



LCC ANALYSER FÖR VATTENAVLEDNINGSS- OCH BERGFÖRSTÄRKNINGSSYSTEM

Magnus Eriksson

Martin Edelman

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

LCC ANALYSER FÖR VATTENAVLEDNINGSOCH BERGFÖRSTÄRKNINGSSYSTEM

LCC analyses for drainage and reinforcement systems

Magnus Eriksson, Statens Geotekniska Institut, SGI
Martin Edelman, Ramböll Sverige

BeFo Rapport 131

Stockholm 2014

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—131—SE

FÖRORD

Tunnlar är idag en självklar del av den svenska moderna infrastrukturen och vi har trafiktunnlar i både städer och på landsbygden. Det är viktigt att upprätthålla en hög säkerhet och en relevant totalkostnad över tid för dessa tunnlar som dimensioneras och byggs för en livstid på 120 år. Därför behöver man förstå och kunna bedöma såväl kostnader för investering som för underhåll av anläggningen. Många av de relativt omfattande och kostsamma underhållsåtgärder som utförs i dagens trafiktunnlar rör förstärkning- och vattensäkring och dessa kostnader ska man vara medveten om och ta in i samband med framtida beslut om tekniska lösningar. Val och beslut av t ex olika dränlösningar där drift och underhållskostnader har betydelse görs idag alltför ofta utan att livscykelanalyser utförts.

I Trafikverkets effektiviseringsarbete, PIA, Produktivitetsutveckling i Anläggningsbranschen har ett antal projekt föreslagits med syfte att både underlätta Trafikverkets beslutsprocess i förslags- och utredningsskedet samt att tydliggöra och effektivisera utförandeprocessen. Föreliggande projekt är en del i detta arbete. Vid val av teknisk lösning är livscykelkostnaden (LCC) en viktig del av beslutsunderlaget. I detta projekt har livscykelanalyser utförts för olika tekniska lösningar för vägtunnel med drift- och underhållskostnaden för olika vattenavledningssystem (dräner etc.) och bergförstärkningsåtgärder. En modell för att hantera olika tekniska lösningar, ansättande av kalkylränta samt direkta och indirekta kostnader i samband med hindrad vägtrafik tas upp i rapporten.

Detta arbete utfördes av Magnus Eriksson och Martin Edelman vid Statens Geotekniska Institut (SGI) respektive Ramböll. En referensgrupp har följt projektet och bidragit med råd och diskussioner. Referensgruppen bestod av Thomas Dalmalm (Trafikverket), Per Thunstedt (Trafikverket), Fredrik Bryngilson (Trafikverket), Tommy Ellison (Besab), Anders Fredriksson (Sweco) och Per Tengborg (BeFo). Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo.

Stockholm, juni 2014

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Livscykelkostnader (LCC) är en metod som används vid investeringsbedömningar och som syftar till att väga in samtliga kostnader som uppstår under en produkts hela livscykel.

I föreliggande rapport studeras tillämpning av LCC vid val av vattenavlednings- och förstärkningssystem vid tunnelbyggnad. Studien avser att väga in samtliga kostnader vilket omfattar investeringskostnader och kostnader för underhåll samt indirekta kostnader som påverkar samhället, i detta fall påverkan på trafik. Utgående från dessa studeras ett antal fall med olika tekniska system, tunnelmiljöer och trafikintensitet. Studien har gjorts på en övergripande nivå med syftet att visa vilka faktorer som är viktiga att inkludera i en LCC-analys.

Avseende tekniska system så analyseras 5 olika tekniska system avseende livslängd, underhållsbehov samt förknippade kostnader med detta. De tekniska systemen är dimensionerade för 4 olika tunnelmiljöer med avseende på bergkvalitet och vattenförhållanden vilka valts för att spegla huvuddelen av de tunnelmiljöer som återfinns i Sverige. Avseende trafikintensitet så har en högttrafik- och en lågttrafiksituation valts för studien. I Excel har sedan simulerats vilka LCC-kostnader som uppstår i samtliga fall. Diskonteringen av framtida kostnader har gjorts baserat på en kalkylränta enligt rekommendationer som ges av ASEK (Arbetsgruppen för samhällsekonomiska kalkyl- och analysmetoder inom transportområdet). En betydande del av de framtida kostnaderna uppkommer av indirekta kostnader för den störning som uppstår på person- och godstrafik.

Resultaten av studien visar att kostnader som tillkommer i samband med underhåll, dels direkta underhållskostnader, dels indirekta kostnader för trafikomläggning kan bli lika stora eller större än investeringskostnaden.

Studien visar att investeringskostnaden enskilt inte bör vara grund för val av tekniskt system utan underhållskostnader och påverkan på trafiken bör vägas in, och då specifikt för tunnlar med hög trafikintensitet. Studien visar också att, inom de val av tunnelmiljöer som beaktats, är inte bergets egenskaper styrande i hög grad. En analys på system för vattenavledning och förstärkning kan därför göras tidigt i processen även om systemen inte är fullt dimensionerade.

Sammanfattningsvis görs bedömningen att vid val av vattenavlednings- och förstärkningssystem bör systemets totala kostnadsbild beaktas i en LCC-studie. Det bedöms samtidigt att det vore fördelaktigt att utveckla en enklare modell för detta som

kan tillämpas i projekten. Ett förslag i rapporten är att bygga en sådan modell baserat på AHP (Analytical Hierarchy Process).

SUMMARY

Life Cycle Cost (LCC) is a method to estimate the total cost of a product during its entire life span.

In this study, the use of LCC analyses for selecting system for drainage and reinforcement for a tunnel is studied. The study aims to include all associated costs including investment, maintenance and the indirect costs to society from disturbances on the traffic system. Based on this, a number of cases with different technical systems, tunnel scenarios and scenarios on traffic intensity are studied. The study is a general study and the purpose is to give insight in governing aspects rather than give bases for choice of system for a specific project.

Five different systems for drainage and reinforcement are studied in respect of investment costs, need for maintenance and its cost. These are studied in four different cases of tunnel environments, differing in terms of rock mass quality and water ingress. The different tunnel environments are chosen to reflect the most frequent tunnel environments occurring in Sweden. Traffic intensity is studied for a high and a low intensity case. The different combinations are simulated in Excel and all associated costs are modelled for each case. Future costs are recalculated to present value based on an estimated interest rate. The estimated interest rate is based on the recommendations given in ASEK.

The result of the study show that costs that adds on due to maintenance and disturbance on traffic may be equally large or larger than the investment cost. A considerable part of the future costs are found to emanate from costs associated with traffic interference on personal and goods transports.

The study shows that when selecting system, the investment cost solely should not be used but also future costs for maintenance. Additional to this it is shown that the impact on traffic should be recognized, especially in tunnels with high traffic intensity. The study also shows that the cost only marginally is affected by the ground conditions. It is therefore possible to determine system relatively early in a project without a detailed design as bases.

