeringar i dagens värde
- r – diskonteringsränta
- t – tidperiod för beräkning

LCC enligt nuvärdemetoden räknas ut som en summa av investeringskostnader vid tidpunkt $t=0$ och nuvärdeskostnader för framtida reparationer, se Ekvation 2.

$$LCC_{NPV} = \sum C_x + \sum R_x \quad (2)$$

Där:

- C_x – investering för byggande av byggdel x vid tidpunkt $t=0$,
- R_x – nuvärdeskostnad av framtida reparationer för byggdel x från tid $t=0$ till $t=n$, se formeln ovan.

4.3.2 Kostnadseffektivitet av åtgärder för minskad klimatpåverkan

I denna studie demonstreras en övergripande princip för valet av alternativa byggprodukter för att uppnå önskvärd reduktion av CO_2 -e utsläpp på ett för samhället kostnadseffektivt sätt. Klimatneutralitet för infrastrukturbyggandet innebär att det behövs tekniska lösningar eller åtgärder för bergförstärkning som har negativ kostnad, vilket alltså är liktydigt med att alternativet ger en ren nettovinst för samhället per minskat kg CO_2 -e utsläpp. Här handlar det alltså om åtgärder som är samhällsekonomiskt lönsamma i sig och som dessutom bidrar till minskade CO_2 -e utsläpp. Beställare kan i detta fall prioritera denna typ av teknisk utförande och snabba på teknisk godkännande och i vissa fall tillämpa innovationsbonus för projekt som vågar att testa nya innovativa material och produkter som är klimatneutrala.

Draft på en ny standard, prEN 17472 rekommenderar att komplettera traditionella kostnadskategorier för en LCC med ”External costs and benefits”. En sådan extern kostnad eller tillgång kan räknas ut som ett skuggpris som avspeglar en samhällsekonomisk kostnad för genomförande av en viss klimatreducerande åtgärd och åtgärdens effektivitet att minska koldioxidutsläpp i ett anläggningsprojekt över hela kalkylperioden, dvs 120 år för en tunnel.

Det finns dock inga vedertagna beräkningsmetoder att uppskatta kalkylvärdet för koldioxid över tid. Klimatutsläppens skadepåverkan förväntas öka över tiden, inte bara på grund av ökade utsläpp utan även på grund av att skador av givna utsläpp ger allvarigare konsekvenser över tiden (Trafikverket

2020). Samhällsekonomisk kostnadseffektivitet (K) beräknas med följande kvot (Trafikverket 2020), se Ekvation 3:

$$K_{\text{Åtgärd } x} = \text{NPV}_x / \Delta x \text{ CO}_2\text{-e} \quad (3)$$

Där:

- $K_{\text{Åtgärd } x}$ – samhällsekonomisk kostnadseffektivitet för genomförande av en klimatreducerande åtgärd x , kr/kg $\text{CO}_2\text{-e}$
- NPV_x – summa nettonuvärde av alla effekter efter genomförande av åtgärd x , exklusive effekterna på koldioxidutsläpp, värderat i kr
- $\Delta x \text{ CO}_2\text{-e}$ – effekt på minskning av koldioxidutsläpp efter genomförande av åtgärd x , kg $\text{CO}_2\text{-ekvivalenter}$.

5. RESULTAT

5.1 Underlag från dimensionering

Utförda geologiska undersökningen och uppskattning av bergkvalitet visade att bergkvalitén i Gullberget är generellt mycket bra till bra enligt bergkvalitetsindelning (RMR_{BAS}), se Tabell 1. Med hjälp av Q-metoden dimensionerades två bergförstärkningsklasser, klass I och II, där klass II föreskrivs för huvudtunneln och klass I för portalerna (PM 2018). Trots att berget huvudsakligen består av mycket kompetent gnejs, finns det dock en risk att några svagare områden kan påträffas vid tunneldrivning, vilket kan kräva en högre bergförstärkningsklass än I och II. För sådana ospecificerade tunnelsektioner inkluderades en ytterligare klass III enligt projektets dokumentation, se Tabell 1. Typförstärkning klass I används där $\text{RMR}_{\text{BAS}} > 80$ och typförstärkning klass II används där RMR_{BAS} är 61-80 och typförstärkning klass III där RMR_{BAS} är 41-60.

Tabell 1: Bergkvalitetsindelning enligt RMR-systemet med tillhörande Q-värde och typförstärkningsklasser (PM 2018).

Tunnelsektion	Bergkvalitetsindelning (RMR_{BAS})	Bergkvalitet, Q-värde	Typförstärkningsklass
Östra och Västra tunnelportaler	81-100	A	Klass I
Huvudtunnel	61-80	A	Klass II
Ospecificerade tunnelsektioner	41-60	A	Klass III

5.2 Val av alternativa material

Dimensioneringsunderlaget är baserat på standardiserade typförstärkningsklasser som föreskriver användande av traditionell stålfiberarmerad sprutbetong och stålbergbultar för samtliga bergförstärkningsklasser enligt Q-metoden. En nyligen utgiven rapport om utvärdering av glasfiberbult som permanent bergförstärkning (Johansson et al 2020) har visat att bergbultar av glasfiberarmerade polymerer, GFRP kan vara lämpliga för permanent bergförstärkning i

berg tunnlar. Det finns dock fortfarande frågetecken att klargöra innan GFRP kan bli godkända för svenska tunnlar, till exempel att bultarna håller 120 år som det påstås av tillverkarna. En typisk GFRP-bult väger ca 0,9 kg per meter, vilket är ungefär 30% av vikten för en stål bult. Med andra ord innebär det en avsevärd minskning av miljöpåverkan om GFRP-bultar används istället för traditionella stål bultar, och en förbättring av arbetsmiljön, eftersom det blir lättare att lyfta GFRP-bultar vid monteringen.