In summary it is found important to include all costs before choosing system for drainage and reinforcement in a LCC study. However, it is recommended to develop a more easily handled model to be used on a project level. The suggestion is to use AHP (Analytical Hierarchy Process) for such a model.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord	i
SAMMANFATTNING.....	ii
SUMMARY	iv
1. Inledning och bakgrund	1
2. Syfte och problemställning.....	3
2.1. Inledning	3
2.2. LCC inom anläggningssidan.....	3
2.3. Tidigare tillämpning	5
2.4. Krav och dimensionering	7
2.4.1. Förstärkning.....	7
2.4.2. Vattenavledning	7
2.5. LCC som ekonomisk modell	8
2.5.1. Investering (G)	8
2.5.2. Drift (D) och Underhåll (U)	8
2.5.3. Kalkylränta och diskontering	10
2.6. Direkta och indirekta kostnader för hindrad trafik.....	13
2.7. Sammanfattning	15
3. Metod	17
3.1. Inledning	17
3.2. Modell	17
3.3. Tunnel	17
3.4. Tunnelmiljö	19
3.5. Tekniska system	20
3.5.1. System 1	21
3.5.2. System 2	23
3.5.3. System 3	25
3.5.4. System 4	28
3.5.5. System 5	30

3.6. Övrig indata.....	32
3.6.1. Kalkylränta och inflation.....	32
3.6.2. Samhällsekonomiska kostnader	33
4. Resultat och analys.....	35
4.1. Inledning	35
4.2. Redovisning av grundalternativ	35
4.3. Redovisning av jämförelsealternativ	39
4.3.1. Alternativ med liten trafikpåverkan	39
4.3.2. Alternativ med lägre kalkylränta	39
4.4. Känslighetsanalys underhåll	40
5. Diskussion	45
5.1. Betydande faktorer	45
5.2. Förslag på metodik för LCC-analyser	46
6. Slutsatser och förslag på fortsatt arbete.....	49
6.1. Behövs LCC-analyser för att välja rätt system?	49
6.2. Vad är viktigt i LCC-analysen?	49
6.3. Huvudsakliga osäkerheter i föreliggande studie	50
6.4. Förslag till fortsatt arbete	50
ERKÄNNANDEN.....	52
REFERENSER.....	53
Bilaga 1 – Dimensionering av tekniska system.....	55
Bilaga 2 – Beräknade kostnader	63

1. INLEDNING OCH BAKGRUND

Tunnlar för transportinfrastruktur kostar mycket pengar att bygga och underhålla och en förbättring eller effektivisering i byggprocessen, i material som används eller byggteknik kan många gånger ge en betydande besparing. Följande studie avser kostnader förknippade med vattenavledning- och förstärkningssystem i tunnlar.

System för vattenavledning och bergförstärkning har förbättrats kontinuerligt så länge tunnlar har byggts. Samtidigt har det skett en förändring i samhället som ökat kraven avseende säkerhet och minskad omgivningspåverkan och trafikintensiteten har ökat betydligt. Detta har gjort att tunnlar dels kräver mer underhåll, dels att åtkomsten till dessa är begränsad. Sammantaget gör detta att det alltså finns en stor potential till förbättringar och kostnadsbesparingar.

Föreliggande rapport behandlar frågan hur ska man beakta livscykelkostnaden för en tunnel med avseende på vattenavledning och bergförstärkning? Bör man ta hänsyn till kostnader som uppstår för underhåll och reparation i samband med investering eller räcker det om man beaktar investeringskostnaden för systemen, systemen är ju ändå dimensionerade för vissa grundläggande krav på livslängd och säkerhet etc.?

Rapporten utgår ifrån att validera en grundläggande hypotes: LCC-analyser (Livscykelkostnadsanalyser) bör användas som verktyg för att bedöma alternativa lösningar på vattenavlednings- och förstärkningssystem i tunnlar utifrån ett totalkostnadsperspektiv.

Kanske står tunnelbyggnadstekniken i Sverige inför ett paradigmskifte med ett mer industrialiserat byggande, istället för det nuvarande som baseras till stor del på platsspecifika förhållanden. De nordiska ländernas förutsättningar, speciellt i Sverige och Finland, är berg av god kvalitet och måttliga bergspänningar vilket möjliggjort enkla förstärkningslösningar. Detta har möjliggjort en tunneldrivningsteknik som baserats på injektering, sprängning och förstärkning och utifrån en internationell jämförelse, billiga tunnlar. Internationellt har utvecklingen gått mot inklädda tunnlar i högre grad och i många fall borrade tunnlar och allt utfört med ett mycket industrialiserat arbetssätt. En tillämpning på detta i Norden är Hallandsåstunneln. Denna är intressant ur flera perspektiv. Ett perspektiv är LCC-perspektivet, alltså kostnaden för Hallandsåstunneln ur ett livscykelperspektiv. Samtidigt som bygget av Hallandsåstunneln på flera sätt varit problemfyllt, flerdubbla kostnader mot planerat och miljöutsläpp med direkt påverkan på människor och djur, så kommer samhället till

slut att få en mycket gediget byggd tunnel. Vad får detta för konsekvens på livscykelkostnaden i ett 100 års perspektiv?

Bakgrunden till föreliggande rapport är behoven av effektivisering inom anläggningsbranschen vilket initierat forskning och utredning hos BeFo såväl som inom Trafikverkets program PIA. Utgångspunkten för arbetet var att utreda och utföra LCC-analyser för ett antal olika tekniska system för vattenavledning respektive förstärkning.

Målsättningen med uppdraget var att dels definiera och redogöra för en metodik avseende LCC-analyser, dels redovisa LCC-analyser för system för vattenavledning och förstärkning i vägtunnlar.

Under arbetets gång har en viss anpassning och förändring av projektet gjorts även om målsättningen varit densamma. En förändring är att se vattenavlednings- och förstärkningssystem som samverkande och inte separata system. En annan förändring är att det inte varit möjligt att visa på det skarpa underlag som var målsättningen, dessa data är inte tillgängliga. Underlag till studien har därför istället till stora delar hämtats från den samlade erfarenheten i referensgruppen.

Osäkerheterna är många när man behöver blicka in i framtiden. Detta gäller exempelvis kalkylränta som många påpekar är svår att prognosticera men många andra faktorer också. En annan stor fråga i detta sammanhang är naturligtvis förändring av vårt transportsystem pga. demografiska förändringar och med hänsyn till behov av ett hållbart samhällssystem. Tunnlar dimensioneras med ett 120 års perspektiv och går vi tillbaka dryga 100 år så var underhåll i tunnlar ingen stor fråga, vilket det är idag! Hur blir det om ytterligare 100 år?

2. SYFTE OCH PROBLEMSTÄLLNING

2.1. Inledning

Följande kapitel beskriver allmänt LCC-analyser och mer specifikt hur dessa kan tillämpas vid val av teknisk lösning för vattenavledningssystem och bergförstärkningsåtgärder i trafiktunnlar utifrån en mindre litteraturstudie. Syftet är att ge en bakgrund till den fortsatta metodiken i detta arbete och viss indata till beräkningar.

2.2. LCC inom anläggningssidan

LCC står för Life Cycle Cost och kan kortfattat beskrivas avse en metod att ta hänsyn till en produkts kostnad över hela dess livslängd. Grunden till LCC är att det finns behov vid investeringskalkyler att bedöma om en investering blir lönsam om man beaktar alla kostnader, alternativt vilken av alternativa lösningar som blir mest lönsam. LCA, Life Cycle Assessment, är en motsvarande analys som används för att bedöma den totala miljöpåverkan under en produkts livslängd och ibland blandas dessa två förkortningar ihop. Om man exempelvis ser ett vindkraftverk så avser LCC om det är lönsamt att investera i ett visst verk och LCA om man under verkets livslängd får tillbaka mer energi än det åtgår för att bygga det.

Traditionellt inom anläggningssidan får den direkta investeringskostnaden en stor betydelse vid val av teknisk lösning. Anledningen till detta är bland annat att exempelvis investeringar i vägar och järnvägar är budgetfinansierade och att det eftersträvas att erhålla en så stor investeringsvolym som möjligt. Men, strävan efter att begränsa investeringskostnaden kan leda till en suboptimering avseende kostnader för underhåll och funktion. För att hantera detta ansätts ofta olika krav, exempelvis avseende teknisk livslängd.