Det pågår flera forskningsprojekt om att hitta en ersättning för traditionella stålfiber i sprutbetong med syfte att minska klimatpåverkan och lösa utmaning med korrosion av stålfiber vilket leder till omfattande reparationsbehov i berg tunnlar. I litteraturkällor nämns två alternativa fibrer, basaltfiberarmerade polymerer, BFRP (Sanbakk 2019, Mohammadi Mohaghegh et al 2017 och Rengarajan 2020) och makrosyntetiska fiber (Saade 2018, Crehan 2018 och Rengarajan 2020) som möjliga alternativ.

I denna studie har tunnelns dimensioneringsunderlag för standardiserade klasser för bergförstärkning med traditionella material (armerad sprutbetong med stålfiber och stål bergbultar) använts för dimensionering av mängder av alternativa material (armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber och GFRP bergbultar). Antaganden för mängder av GFRP bultar är baserat på litteraturkällor (Johansson et al 2020, Technical Data Sheet for GFRP 2020, Thomas 2019). Antaganden för mängder av makrosyntetiska fiber är baserade på litteraturstudier (Saade 2018 och Crehan 2018) och pågående forskningssatsning på KTH Betongbyggnad (Rengarajan 2020).

Fem scenarier med olika kombinationer av både traditionella och innovativa material har tagit fram i denna studie, se Tabell 2. Enligt projektdokumentationen (PM 2018) övervägs två scenarier i nuvarande tunneldesign. Scenario 0 som inkluderar endast två klasser för bergförstärkning, klass I (två portaler) och klass II (huvudtunnel). Scenario 1 som inkluderar klass I (två portaler), klass II (huvudtunnel) och klass III (ospecificerade tunnelsektioner vid sämre bergkvalitet). Både scenario 0 och 1 är baserade på projektets materialmängdförteckning, där anges sprutbetongblandning (med stålfibrer) och antalet av stål bergbultar. Scenarierna 2, 3 och 4 är tre nya förbättrade scenarier som tagits fram i denna studie och är baserade på senaste forskningen inom innovativa material för bergförstärkning.

Tabell 2: Fem scenarier för LCA och LCC i denna studie.

Nuvarande design		Förbättrad design		
Scenarios 0	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Klass I och II	Klass I, II och III	Klass I, II och III	Klass I, II och III	Klass I, II och III
Armerad sprutbetong med stålfiber och stål bergbultar	Armerad sprutbetong med stålfiber och stål bergbultar	Armerad sprutbetong med stålfiber och GFRP bergbultar	Armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber och stål bergbultar	Armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber och GFRP bergbultar

5.3 Definition av funktionell ekvivalent och systemgränser för studien

5.3.1 Funktionell ekvivalent för LCA och LCC

Enligt den nuvarande PCR för broar, motorvägar och tunnlar (PCR 2019) är det den funktionella enhet på 1 km tunnel och år som ska användas för LCA:er för tunnlar. Denna funktionella enhet kanske inte är lämplig för en LCA för bergförstärkningsarbete, som ofta dimensioneras per 1 meter av bergtunneln. Anledningen till det är att bergkvalitet kan variera kraftigt vilket innebär att varje meter av tunnel dimensioneras utifrån platsspecifika geotekniska förutsättningar. I denna studie har därför 1 meter bergförstärkningsarbete i en bergtunnel under 120 år använts som en jämförelseenhet i utförda LCA och LCC. Detta gör det möjligt att jämföra miljöpåverkan och relaterade kostnader från olika bergförstärkningsklasser i samma tunnel per 1 meter för en given geologisk miljö och en livslängd på 120 år. Resultaten av LCA och LCC presenteras enligt en funktionell ekvivalent som är ”1 meter av bergförstärkning under 120 år.”

Dimensioneringsparametrarna för tre bergförstärkningsklasser som visas i Tabell 3 formar en funktionell ekvivalent för jämförelse av resultat från LCA och LCC. Effekter av flera åtgärder studerades i LCA och LCC analyser. Åtgärderna inkluderade följande variationer i designparametrar för bergförstärkning:

1. Tjocklek av armerad sprutbetong samt mängd och typer av armeringsfiber (stål- och makrosyntetiska fibrer)
2. Mängd och typ av bergbultar (stål- och GFRP-bultar)
3. Behov i reparation under tunnelns livslängd på 120 år.

Tabell 3: Dimensionering av bergförstärkningsklasser enligt Q-metoden för samtliga scenarier.

Bergförstärkningsklass	Tjocklek av armerad sprutbetong (mm)		Bult (m)		
	Tak	Vägg	Selektiv/ Systematisk	Längd (m)/ diameter (mm)	Avstånd mellan bultar (m)
I	50	-	Tak, vägg (selektiv)	3/20	2.5
II	50	50	Tak, vägg (systematisk)	3/20	2.2
III	75	50	Tak (systematisk) Vägg (systematisk)	3/20 3/20	2.0 2.3

5.3.2 Systemgränser för LCA och LCC

I denna studie valdes att begränsa omfattningen på livscykeln och både LCA och LCC analyser omfattar modul A1 (utvinning av råmaterial), A2 (transport av råmaterial till fabriker), A3 (tillverkning av byggmaterial), A4 (transport av byggmaterial till byggarbetsplats) och A5 (byggande av bergförstärkning) och B3 (reparationer av bergförstärkning under 120 år).

5.4 Genomförande av LCA

5.4.1 Datainsamling för LCA

Materialvolymerna i projektets materialmängdförteckning (MMF 2018) är angivna för byggande av hela tunneln. Detta är dock en för storskalig upplösning och kan inte användas för utförande av LCA per 1 meter av samtliga bergförstärkningsklasser. Utifrån syfte med denna studie har materialmängder per varje klass beräknats utifrån tunnelns dimensioner angivna i underlaget för projektering (PM 2018). Tunneln ska vara cirka 14,3 m bred och 10,3 m hög (PM 2018). Den totala omkretsen av den förstärkta tunnelns yta (både tak- och väggyta) med sprutbetong och bergbultar antas vara cirka 31,1 m. Detta antagande, tillsammans med dimensioneringsunderlaget av bergförstärkningsklasser enligt Q-metoden (se Tabell 3), användes för att beräkna mängd av material och energi som krävs för byggande och underhåll av 1 meter av varje förstärkningsklass i samtliga scenarier, se Tabell 4.