Det finns för LCC en rad faktorer som behöver beaktas. I Langdon (2007) visas vilka analyssteg som behövs för en komplett LCC-analys. Det första steget är att identifiera syftet med LCC-analysen. Då anläggningsprojektering/design görs i flera skeden från förstudie till bygghandlingar ställs olika krav på LCC-analysen innehåll vilket redovisas i Figur 1.

Context and need	Typical application of LCC
During investment planning, clients will need to understand the full cost implications of operating as well as building the scheme, to establish its essential viability.	The analysis will be based on approximate data, typically historical information from similar projects, but sufficient for budgeting and option ranking to allow a decision on whether to go ahead, to reduce the scheme or stop.
During the early stages of scheme design, decisions will be required on the fundamental elements, structure, envelope, services, finishes.	The analysis can draw on feasibility studies and pre-project professional advice, as well as historical information, to support decisions on the key features of the scheme – its size, scope, method of construction and operation.
By detail design stage, the essential cost parameters of the scheme will be determined but decisions will still be required on details and whether finally, to commit to construction.	Information can now be fed into the analysis based on clear view of all primary elements of the scheme and access to related cost, service life and maintenance data from manufacturers' specifications, as well as similar projects and national price books. This allows a detailed LCC breakdown confirming the viability of the scheme and appraisal of detailed design options. Sensitivity and risk analyses may also be carried out.
Detailed design also requires final selection of material, components and systems. Potentially, similar decisions will subsequently be required in the event of their replacement during operation and maintenance.	LCC analysis can be focused on the specific component or system with the benefit of related cost, service life and maintenance data from the manufacturers' specifications, as well as from the similar projects and national price books. The main focus will be on option evaluation, ranking and selection.
During the operation of the completed asset refurbishment and renewal of some elements might be required, driven by (for example): High operational costs, high energy consumption, obsolescence, change in use of the asset, components reaching the end of their service life.	

Figur 1 Beskrivning av LCC-tillämpning i olika skeden (efter Langdon, 2007)

Figure 1 Description of LCC in different stages according (after Langdon, 2007)

2.3. Tidigare tillämpning

LCC beskrivs i flera publikationer först tillämpats inom amerikanska försvaret för att sedan börja tillämpas inom byggnadsindustrin på 80-talet, e.g. (Gluch & Baumann 2004; Noring & Hochschorner, 2011). På senare år har även LCC börjat tillämpas inom anläggningsidan och inom miljösidan. Exempelvis fick Langdon (2007) i uppdrag av Europeiska kommissionen att utveckla en europeisk metodik för att tillämpa LCC inom anläggningsidan. Syftet med det uppdraget var bl a att öka konkurrenskraften inom anläggningsindustrin men det fanns andra mål också såsom att öka industrins medvetenhet om miljömål kopplat till LCC.

I Sverige och inom tunnelindustrin så är LCC inte något som standardmässigt används. Det finns exempel på att det gjorts studier inom Citybanan i Stockholm (Fredriksson et al, 2006) och förmodligen finns fler tillämpningar även om dessa inte blivit standardiserade eller publicerade i allmänna forum. Boverket (2008) har i en rapport beskrivit grunden i LCC och hur denna skulle kunna tillämpas i bygg- och fastighetsbranschen.

I några examensarbeten har LCC-analysers tillämpning för anläggningsindustrin utforskats. I Almfeldt (2012) utvecklades en metod att kalkylera LCC-kostnaden som illustreras i ett antal exempel. Metoden är även presenterad i en vidareutvecklad form i Lindblom & Almfeldt (2013) och i Lindblom & Dahlström (2013) med tillämpning på Lundbytunneln. SL (Stockholms lokaltrafik) initierade ett examensarbete på KTH avseende LCC-analys för planering av underhåll i spårtunnlar som presenterats i Skoglund (2012). En rekommendation i den studien är att skapa underlag för LCC-analys genom att föra en detaljerad underhållslogg där både insatser, tidsåtgång och kostnader framgår.

Utöver detta finns mycket studier i allmänhet av underhållsfrågor för infrastruktur i allmänhet och tunnlar i synnerhet. Ett flertal publikationer har påtalat behoven av dokumentation av åtgärder och att underlag saknas för överblicka behoven framöver, se tex Andren et al (2008) eller Hargelius (2006). Underlag behövs för kunskapsuppbyggnad och det har också påvisats behov av kunskapsuppbyggnad för branschen vilket sammanfattats/föreslagits i Ansell et al, 2006. I rapporten diskuteras LCC-analys för design av tunnlar och att utgå ifrån sannolikhetsbaserade analyser. Men, det konstateras vidare att faktiska data för en sådan analys saknas.

En stor fråga som är under utredning och som har stark anknytning till föreliggande studie är inläckage av vatten och de åtgärder detta kräver. Exempelvis diskuteras

Lindblom & Dahlström (2013) åtgärder för optimerat underhåll av bergtunnlar med tillämpning på Lundbytunneln. Deras slutsats är bland andra att det ekonomiskt bedöms lönsamt att ersätta dräner med en betonginklädnad. Denna slutsats är dock tvärt emot vad som blev slutsatsen med tillämpning på Citybanan förstärkningslösning (Fredriksson et al, 2006). Lundbytunneln och Citybanan är två olika projekt det visar att det inte finns en säker lösning som alltid gäller.

2.4. Krav och dimensionering

Krav på tunneln anges i Trafikverkets tekniska krav tunnel (TRVK Tunnel 11). Nedan redovisas för respektive förstärkning och vattenavledning allmänna krav och dimensioneringsprinciper.

2.4.1. Förstärkning

Avseende det bärande huvudsystemet anges att detta ska dimensioneras så att den årliga sannolikheten blir mindre än exempelvis 10^{-6} att ett brott sker (gäller säkerhetsklass 3). Utöver detta anges att det bärande huvudsystemet ska dimensioneras för en teknisk livslängd på 120 år och om en kortare livslängd tillämpas ska anläggningen utformas så att anläggningsdelen är åtkomlig för underhåll.

För att utföra detta så utreds bergförhållanden och de laster som erhålls och en förstärkning dimensioneras. Det finns flera olika metoder att dimensionera systemet. Vanligt är att använda empiriska system varav Q-systemet är det mest vanliga i nordiska förhållanden. Utgående från detta görs verifieringar av förstärkningens funktion i olika snitt och med olika metoder, analytiska och numeriska, i förhållande till behoven. Anvisningar för dimensionering av det bärande huvudsystemet ges i Banverkets handbok BVH 1585.36.

2.4.2. Vattenavledning

TRVK Tunnel 11 ställer övergripande krav på vattenavledningssystem:

- Maximalt tillåtet inläckage per inläckageställe i vägg och tak för väg- resp järnvägstunnlar. Det anges att uppsamlat vatten ska avledas på ett frostsäkert sätt.
- Det anges att systemet ska dimensioneras för en last av isbildning på 3 kN/m².
- En dränerad vatten- och frostsäkring ska dimensioneras för ett vattentryck på 0,5 kPa.
- Det anges även lastfall för lossnande bergblock i bergtunneln på ytförstärkningar och inklädnader.

Det finns även andra krav med koppling till systemet. Det finns inte på samma sätt som för förstärkning en handledning till val och beskrivning av system utan till stor del används erfarenheter från tidigare projekt och i vissa fall görs tester på nya metoder och system.