Tabell 4: Material- och energiflöden per 1 meter av varje bergförstärkningsklass i samtliga scenarier.

Material- och energiflöden	Enhet	Bergförstärkningsklasser		
		Klass I	Klass II	Klass III
Armerad sprutbetong	m ³	1.0	1.6	2.1
Stålbultar	styck	5	6.4	7.2
GFRP-bultar	styck	5	6.4	7.2
Cementblandning för bultar	m ³	0.007	0.009	0.01
Energi för blandning och applicering av sprutbetong	kWh	5.1	8.2	10.7
Energi för injektering av cementblandning för bultar	kWh	0.02	0.03	0.03

Följande antagande användes i LCA studien:

- Miljödata för miljöpåverkan från olika processer och material har hämtats från GaBi databas (GaBi 9.0 2020).
- Miljödata för energianvändning för blandning och applicering av sprutbetong är baserad på en projektspecifik energiblandning som köpts av entreprenören, NCC för detta tunnelprojekt från Vattenfall AB (EPD från Vattenfall 2018; EPD från Vattenfall 2019).
- Alla transportsträckor från tillverkningsfabriker till byggarbetsplats (A4) har uppskattats utifrån antagandet att projektet kommer att köpa material från fabriker så nära byggarbetsplatsen som möjligt.
- Sprutbetong blandas på plats (A5) med speciell sprututrustning vilken är monterad på en lastbil som också driver blandaren. För applicering av sprutbetong används en sprutrobot. Energin som behövs för blandning och applicering av armerad sprutbetong (både med stål och makrosyntetiska fibrer) var 5,1 kWh/m³ (Sika 2011) och för injektering av cementblandning för förankring av bergbultar (både för stål- och GFRP-bultar) var 3,1 kWh/m³ (Sika 2011).
- Reparationsfasen av bergförstärkningen (B3) består av två reparationer under tunneln livslängd på 120 år. Antagandet, att armerad sprutbetong med traditionella stålfibrer i scenarier 0, 1 och 2 behöver repareras två gånger, har gjorts (Crehan 2018). Mängden av material (sprutbetong och stålfibrer) som krävs för varje reparationscykel antas vara 25% av materialet som använts i byggfasen (Crehan 2018). Det antas också att sprutbetong

med makrosyntetiska fibrer i scenarier 3 och 4 inte behöver repareras under tunnelns livstid (Crehan 2018).

5.4.2 Beräkning av miljöpåverkan

LCA-modell för bergförstärkningsklasser för samtliga scenarier byggdes i LCA-programvara, Gabi enligt EN 15804 (2013). Anledning till att den version av standarden användes för presentation av LCA:s resultat är att Trafikverket använder samma version i Klimatkalkylverket för presentation av gränsvärden för CO₂-e utsläpp från byggmaterial. Användande av samma version av standarden tillåter att jämföra resultat från denna studie och från Klimatkalkylmodellen.

LCA-modellen i denna studie gör det möjligt att beräkna olika miljöpåverkanskategorier till exempel klimatpåverkan, försurning av land och vatten, övergödning, bildande av fotokemiska oxidanter, utarmning av fossil energi mm. Alla resultat presenteras i enlighet med funktionell ekvivalent av 1 meter varje bergförstärkningsklass under 120 år enligt EN 15643-5 (2017) och prEN 17472 (2020). Respektive bidrag från olika scenarier visas till en vald uppsättning av miljöpåverkanskategorier som är obligatoriska att redovisa enligt EN 15804 (2013).

5.4.2.1 Miljöpåverkan från byggfasen

I Tabellerna 5, 6, 7 och 8 visas respektive bidrag i miljöpåverkanskategorier från samtliga scenarier för byggskede. Klimatpåverkan för traditionellt utförande (med stålfiberarmerad sprutbetong och stålbergbultar) för byggskede (A1-A5) för tre klasser varierar från 545 kg CO₂-e till 943 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år. I allmänhet har bergförstärkning av klass III den största miljöpåverkan i alla miljöpåverkanskategorier (klimatpåverkan, försurning av land och vatten, övergödning, bildande av fotokemiska oxidanter och utarmning av fossila resurser), främst på grund av ett högre innehåll av cement för sprutbetong än i förstärkningsklasser I och II. Skillnad i klimatpåverkan mellan de tre förstärkningsklasserna är 35% mellan klass I och klass II, 42% mellan klass I och klass III och 11% mellan klass II och klass III. Resultatet visar att klimatpåverkan är starkt beroende av typ och mängd av byggmaterial, vilka i sin tur dimensioneras i direkt relation till olika bergförstärkningsklasser.

Tabell 5: Miljöpåverkan från bergförstärkning med traditionella material som stålfiberarmerad sprutbetong och stålbulvar (Scenarier 0/1).

Miljöpåverkanskategorier	Indikatorer	A1-A3			A4			A5			Totalt för byggfasen (A1-A5)			
		Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Medelvärde
Klimatpåverkan (GWP)	kg CO ₂ eq.	537	827	930	7,35	11,7	13,2	0,122	0,196	0,22	545	839	943	776
Nedbrytning av ozonskiktet (ODP)	kg R11 eq.	5,8E-9	9,4E-9	1,1E-8	3E-15	4,9E-15	5,5E-15	2,9E-9	4,8E-9	5,4E-9	8,7E-9	1,4E-8	1,6E-8	1,3E-8
Försurning av land och vatten (AP)	kg SO ₂ eq.	0,843	1,28	1,44	0,0311	0,0496	0,0559	0,0003	0,0005	0,0006	0,8744	1,3301	1,4965	1,23
Övergödning (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq.	0,119	0,184	0,207	0,0054	0,0086	0,0097	0,0001	0,0002	0,0002	0,1245	0,1928	0,2169	0,178
Bildande av fotokemiska oxidanter (POCP)	kg C ₂ H ₂ eq.	0,109	0,164	0,184	0	0	0	0,0001	0,0002	0,0003	0,1091	0,1642	0,1843	0,152
Utarmning av icke fossila resurser (ADPE)	kg Sb eq.	0,0006	0,0007	0,0008	6,0E-7	9,0E-7	1,0E-6	2,1E-7	3,4E-7	3,8E-7	6,0E-4	7,0E-4	8,0E-4	7,0E-4
Utarmning av fossila resurser (ADPF)	MJ	3 630	5 490	6 180	97,9	156	176	1,03	1,65	1,85	3 729	5 648	6 358	5 245

Tabell 6: Miljöpåverkan från bergförstärkning med traditionell stålfiberarmerad sprutbetong och innovativa GFRP-bulvar (Scenario 2).

Miljöpåverkanskategorier	Indikatorer	A1-A3			A4			A5			Totalt för byggfasen (A1-A5)			
		Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Medelvärde
Klimatpåverkan (GWP)	kg CO ₂ eq.	514	798	898	7,48	11,9	13,4	0,122	0,196	0,22	522	810	912	748
Nedbrytning av ozonskiktet (ODP)	kg R11 eq.	5,8E-9	9,3E-9	1,1E-08	2,3E-15	3,6E-15	4,1E-15	2,9E-9	4,8E-9	5,4E-9	8,8E-9	1,4E-8	1,6E-8	1,2E-8
Försurning av land och vatten (AP)	kg SO ₂ eq.	0,704	1,1	1,24	0,038	0,06	0,06	0,0003	0,0005	0,0006	0,7423	1,1605	1,3006	1,07
Övergödning (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq.	0,115	0,178	0,2	0,006	0,009	0,01	0,0001	0,0002	0,0002	0,1211	0,1872	0,2102	0,173
Bildande av fotokemiska oxidanter (POCP)	kg C ₂ H ₂ eq.	0,0878	0,136	0,153	0	0	0	0,0002	0,0002	0,0003	0,0879	0,1362	0,1532	0,126
Utarmning av icke fossila resurser (ADPE)	kg Sb eq.	3,5E-5	5,2E-5	5,8E-5	5,7E-7	9,1E-7	1,0E-6	2,1E-7	3,4E-7	3,8E-7	4,0E-5	5,0E-5	6,0E-5	5,0E-5
Utarmning av fossila resurser (ADPF)	MJ	4 190	6 210	6 980	99,5	158	178	1,03	1,65	1,85	4 291	6 369	7 159	5 940

Tabell 7: Miljöpåverkan från bergförstärkning med traditionella stålbulvar och innovativa makrosyntetiska fibrer i sprutbetong (Scenario 3).

Miljöpåverkanskategorier	Indikatorer	A1-A3			A4			A5			Totalt för byggfasen (A1-A5)			
		Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Medelvärde
Klimatpåverkan (GWP)	kg CO ₂ eq.	527	812	913	7,33	11,7	13,1	0,122	0,196	0,22	535	824	926	762
Nedbrytning av ozonskiktet (ODP)	kg R11 eq.	5,8E-9	9,4E-9	1,1E-8	2,3E-15	3,3E-15	3,7E-15	2,9E-9	4,8E-9	5,4E-9	8,8E-9	1,4E-8	1,6E-8	1,3E-8
Förurning av land och vatten (AP)	kg SO ₂ eq.	0,826	1,25	1,41	0,034	0,05	0,06	0,0003	0,0005	0,0006	0,8603	1,3005	1,4706	1,21
Övergödning (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq.	0,116	0,179	0,2	0,006	0,009	0,01	0,0001	0,0002	0,0002	0,1221	0,1882	0,2102	0,17
Bildande av fotokemiska oxidanter (POCP)	kg C ₂ H ₂ eq.	0,105	0,157	0,176	0	0	0	0,0002	0,0002	0,0002	0,1052	0,1572	0,1762	0,15
Utarmning av icke fossila resurser (ADPE)	kg Sb eq.	6,0E-4	7,0E-4	8,0E-4	5,7E-7	8,9E-7	1,0E-6	2,1E-7	3,4E-7	3,8E-7	0,0006	0,0007	0,0008	0,0007
Utarmning av fossila resurser (ADPF)	MJ	3 830	5 810	6 530	97,6	156	175	1,03	1,65	1,85	3 929	5 968	6 707	5 534

Tabell 8: Miljöpåverkan från bergförstärkning med innovativa makrosyntetiska fibrer i sprutbetong och innovativa GFRP-bulvar (Scenarier 4).

Miljöpåverkanskategorier	Indikatorer	A1-A3			A4			A5			Totalt för byggfasen (A1-A5)			
		Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Klass I	Klass II	Klass III	Medelvärde
Klimatpåverkan (GWP)	kg CO ₂ eq.	505	783	881	7,45	11,8	13,3	0,122	0,196	0,22	513	795	895	734
Nedbrytning av ozonskiktet (ODP)	kg R11 eq.	5,8E-9	9,4E-9	1,0E-8	1,3E-15	2,0E-15	2,3E-15	2,9E-9	4,8E-9	5,4E-9	8,8E-9	1,4E-8	1,5E-8	1,3E-8
Förurning av land och vatten (AP)	kg SO ₂ eq.	0,687	1,07	1,21	0,04	0,06	0,07	0,0003	0,0005	0,0006	0,7273	1,1305	1,2806	1,05
Övergödning (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq.	0,112	0,173	0,195	0,006	0,0009	0,01	0,0001	0,0002	0,0002	0,1181	0,1741	0,2052	0,17
Bildande av fotokemiska oxidanter (POCP)	kg C ₂ H ₂ eq.	0,083	0,129	0,145	0	0	0	0,0002	0,0002	0,0003	0,0832	0,1292	0,1453	0,12
Utarmning av icke fossila resurser (ADPE)	kg Sb eq.	2,9E-5	4,3E-5	4,8E-5	5,4E-7	8,6E-7	9,7E-7	2,1E-7	3,4E-7	3,8E-7	3,0E-5	4,0E-5	5,0E-5	4,0E-5
Utarmning av fossila resurser (ADPF)	MJ	4 390	6 530	7 330	99,2	158	177	1,03	1,65	1,85	4 490	6 689	7 509	6 229