2.5. LCC som ekonomisk modell

Det följande beskriver en LCC-modell baserad på nuvärdesberäkning, vilket bedöms vara den vanligaste modellen som tillämpas för LCC. Beskrivningen är hämtad från Boverket (2008) med syfte att skapa en viss igenkänningsfaktor för branschen.

Ekvation 1 visar den förenklade nuvärdesformeln där G står för grundinvestering, D för driftskostnad och U för underhållskostnad. Det är dessa tre delar som totalt sett ger LCC-kostnaden.

$$LCC = G + D + U \quad (\text{Ekvation 1})$$

Beräkningen av LCC-kostnaden görs vanligtvis som en nuvärdesberäkning, dvs samtliga kostnader under produktens livslängd uppskattas och räknas om till nuvärdet (diskontering) vid investeringstillfället.

2.5.1. Investering (G)

Av LCC-analysens ingående delar är investeringskostnaden den som är enklast att bedöma och den behöver inte räknas om utan anges i sitt nuvärde. Det kan naturligtvis vara svårt att uppskatta i ett tidigt skede vad investeringskostnaden blir för olika alternativt om dessa är komplicerade system men i förhållande till att bedöma framtida kostnader är det enkelt. Kostnaderna kan dock bero på anbud och relativt långa tidsperioder innan reglering av kontrakten sker varför även detta är behäftat med svårigheter.

Bedömning eller kalkyl på investeringskostnaden görs ofta av denna anledning baserat på successiv kalkylering som avser att täcka in olika osäkerheter, dels osäkerheter förknippade med exakta byggförhållanden, dels kontraktuella och marknadsmässiga osäkerheter. Successiv kalkylering diskuteras dock inte vidare i denna rapport utan det antas att investeringskostnaden är kalkylerbar.

2.5.2. Drift (D) och Underhåll (U)

Drift- och underhållskostnader avser periodiskt förekommande kostnader som krävs för att bibehålla funktionen och verifiera funktionskrav. Dessa kostnader och insatser för dessa åtgärder kan vara omfattande i vissa fall. Underhåll definieras i Ansell et al (2006) till olika metoder för att vidmakthålla funktionsdugligheten.

Det finns mer eller mindre exakta beskrivningar i olika rapporter till vad som avses med drift respektive underhåll men helt självklart är det inte att alla har samma definition.

Oavsett definitiv definition av dessa så är drift- och underhållskostnader kostnader som återkommer mer eller mindre regelbundet och som krävs för att systemet ska fungera.

Ansell et al (2006) diskuterar ingående omfattning av drift och underhåll i trafiktunnlar. I föreliggande studie kan inte hänsyn tas till alla inverkande komponenter vilket på sätt och vis blir en begränsning. Följande kan dock noteras:

- System för bergförstärkning betraktas i tre kategorier, selektiva, samverkande och bärande utföranden. I permanentskedet är det samverkande eller bärande förstärkningar som huvudsakligen används.
- Avseende vattenavledningssystem inklusive tätning anges huvudgrupperna inklädnad och dränerade konstruktioner.

Avgränsningen är bergtunnlar där bergguttaget är gjort med sprängning, borring eller sågning, dvs på ett för svenska förhållanden traditionellt sätt.

Underhåll i tunnlar med hänsyn till vattenavlednings- och förstärkningssystem så bedöms vissa åtgärder vara vanliga (se bla Andrén 2006; Andrén et al, 2008):

- Kontroll och åtgärder på sprutbetong
- Läckande bultar
- Spolning av dräner
- Borttagande av is (se Figur 2)

Drift- och underhållskostnader räknas om till nuvärden vid investeringstillfället.



Figur 2 Exempel på isbildning i tunnlar (Andrén 2009)

Figure 2 Example of ice structures in tunnels (Andrén 2009)

2.5.3. Kalkylränta och diskontering

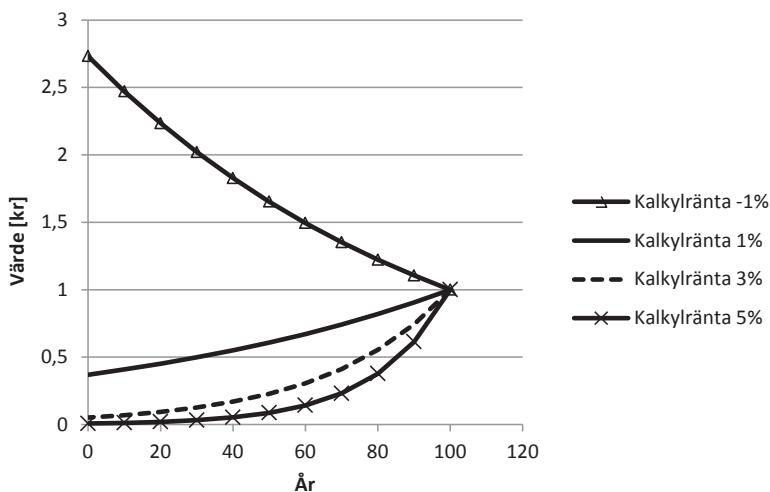
Kalkylränta och diskonteringen är en osäkerhet i samband med LCC-analyser.

Driftkostnader (D) och underhållskostnader (U) ska räknas om till nuvärden vilket sker enligt Ekvation 2 där nuvärdet (NV_x) av kostnaden (x) beräknas baserat på en kalkylräntan (r) över t år.

$$NV_x = \frac{x}{(1+r)^t} \quad (\text{Ekvation 2})$$

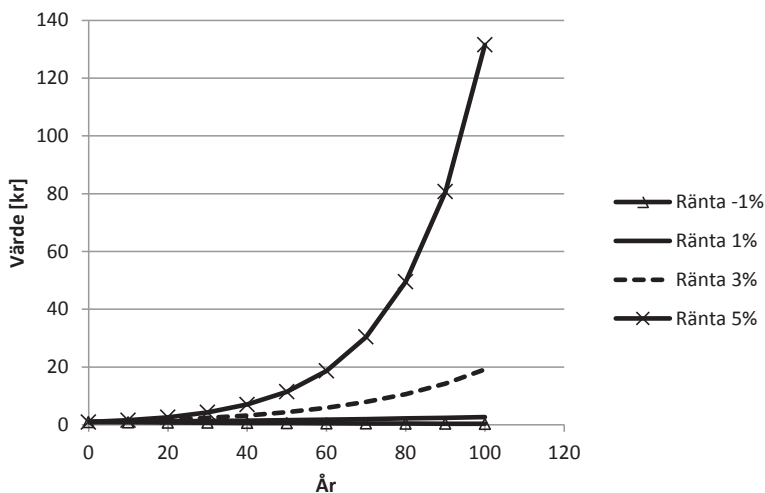
I Figur 3 illustreras hur NV ändras baserat på en variation av antal år och mot olika kalkylräntor. Bilden visar vad en framtida krona är värd idag förutsatt olika kalkylräntor. Det framgår att val av kalkylränta får mycket stor påverkan på resultatet.

Ett tankesätt för att illustrera nuvärdet är "Hur mycket behöver jag ha på banken idag för att kunna betala detta underhåll om x år?" (Lindblom & Dahlström, 2013). Figur 4 illustrerar vad en krona idag är värd om x år vid olika räntor.