5.4.2.2 Miljöpåverkan från bygg- och reparationsfasen

Den totala klimatpåverkan för traditionellt utförande (med stålfiberarmerad sprutbetong och stålbergbultar) från de tre mest förekommande bergförstärkningsklasser för bygg- och reparationsfaser (A1-A5, B3) varierar från 767 kg CO₂-e till 1 343 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år, se Tabell 9.

Tabell 9 Den totala klimatpåverkan för byggfasen (A1-A5) och reparationsfasen (B3) per 1 meter av bergförstärkning under 120 år.

Bergförs tärkning sklasser	Enhet	Nuvarande design						Förbättrad design					
		Scenario 0/1 med armerad sprutbetong med stålfiber och stål bergbultar			Scenario 2 med armerad sprutbetong med stålfiber och GFRP bergbultar			Scenario 3 med armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber och stål bergbultar			Scenario 4 med armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber och GFRP bergbultar		
		A1- A5	B3	Totalt	A1- A5	B3	Totalt	A1- A5	B3	Totalt	A1- A5	B3	Totalt
Class I	kg CO ₂ -e	545	222	767	522	222	744	535	0	535	513	0	513
Class II	kg CO ₂ -e	839	356	1 195	810	356	1 166	824	0	824	795	0	795
Class III	kg CO ₂ -e	943	400	1 343	912	400	1 312	926	0	926	895	0	895
Medelvärde	kg CO ₂ -e	776	326	1 102	748	326	1 074	762	0	762	734	0	734

5.4.2.3 Jämförelse med andra studier

Resultatet i denna studie visar att en genomsnittlig klimatpåverkan från byggande av bergförstärkning (A1-A5) för scenarier med traditionellt byggmaterial (stålfibrer för sprutbetong och stålbergbultar) ligger på 776 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år. Huang et al (2020) har uppskattat att klimatpåverkan från en traditionell bergförstärkning i norska tunnlar (med stålfiberarmerad sprutbetong och stålbergbultar) ligger på 1 150 kg CO₂-e per 1 meter under 100 år.

Standardvärde för klimatpåverkan från byggande av 1 km av bergtunnel med dubbel spår ligger på ca 6 390 849 kg CO₂-e enligt Klimatkalkylmodell 7.0. Huang et al (2015) har uppskattat att bergförstärkningsarbete står för cirka 19% av den totala koldioxidutsläppen från samtliga arbeten vid byggande av en bergtunnel. Med uppskattning enligt Huang et al (2015), av andelen av klimatgasutsläpp från bergförstärkningsarbetet och för hela byggfasen, kan standardvärde för klimatpåverkan från bergförstärkning enligt Trafikverkets Klimatkalkylmodell extrapoleras till cirka 1 278 170 kg CO₂-e per 1 km tunnel under 120 år (Trafikverket 2021) eller cirka 1 278 kg CO₂-e per 1 meter tunnel under 120 år. Resultatet i denna studie är lägre än värdena för klimatpåverkan för norska tunnlar hos Huang et al (2020) och nuvarande standardvärde för klimatutsläpp för svenska tunnlar hos Trafikverket (2021). Detta kan eventuellt förklaras av att bara en kort tunnel blev analyserad i studien.

Beräkning och redovisning av klimatpåverkan i anläggningsprojekt utförs i Trafikverkets Klimatkalkylmodell som har ett standardvärde för klimatgasutsläpp för bergförstärkningsarbete oberoende av olika förstärkningsklasser. Resultatet i denna studie har jämförts med nuvarande standardvärde för bergförstärkning i Klimatkalkylmodell, se Tabell 10. Jämförelsen av resultatet i denna studie med Klimatkalkylmodell är väldigt osäker på grund av flera antaganden som användes för extrapolering av klimatpåverkan från bergförstärkningsarbete i Klimatkalkylmodell.

Tabell 10 Jämförelse av beräkningsresultat för klimatpåverkan från bergförstärkning mellan denna studie och Trafikverkets Klimatkalkylmodell (version 7.0).

Klasser	Längd, m	Resultat med metodik utvecklad i denna studie				Resultat med Klimatkalkylmodell 7.0	
		Traditionell design (scenario 0/1)		Dynamiskt optimerad design (scenario 4)		Traditionell design	
		Per meter	Per tunnel, 98m	Per meter	Per tunnel, 98m	Per meter	Per tunnel, 98m
Byggande (A1-A5)							
Klass I	7	545	80 788	513	76 536	1 278	125 244
Klass II	85	839		795		1 278	
Klass III	6	943		895		1 278	
Byggande (A1-A5) och reparation (B3)							
Klass I	7	767	115 002	513	76 536	-	-
Klass II	85	1 195		795		-	
Klass III	6	1 343		895		-	

5.5 Genomförande av LCC

5.5.1 Datainsamling för LCC

LCC analys har i denna studie begränsats till att inkludera kostnader för byggande och reparation av bergförstärkningsklasser för samtliga scenarier. För att följa ytterligare rekommendationer av EN 15643-5 och prEN 17472, användes samma systemgränser som vid utförande av LCC, dvs A1-A5 och B3. Samma material- och energiposter, som användes för LCA, uppskattades med LCC analys. Kostnadsuppgifter (exklusive moms) har hämtats från en pågående entreprenad för byggande av en bergtunnel och är baserade på data från materialleverantörerna samt avser projektets byggnadsperiod från år 2018 till år 2026, se Tabell 11. Kostnad för GFRP-bultar kommer från tillverkaren.

Tabell 11: Datainsamling av materialkostnader för LCC.

Kostnadsposter	Enhet	Investeringskostnad per enhet, kr
Armerad sprutbetong med stålfiber	m ³	2500
Armerad sprutbetong med makrosyntetiska fiber	m ³	1750
Cementblandning för bergbultar	m ³	1500
Stålbultar	styck	250
GFRP-bultar	styck	250
Energi	kWh	0,56

5.5.2 Beräkning av LCC

För utförande av LCC har en Excel beräkningsmodell tagits fram i denna studie. LCC följer rekommendationer av Trafikverkets Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn, ASEK 7.0 (Trafikverket 2020), där diskonteringsränta på 3,5% rekommenderas, se Tabell 12. Tidsperioden för beräkningen är tunnelns livslängd på 120 år. Det har antagits att armerad sprutbetong med traditionella stålfibrer i scenarier 0, 1 och 2, behöver repareras två gånger (Crehan 2018). För de scenarierna inträffar reparationer av förstärkningen med sprutbetong efter 40 år och 80 år. Mängden av material (sprutbetong och stålfibrer) som krävs för varje reparationscykel antas vara 25% av materialet som används under byggfasen (Crehan 2018). Det antogs också att sprutbetongen förstärkt med makrosyntetiska fibrer i scenarier 3 och 4 inte behöver repareras under tunnelns livstid (Crehan 2018). Ingen reparation görs för bergbultar eftersom det antas att deras livslängd är 120 år.

Tabell 12: Nuvärdeskostnader för samtliga scenarier per 1 meter av bergförstärkning.

	Enhet	Scenario 0/1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Investeringskostnad, ΣC_x	kr	5 484	5 484	4 309	4 309
Reparationskostnad	kr	984	984	0	0
Nuvärde av reparationskostnad, ΣR_x	kr	311	311	0	0
Total nuvärdeskostnad, NPV_x	kr	5 795	5 795	4 309	4 309

5.5.3 Beräkning av kostnadseffektivitet

I denna studie användes en metod som rekommenderas av ASEK 7.0 (Trafikverket 2020) för att analysera kostnadseffektivitet (K) av olika åtgärder/scenarier med syfte att minska klimatpåverkan. Samhällsekonomiska marginalkostnaden eller kostnadseffektivitet för samtliga scenarier i denna studie räknades enligt Ekvation 4, 5 och 6.

$$K_{\text{Scenario 2}} = \frac{5\,795 \text{ kr}}{1\,102 \text{ kg CO}_2e - 1\,074 \text{ kg CO}_2e} = 207 \text{ kr per kg CO}_2e \quad (4)$$

$$K_{\text{Scenario 3}} = \frac{4\,309 \text{ kr}}{1\,102 \text{ kg CO}_2e - 762 \text{ kg CO}_2e} = 13 \text{ kr per kg CO}_2e \quad (5)$$

$$K_{\text{Scenario 4}} = \frac{4\,309 \text{ kr}}{1\,102 \text{ kg CO}_2e - 734 \text{ kg CO}_2e} = 12 \text{ kr per kg CO}_2e \quad (6)$$

Det mest kostnadseffektiva scenariot för reduktion av klimatpåverkan från bergförstärkning är scenario 4, se Tabell 13. Scenariot inkluderar två åtgärder, användning av sprutbetong armerad med makrosyntetiska fibrer samt bergbultar av GFRP, dessa är dock inte godkända av Trafikverket för användning för svenska bergförstärkningsarbete ännu. Olika scenarier med olika kombinationer av byggmaterial/produkter rangordnades utifrån deras klimateffektivitet, från värde på 12 kr/kg CO₂-e för scenarion 4 till 207 kr/kg CO₂-e för scenarion 2. Scenarier med lägsta värde för kostnadseffektivitet ska väljas i första hand. Vid optimalt val så följer man denna rangordning tills man kommer till den totala reduktionsvolym som är önskvärd för ett anläggningsprojekt.

Tabell 13: Rangordning av samtliga scenarier utifrån en sammansatt hållbarhetsprestanda för bergförstärkning per 1 meter av tunneln.

Hållbarhetsaspekt	Indikator	Enhet	Scenario 0/1 (basscenario)	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
LCA/Klimatpåverkan	GWP	kg CO ₂ -e	1 102	1 074	762	734
Reduceringspotential	Δx CO ₂ -e	kg CO ₂ -e	-	28	340	368
LCC/Nuvärdeskostnad	NPV _x	kr	5795	5795	4309	4309
Kostnadseffektivitet	K	kr/kg CO ₂ -e	-	207	13	12

6. SLUTSATSER

Projektet demonstrerade med exempel på bergförstärkning i tunnlar att för att nå det högt uppsatta målet med klimatneutral infrastruktur till år 2045 måste branschen anta utmaningen att snabba på processen med att få tekniska godkännanden av innovativa klimatneutrala material och produkter. Investeringskostnader för inköp och användande av nya oprövade produkter i anläggningsprojekt är ofta högre än för traditionella produkter. Av den anledningen demonstreras, i LCC-delen av studien, en övergripande princip för valet av alternativa material/produkter för att uppnå önskvärd reduktion av CO₂-e utsläpp på ett för samhället kostnadseffektivt sätt. Den utvecklade principen kan användas i innovationsupphandlingar för att få med nya innovativa byggmaterial, produkter, tekniska lösningar mm. Upphandlingskrav och nya affärsmodeller kan vara katalysatorer för att införa ny teknik och effektivare processer. Det är här viktigt att investeringskostnader ställs i relation till den långsiktiga samhällsnyttan; det är inte alltid säkert att den bästa lösningen innebär en sänkt investeringskostnad.