Figur 3 Illustration av kalkylräntans och tiden betydelse vid en nuvärdesberäkning

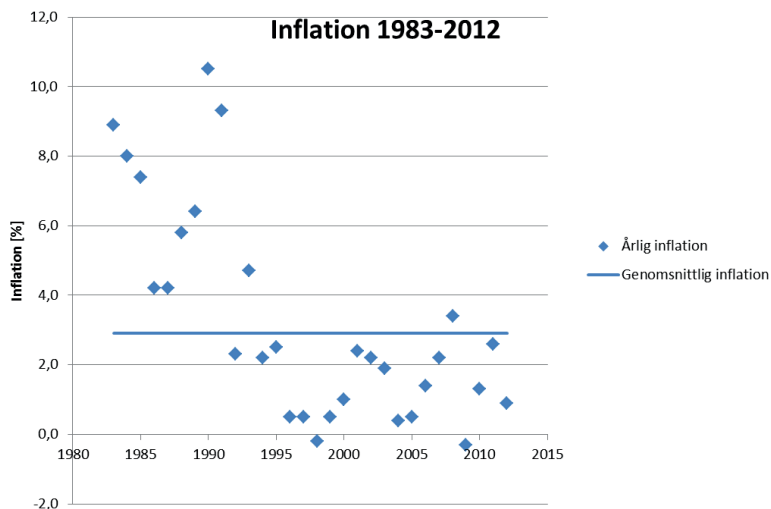
Figure 3 *Illustration of the importance of rate of interest in present value calculations showing the present value of a future Swedish crown*



Figur 4 Illustration av räntans och tiden betydelse för en kronas framtida värde
 Figure 4 Illustration of importance of rate of interest for the future value of a Swedish crown

Kalkylräntan baseras på olika avkastningskrav och alternativa avkastningar men för att beskriva det enkelt baseras kalkylräntan på möjlig avkastning och inflation. Om kalkylräntan inkluderar inflation kallas den real kalkylränta och i annat fall nominell. Inflationen får en stor betydelse på realräntan och i tider med hög inflation har det hänt att realräntan varit negativ. Det svåra är naturligtvis att göra en prognos inför framtiden.

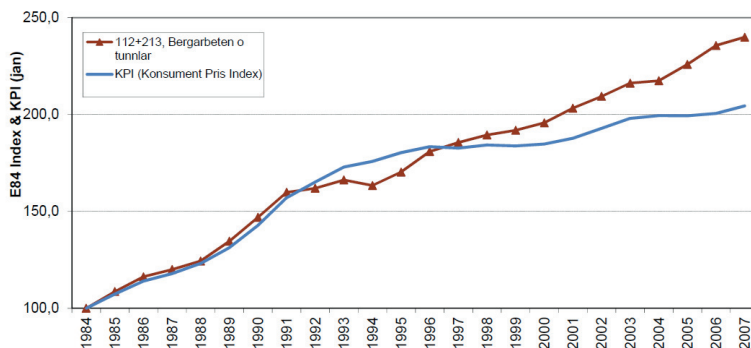
En fråga är vilka värden som ska användas. Tittar man historiskt på inflation och kalkylränta så framkommer att inflationen över 30 år varit i snitt 3% och har varit relativt stabil sen ca 1995 då inflationsmålet blev en del av penningpolitiken, se Figur 5.



Figur 5 Inflation över de senaste 30 åren. (Källa: SCB)

Figure 5 Inflation in Sweden during the last 30 years (Source: SCB)

Prisutveckling och kostnader är mycket beroende av konjunkturläget och varierar stort beroende på aktuella förhållanden, projekt etc. Trafikanalys (2012) redovisar sammanställningar av en rad olika källor på utveckling av marknaden avseende priser, konkurrens etc. Exempelvis redovisar Trafikanalys (2012) data från SCB som visar att den generella prisnivån (mätt med KPI) under tidsperioden 1990-2010 stigit med 46 procent. Trafikanalys (2012) redovisar därutöver att Trafikverkets kostnader för drift och underhåll ökat med ca 60 procent och kostnaderna för järnvägsbyggnation (investering) ökat med mer än det dubbla (ca 150 procent) i perioden 1990-2011, dvs betydligt mer än den generella prisnivån. Den största prisökningen har skett under de senaste 6 åren. Detta illustreras i Mattsson & Stille (2010), se Figur 6, under perioden 1984-2004 och visar att generella kalkyldata kan vara fel och att det kan finnas behov att gå i detalj och studera utveckling för en specifik delmarknad. Möjliga anledningar till kostnadsökningar inom anläggningsteknik generellt anges i Trafikanalys (2012) kunna vara ökade energikostnader och bristande konkurrens.



Figur 6 Illustration av skillnad i utveckling av konsumentprisindex och kostnader för bergarbeten (Mattsson & Stille, 2010)

Figure 6 *Illustration of difference in development in general prices (blue line) and prices concerning rock works (red dotted line)*

Sammantaget kan konstateras att uppskattning av kalkylränta är svårt och behäftat med stora osäkerheter.

2.6. Direkta och indirekta kostnader för hindrad trafik

En kostnad som uppstår i samband med underhållsåtgärder är avstängning av trafik. Dessa kan omfatta både direkta och indirekta kostnader. De direkta kostnader kan vara bussning av passagerare då tågtrafiken hindras på en sträcka, temporära trafikomläggningar etc. Indirekta kostnader kan vara längre restid, köbildning, stress etc som resenärer drabbas av men som inte direkt ersätts. Ett exempel är enligt Figur 7 nedan.



Figur 7 Exempel på trafikpåverkan i samband med underhållsarbeten. (GP 17/10 2013)

Figure 7 An example of disturbance on traffic due to maintenance works in an urban tunnel Götatunneln, Gothenburg (GP 17/10 2013)

Trafikverket leder ett projekt/arbetsgrupp ASEK som står för "Arbetsgruppen för samhällsekonomiska kalkyl- och analysmetoder inom transportområdet". Denna arbetsgrupp tar fram underlag, initierar utredning och forskning inom området för att skapa ett gemensamt verktyg och plattform för bedömning av samhällsekonomiska kostnader.

I ASEK 5, kapitel 7, ges riktlinjer till "Åktidsvärden" för olika typer av transporter, långväga, kortväga, med bil, färja och för privatresor och transporter etc. Dessa beskriver därmed vad en timmes "resa" i ett visst scenario bedöms vara värd och dessa är framtagna för att kunna göra en lönsamhetsbedömning för samhället för investeringar i transportinfrastruktur generellt.

Värdena är inte direkt avsedda eller anpassade för att användas för tillfälliga trafikavstämningar utan ASEK 5 rekommenderar i hänseende till förseningar att multiplicera åktidsvärdet för en specifik resa med 3,5. Tillika finns rekommendationer för restidsosäkerhet samt trängseltid som kan vara applicerbara på en tillfällig trafikstörning såsom uppkommen i samband med underhållsarbeten.

Trafikmängden är en annan del av den indirekta kostnaden. Enligt statistik från Trafikanalys så har vägtrafiken ökat runt 100% sen 1970. Prognosen på förändring i persontrafiken är att bilresandet ökar med 67% fram till 2050, se Figur 8.

	2006	2050	Ökning
Bil	89 189	149 206	67 %
Spårtrafik	14 476	26 007	80 %
Buss	10 423	11 982	15 %
Inrikes flyg	3 074	5 883	91 %
Gång och cykel	3 786	4 604	22 %
Totalt transportarbete	120 948	197 682	63 %

Figur 8 Prognos på persontrafikutvecklingen (miljoner person km per år) fram till 2050 (ASEK 5)

Figure 8 Prognosis on traffic development (million person km per year) until the year 2050 (ASEK 5)

Förändringen i resande är dock ojämnt fördelad över landet och det är naturligt att regioner med ökande befolkning får en ökad trafikmängd och vice versa. Detta innebär att en del regioner i Sverige får en kraftigare trafiktillväxt än vad som framgår av Figur 8.

I dagsläget är det ett antal tunnlar som har en mycket hög trafikintensitet. Enligt en sammanställning i Ansell et al (2006) konstateras att en högtrafikerad tunnel kan ha en trafikmängd på ca 100 000 fordon i årsmedeldygn (ÅMD) och en lågtrafikerad vägtunnel ca 1000 – 2000 fordon i ÅMD.

2.7. Sammanfattning

Detta avsnitt har gått igenom litteratur som berör LCC-analyser och underhåll av tunnlar. Utgående från berörda referenser konstateras att framtida kostnader är viktiga att beakta vid investeringsbedömningar och att detta gäller anläggningskonstruktioner i samma omfattning som andra konstruktioner. Avseende LCC-analyser så förefaller ofta nuvärdesmetoden användas och osäkra faktorer är att bedöma behov av framtida underhåll och vilken kalkylränta som ska användas i analysen.

LCC-analyser på vattenavlednings- och förstärkningssystem är behäftade med flera osäkerheter. Osäkerheter återfinns dels i de tekniska systemen i sig och deras

förknippade investeringskostnader och underhållsbehov, livslängd och funktion, dels i de ekonomiska analyserna samt i påverkan på tredje man.

Det bedöms viktigt att inkludera indirekta kostnader i analyserna såsom påverkan på trafik etc då underhållsåtgärder minskar tillgängligheten i tunneln för trafik. Då den beaktade livslängden på infrastruktur är 120 år i det vanliga fallet så bör prognoser på trafikutveckling och belastning på trafiksystemen också ingå. Detta är behäftat med stor osäkerhet och inte något som denna studie i sig kan hantera. Det bör dock vara ett viktigt bidrag att utgå ifrån nuvarande nivåer på trafik i tunnlar och bedöma hur underhållsåtgärder i tunnlar påverkar samhällsekonomin.

3. METOD

3.1. Inledning

Följande avsnitt beskriver hur LCC-analysen utförs i denna rapport.

Syftet med analysen är att undersöka när LCC-analysen kan vara viktig att tillämpa och hur olika parametrar och faktorer påverkar den totala kostnadsbilden. Metodiken som tillämpas har sin utgångspunkt i att, ur ett LCC-perspektiv, utreda ett antal olika system för vattenavledning och bergförstärkning för olika berg- och vattenförhållanden. Analysen utförs för en fingerad tunnel med representativa värden på tvärsnitt och längd. Studien tar även hänsyn till kostnader för trafikavstängningar.

Alla siffror baseras på antaganden i någon form. I görligaste mån har referenser till sakkunniga eller vägledande arbeten getts men de är alltjämt förknippade med osäkerheter. Kalkylvärden för investerings- och underhållskostnader har tagits fram på arbetsmöten med referensgruppen.

En inriktning på studien blev tidigt att inte separera vattenavlednings- och förstärkningssystem utan beakta dessa som samverkande då dessa påverkar varandra. LCC-analys utförs därför med vattenavledning och bergförstärkning som ett system.

3.2. Modell

Analyserna görs i en modell med parametrar indelade i tre huvudgrupper där varje parameter sedan varieras och kombineras till ett antal olika lösningar som analyseras.

- Tunnelmiljö beror på bergkvalitet och bergtäckning/vattentryck
- Tekniska system för vattenavledning och bergförstärkning
- Övriga variabla parametrar såsom kostnader för trafikavstängningar

Analyserna utförs på en fiktiv tunnel. Tunnelns miljö, djup och bergklass varieras och olika tekniska system för vattenavledning och bergförstärkning simuleras utifrån ett LCC-perspektiv i tunneln.

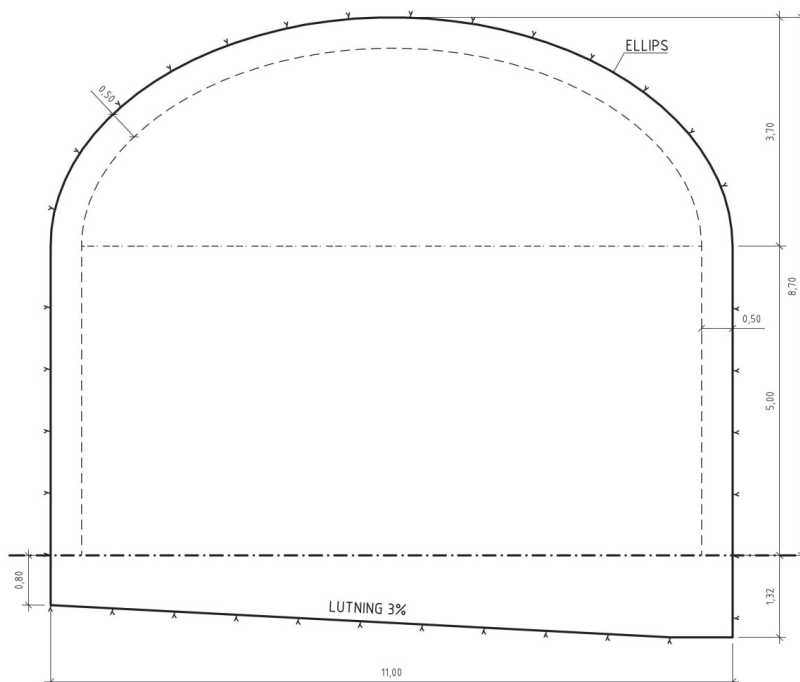
Nedan beskrivs Tunneln, Tunnelmiljö, Tekniska system samt Övriga variabla parametrar.

3.3. Tunnel

Modellmässigt studeras en tunnel på 1000 m med tvärsnitt enligt Figur 9. För de olika tekniska systemen kommer tvärsnittet att bli lite olika beroende på platsbehov för

förstärkning och vattenavledning, men det ska i samtliga fall finnas ett fritt utrymme på 10x5 m.

Tunneln behöver i analyserna ha en viss längd även om de flesta kostnaderna analyseras baserat på ett meterpris. Anledningen är att tidsåtgången för exempelvis underhåll blir större för en längre tunnel och för att kunna jämföra resultaten så krävs en längd. I studien är 1000 m valt för det har observerats att köldinträngning etc kan nå så långt in i tunnlar (Andrén et al, 2008).



Figur 9 Illustration av det grundtvärsnitt som är utgångspunkt för arbetet med ett fritt utrymme på 10x5 m. Varje tunnelsystem får därefter en anpassad förstärkning som i vissa fall gör att tvärsnittet behöver anpassas

Figure 9 *Illustration of the basic section used in the study with a required free space of 10x5 m. 5 different solutions on reinforcement and drainage systems are the section is adopted to fulfill the required free space*

3.4. Tunnelmiljö

Tunnelmiljö avser bergmassans kvalitet och inläckage. Såväl injekteringsdesign som bergförstärkningsåtgärder och omfattning på vattenavledning beror till stor del på rådande vattentryck och bergmassans egenskaper.

Injekteringsinsatsen kan enligt Eriksson & Stille (2005) tilldelas olika kategorier baserat på förväntat vattentryck och tätningsbehov. Ett lågt vattentryck och litet tätningsbehov ger injekteringskategori 1, och ett högt vattentryck och stort tätningsbehov ger injekteringskategori 3.

Injekteringskategori 1 och 3 motsvaras av K-värden $>10^{-7}$ respektive $<10^{-8}$.