Resultaten visar vikten av att inkludera drift- och underhållskedet i klimatberäkningar samt utformning av optimeringsåtgärder. Framtida reparationer har en stor påverkan på LCA:s och LCC:s resultat, och scenarierna med mindre underhåll kommer att ha den lägsta totala klimatpåverkan och samhällsekonomiska kostnaden. Utveckling och godkännande av nya innovativa material borde göras baserat på dess potential att minska den totala klimatpåverkan och inkludera alla livscykelstege; byggande, drift och underhåll och återvinning/återanvändning vid rivning.

En viktig förutsättning för detta är att de krav som ställs måste vara verifierbara och kan regleras i kontrakt mellan beställare och utförare. Denna studie visar att för att kunna använda LCA- och LCC- metoder på ett verifierbart sätt i anläggningsprojekt måste de metoderna integreras med nuvarande praxis för teknisk dimensionering och projektering. Projektets resultat visar att implementering av de senaste standarderna för hållbarhetsbedömning av anläggningskonstruktioner (EN 15643-5 och prEN 17472) behöver brytas ner i flera steg. För det första behöver tas fram nationella vägledningar för utförande av LCA och LCC för de vanligaste typerna av byggnadsverk som broar, vägar mm. För det andra visar det sig att standardernas rekommendation att identifiera en jämförelseenhet eller en funktionell ekvivalent utifrån tekniska och funktionella projekteringsnormer kommer att resultera att separata jämförelseenheter för ingående byggdelar i en anläggningskonstruktion behöver definieras, eftersom teknisk dimensionering och projektering ofta görs för separata byggdelar i en komplex anläggningskonstruktion, som t. ex. en bergtunnel. Varje tunnelbyggdel till exempel bergförstärkning, injektering, tunneldrivning mm, dimensioneras utifrån särskilda metoder som ofta föreskriver användande av traditionella byggmaterial. Med syfte att minska klimatpåverkan

genom att byta ut materialen mot mer klimatneutrala, behöver dessa dimensioneringsmetoder anpassas för att kunna kalkylera med nya innovativa material.

Studien identifierade att det saknas miljödata för nya alternativa material i form av EPD:er eller miljödatabaser i kommersiella LCA verktyg. Det är en hög kostnad för en leverantör att skapa en EPD och det är en riskabel investering innan det nya materialet godkänns av beställare. Beställarna och byggbranschen borde satsa på att utveckla nya affärsmässiga modeller för testning och godkännande av innovativa material i anläggningsprojekt som ett komplement till Bygg- och anläggningssektorns färdplan för fossilfri konkurrenskraft (2018).

LCA- resultat från denna studie kan användas för att uppdatera PCR för tunnlar (2019) och justera ingående standardvärden för bergförstärkning i Trafikverkets Klimatkalkylmodell. Det finns ett akut behov att förbättra de standardiserade värdena samt detaljeringsgraden för uppdelning i olika byggdelar utifrån faktisk klimatpåverkan, som ofta är kopplad till hur vissa byggdelar dimensioneras. Detta skulle, i ett tidigt skede, kunna förbättra det klimatrelaterade arbetet anläggningsprojekt och dessutom säkerställa att Trafikverkets strategier för klimatreducerande åtgärder för anläggningsinfrastruktur är baserade på mätbara verifierade utsläppsvärdena. Allt med syfte att uppnå en 100 % minskning av utsläppen av koldioxidekvivalenter fram till år 2045. Sådana faktiska utsläppsvärdena för klimatpåverkan från de mest förekommande svenska bergförstärkningsklasser, har tagits fram i denna studie.

Forskningen som utfördes i projektet är ett första steg mot en implementering av de senaste standarderna för hållbarhetsbedömning av anläggningskonstruktioner (EN 15643-5 och prEN 17472). Projektet ger en ökad förståelse för vilka utmaningar som finns med vidareutveckling av byggstandarder, teoretiska beräkningsmetoder, upphandlingsmodeller samt styrning mot de politiska målen för reduktion av klimatpåverkan. Metodiken som utvecklades i projektet kommer att kunna tillämpas på andra typer av anläggningskonstruktioner både av betong och andra material. Resultaten kan också användas som en vägledning för entreprenörer och konsulter vid planering av åtgärder för reduktion av klimatpåverkan från bergtunnlar samt för svenska beställare vid utformning av upphandlingskrav och beräkningsmodeller för reduktion av klimatpåverkan.

7. NÄSTA STEG

LCA och LCC för bergförstärkningsarbete i denna studie bör ses som ett första steg mot tillämpningen av en fullständig hållbarhetsbedömning för samtliga byggdelar i en bergtunnel enligt nya standarder. Metodiken kan senare tillämpas på andra typer av anläggningskonstruktioner som vägar, broar mm.

Pågående forskningsprojekt i etapp B, *Anpassning av vägdimensionering för LCA och LCC* och ett doktorandprojekt i etapp C, *Effektiv reparation av betongvägar*, kommer att använda den utvecklade metodiken för LCA och LCC för en fältstudie på ett vägprojekt.

8. LITTERATURFÖRTECKNING

Barton NR., Lien R, Lunde J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support: Rock Mechanics, v. 6.

Bieniawski ZT (1989) Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering: New York, Wiley.

MMF (2018) Materialmängdförteckning för Centralen projekt.

Crehan D, Eide S, Vliestra D (2018) Sustainability and the responsible disposal of contaminated waste, Proceedings of 8th International symposium on Sprayed concrete, 11-14 June, Trondheim, Norway.

EN 15643-5 (2017) Sustainability of construction works – Sustainability assessment of buildings and civil engineering works – Part 5: Framework on specific principles and requirement for civil engineering works.