Tabell 1 Indelning av injekteringsfall i olika svårighetsklasser utgående från täthetskrav och behov av tätningseffekt (Eriksson & Stille, 2005)
 Table 1 Grouting cases in relation to difficulty based on required conductivity of the grouted zone and the required sealing effect (Eriksson & Stille, 2005)

Bedömd erforderlig konduktivitet	Bedömd erforderlig tätningseffekt		
	<90%	90-99%	>99%
$>10^{-7}$	1	1	2
$10^{-7}-10^{-8}$	1	2	3
$<10^{-8}$	2	3	3

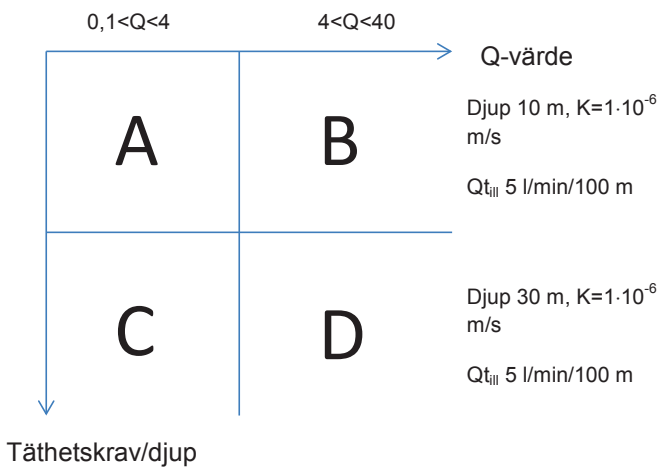
Som underlag för tätningsinsatsen har i denna studie tunneln antagits ha ett krav på maximalt inläckage på 5 l/min och 100 m tunnel och att tunneln är belägen på 10 m eller 30 m djup.

Traditionellt beskrivs bergmassan ofta genom Q-värdesindelning. Ett lågt Q-värde indikerar en sämre bergmassa och ett högt Q-värde indikerar en bättre bergmassa. Bergkvaliteten beskrivs i två intervall av Q-värden. En sämre bergmassa motsvaras av $0,1 < Q < 4$, och en bättre bergmassa motsvaras av $4 < Q < 40$. Dessa är dock snittvärden på bergets egenskaper som bedöms omfatta kanske 80% av berget eller hur rätt bergprognosen kan bedömas vara. I samband med byggnation erhålls en bättre

prognos, kanske 95% rätt men fortfarande med en viss osäkerhet. Dessa osäkerheter orsakar en stor del av det behov av underhåll och regelbundna besiktningar som uppstår på produkten under dess livslängd.

Detta ger sammantaget fyra olika tunnelmiljöer enligt Figur 10.

- Tunnelmiljö A förväntas ha ett lågt vattentryck och litet tätningsbehov, och befinner sig i en sämre bergmassa.
- Tunnelmiljö B förväntas ha ett lågt vattentryck och litet tätningsbehov, men befinner sig i en bättre bergmassa.
- Tunnelmiljö C har ett högre vattentryck och större tätningsbehov, och befinner sig i en sämre bergmassa.
- Tunnelmiljö D har ett högre vattentryck och större tätningsbehov, men befinner sig i en bättre bergmassa.



Figur 10 Fyra olika tunnelmiljöer – A, B, C respektive D

Figure 10 The four different tunnel environments used in the study

3.5. Tekniska system

Beroende på förutsättningar och kravställning lämpar sig olika system olika bra för vattenavledning och bergförstärkning. Systemen samverkar ur ett LCC-perspektiv så att t ex en lösning med dränerad betonginklädnad ger ett lägre behov av traditionell bergförstärkning med bult och sprutbetong än vad exempelvis en lösning med tunnelduk gör. Man behöver alltså se på helheten för att på ett så korrekt sätt som

möjligt bedöma LCC-kostnaden för systemet. Följande olika typlösningar studeras i denna rapport:

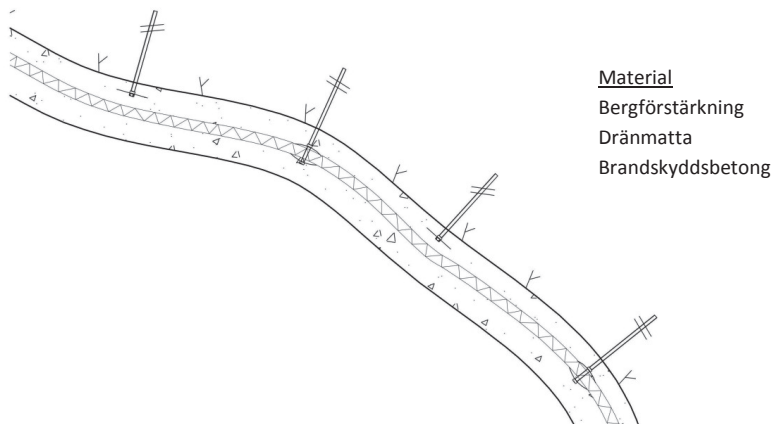
- Injektering, bult, sprutbetong, selektiva isolerade dräner
- Injektering, bult, sprutbetong, helinklädnad med tunnelduk
- Injektering, bult, sprutbetong, helinklädnad med kanalnät
- Injektering, dränerad betonglining
- Odränerad betonglining (ingen eller begränsad injektering)

Dessa tekniska system prissätts och beskrivas vad gäller underhållsbehov och reparation. Kostnader för injektering har tagits upp totalt via borrning för injektering och cement.

Respektive system dimensioneras och designas i Bilaga 1 och resultatet av detta presenteras nedan för respektive system. För respektive system tas även upp uppskattade kostnader för investering och underhåll.

3.5.1. System 1

System 1 är ett traditionellt förstärkningssystem med bult och sprutbetong och vattenavledning med selektivt installerade dräner och illustreras i Figur 11. Förinjektering utförs för att nå miljödomens krav.



Figur 11 Illustration av förstärkning enligt System 1
 Figure 11 Illustration of reinforcement and drainage system (System 1) with drainage carpets and reinforcement using bolts and shotcrete

System 1 har förstärknings- och injekteringsbehov enligt Tabell 2 nedan. Dimensionering är gjord baserad på Q-systemet och tänkt som en tidig dimensionering. Dimensionering och design av injektering redovisas i Bilaga 1. Täckningsgraden av dräner har antagits till 50 % baserat på referensgruppens bedömning.

Tabell 2 Dimensionering av förstärkning och design av injektering för system 1 i respektive tunnelmiljö. Injekteringsomgång avser hur många injekteringar som bedöms krävas där 1,0 innebär kontinuerlig förinjektering.

Table 2 Calculated need of reinforcement and grouting for System 1 in respective tunnel environment.

Tunnel- miljö	Tak		Vägg		Injektering	
	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Borrhål- avstånd Längd (m)	Injekterings- omgång (st)
A	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,0
B	S 2,3 4,0	50	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,0
C	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,8
D	S 2,3 4,0	50	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,8

Uppskattade kostnader för investering framgår av Tabell 3 nedan.