EN 15804 (2013) Sustainability of construction works -Environmental Product Declarations - Core rules for the product category of construction products.

prEN 17472 (2020) Sustainability of construction works – Sustainability assessment civil engineering works - Calculation methods.

EPD for railway tunnels on the Bothnia Line (2016), Environdec, Publication number: 2016:047, Trafikverket.

EPD Electricity from Vattenfall AB's hydropower plants (2018) Environmental Product Declaration Electricity from Vattenfall AB's Nordic wind power plants, Environdec, version from 2018.

EPD Electricity from Vattenfall AB's wind power plants (2019) Environmental Product Declaration Electricity from Vattenfall AB's Wind Farms, Environdec, version 2.0 2019.

Fremo Kalvå PO (2015) Life Cycle Assessment of the Byåsen tunnel in Trondheim, Norway, Assessing emissions from traffic and infrastructure, Master thesis in Industrial Ecology, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.

Färdplan för fossilfri konkurrenskraft (2018): Bygg- och anläggningssektorn, Statens offentliga utredningar, 2018, tillgängligt på: <http://fossilfritt-sverige.se/fardplaner-for-fossilfri-konkurrenskraft/fardplaner-for-fossilfri-konkurrenskraft-byggbranschen/>.

Gabi 9.0 (2020). <http://www.gabi-software.com>. Accessed August 2020.

Guo C, Xu J, Yang L, Guo X, Jixuan L, Liao J, Zheng X, Zhang Z, Chen X, Yang K, Wang M (2019) Life cycle evaluation of greenhouse gas emissions of a highway tunnel: A case study in China, Journal of Cleaner Production, 211, pp. 972-980.

Huang L, Bohne RA, Bruland A, Jakobsen JD, Lohne J (2015) Life cycle assessment of Norwegian road tunnel, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 20, Number 2, 20, pp. 174-184.

Huang L, Drevland Jakobsen P, Bohne RA, Liua Y, Bruland A, Manquehual CJ (2020) The environmental impact of rock support for road tunnels: The experience of Norway, *Science of the Total Environment*, 712, 136421.

ISO 14025 (2006) Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures.

ISO 14040 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.

ISO 14044 (2006) Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.

Johansson F, Roslin M, Josefsson J (2020) Utvärdering av glasfiberbult som permanent bergförstärkning, KTH Royal Institute of Technology report TRITA-ABE-RPT-201, Stockholm.

Lia AM (2012) Life Cycle Assessment of Technical Solutions for High-Speed Rail: Tunnel and Track designs, Master thesis in Industrial Ecology, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering.

Miliutenko S, Åkerman J, Björklund A (2012) Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle Stages of a Road Tunnel – the Swedish Case Norra Länken, *EJTIR*, Issue 12(1), pp. 39-62.

Mohammadi Mohaghegh A, Silfwerbrand J, Årskog V (2017) Flexural Behaviour of Medium-Strength and High-Performance Macro Basalt Fibre Concrete Aimed for Marine Applications. *Nordic Concrete Research*, Vol. 57, No. 2/2017, pp. 89-102.

PAS 2080 Carbon Management in Infrastructure Verification, British Standards Institute, 2020.

PM (2018) Promemoria för Västlänken, Bergförstärkning Gullberget – Bergtunnel och förskärningar.

PCR for bridges, elevated highways and tunnels (2019). Environdec, version 1.11 2019-02-26, valid until: 2022-01-29.

PCR Highways (except Elevated Highways), Streets and Roads (2013). Environdec, version 1.02: 2013:20. UN CPC 53211.

Rengarajan M (2020) Laboratory testing of shotcrete with fibres of steel, basalt or synthetic materials. Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, Department of Concrete Structures, Stockholm.

Saade MRM, Passer A, Mittermayer F (2018) A preliminary systematic investigation onto sprayed concrete's environmental performance, *Procedia of 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) conference*, 30 April- 2 May 2018, Copenhagen, Denmark, pp. 212-217.

Sandbakk S, Miller LW, Standal PC (2018) MiniBars™ – A new durable composite mineral macro-fiber for shotcrete, meeting the energy absorption criteria for the industry, Proceedings of World Tunnel Congress 2018.

Sika (2011) Sprayed Concrete Handbook, Sika Services AG.

Strömberg L, Löfsjögård M, Ansell A, Hintze S (2019) Optimization parameters sets for sustainable concrete in tunnels, Proceedings of the 10th Interdependence between Structural Engineering and Construction Management Conference, Chapter 19.6.

Trafikverket (2015). E4 Förbifart Stockholm. FSE502 Trafikplats Hjulsta Norra. TRV 2015/18782. Administrativa föreskrifter.

Trafikverket (2016a) TDOK 2016:0231 (2016a) Krav Tunnelbyggande, Version 1.0.

Trafikverket (2016b) TDOK 2016:0232 (2016b) Råd tunnelbyggande version 1.0.

Trafikverket (2016c) Administrativa föreskrifter för Centralen projekt genom Gullberget i Västlänken projekt.

Trafikverket: TDOK 2015:0480 (2019a) Klimatkrav i planläggning, byggskede, underhåll och på teknisk godkänt järnvägsmateriel.

Trafikverket (2019b) Trafikverkets resultatkonferens Klimatkrav och Klimatkalkyl 2019, den 13 juni 2019.

Trafikverket (2020): Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0, version 2020-12-01.

Trafikverket (2021) Klimatkalkyl 7.0. <http://webapp.trafikverket.se/Klimatkalkyl/>. Hämtats mars 2021.

Technical Data Sheet for GFRP Rockbolts (2020). <https://nordicgeosupport.com/anchors-bolts-gfrp-composites/>. Hämtats april 2021.

Thomas A (2019) Achieving sustainability in underground construction through innovation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering, <https://doi.org/10.1680/jcien.19.00018>.

Tyrens (2019) Klimatkalkyl – Översyn/uppdatering av resursschabloner, rapport.