Tabell 3 Antagna kostnader för investering vid System 1

Table 3 Assumed costs for System 1

Komponent	Enhet	Kr/enhet
Borrning för injektering	m	100
Injektering inkl material	kg	20
Bergschakt	m ³	700
Bult Φ 25mm, 3 m	st	900
Bult Φ 25mm, 4 m	st	1200
Sprutbetong, 100 mm	m ²	800
Sprutbetong, 50 mm	m ²	450
Isolerad drän	m ²	1400
Sprutbetong pp fiber	m ²	900

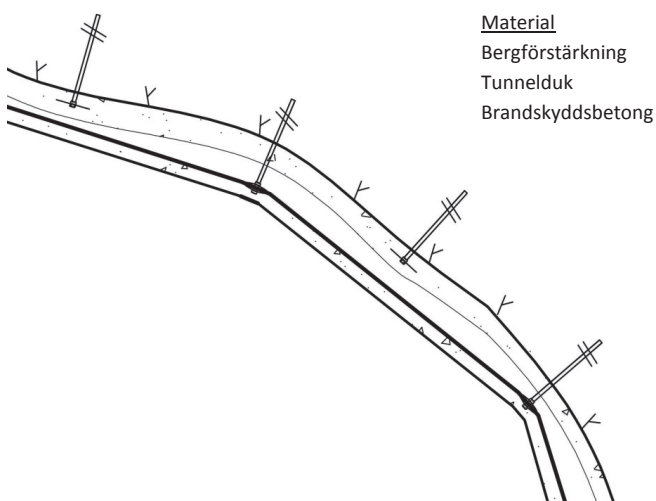
Uppskattade kostnader för underhåll framgår av Tabell 4 nedan.

Tabell 4 Antagna kostnader för underhåll vid System 1. Underhållsarbeten som utförs nattetid regleras med 50% högre ersättning
 Table 4 Assumed need and costs for maintenance of System 1. Maintenance work performed at night is increased with 50%

Komponent	Enhet	Kr/enhet	Periodicitet/frekvens
Underhåll dräner	m	250	1 ggr per år
Inspektion (inkl åtgärder)	m	600	1 ggr vart 6:e år
Demonteringskostnad dräner/ersättningskostnad	m ²	5000	1 ggr vart 30:e år
Jourarbeten	m	300	65 ggr/år

3.5.2. System 2

System 2 är ett traditionellt förstärkningssystem med bult och sprutbetong men med hel inklädnad för vattenavledning med tunnelduk. Systemet illustreras i Figur 12. Förinjektering utförs för att nå miljödomens krav.



Figur 12 Illustration av förstärkning enligt System 2

Figure 12 Illustration of reinforcement and drainage system (System 2) with reinforcement using bolts and shotcrete and drainage using a sealing cloth as sealing

System 2 har förstärknings- och injekteringsbehov enligt Tabell 5 nedan. Dimensionering är gjord baserad på Q-systemet och tänkt som en tidig dimensionering. Dimensionering och design av injektering redovisas i Bilaga 1.

Tabell 5 Dimensionering av förstärkning och design av injektering för System 2 i respektive tunnelmiljö. Injekteringsomgång avser hur många injekteringar som bedöms krävas där 1,0 innebär kontinuerlig förinjektering

Table 5 Calculated need of reinforcement and grouting for System 2 in respective tunnel environment

Tunnel- miljö	Tak		Vägg		Injektering	
	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Borrhål- avstånd Längd (m)	Injekterings- omgång (st)
A	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,0
B	S 1,6 4,0	70	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,0
C	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,8
D	S 2,3 4,0	70	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,8

Uppskattade kostnader för investering framgår av Tabell 6 nedan.

Tabell 6 Antagna kostnader för investering vid System 2

Table 6 Assumed costs for System 2

Komponent	Enhet	Kr/enhet
Borrning för injektering	m	100
Injektering inkl material	kg	20
Bergschakt	m ³	700
Bult ϕ 25mm, 3 m	st	900
Bult ϕ 25mm, 4 m	st	1200
Sprutbetong, 100 mm	m ²	800
Sprutbetong, 70 mm	m ²	600
Sprutbetong, 50 mm	m ²	450
Helinklädnad tunnelduk	m ²	1500
Sprutbetong pp fiber	m ²	900

Uppskattade kostnader för underhåll framgår av Tabell 7 nedan.

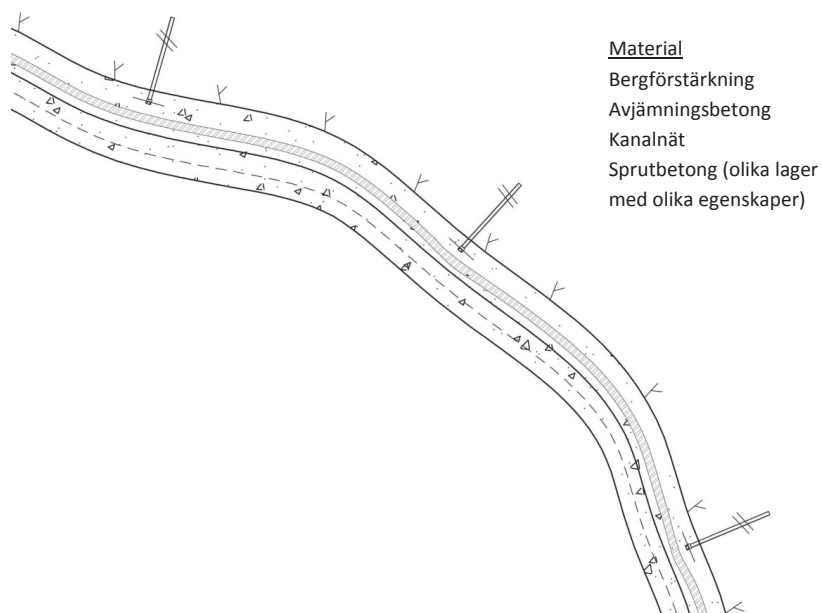
Tabell 7 Antagna kostnader för underhåll vid System 2. Underhållsarbeten som utförs nattetid regleras med 50% högre ersättning

Table 7 Assumed need and costs for maintenance of System 2. Maintenance work performed at night is increased with 50%

Komponent	Enhet	Kr/enhet	Periodicitet/frekvens
Underhåll	m	50	1 ggr per år
Inspektion (inkl åtgärder)	m	2000	1 ggr vart 6:e år
Demonteringskostnad tunnelduk/ ersättningskostnad	m ²	5000	1 ggr vart 60:e år
Jourarbeten	m	300	20 ggr/år

3.5.3. System 3

System 3 är ett traditionellt förstärkningssystem med bult och sprutbetong men med hel inklädning med kanalnät som vattenavledning. Systemet illustreras i Figur 13. Förinjektering utförs för att nå miljödagens krav.



Figur 13 Illustration av förstärkning enligt System 3

Figure 13 *Illustration of reinforcement and drainage system (System 3) with drainage using a channel network and reinforcement using bolts and shotcrete*

System 3 har förstärknings- och injekteringsbehov enligt Tabell 8 nedan. Dimensionering är gjord baserad på Q-systemet och tänkt som en tidig dimensionering. Dimensionering och design av injektering redovisas i Bilaga 1.

Tabell 8 Dimensionering av förstärkning och design av injektering för system 3 i respektive tunnelmiljö. Injekteringsomgång avser hur många injekteringar som bedöms krävas där 1,0 innebär kontinuerlig förinjektering

Table 8 Calculated need of reinforcement and grouting for System 3 in respective tunnel environment

Tunnel- miljö	Tak		Vägg		Injektering	
	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Bult- avstånd Bultlängd (m)	Sprut- betong (mm)	Borrhål- avstånd Längd (m)	Injekterings- omgång (st)
A	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,0
B	S 1,6 4,0	70	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,0
C	S 1,7 4,0	100	S 2,0 3,0	50	2,5 20	1,8
D	S 2,3 4,0	70	S 5,5 3,0	50	2,5 20	1,8

Uppskattade kostnader för investering framgår av Tabell 9 nedan.

Tabell 9 Antagna kostnader för investering vid System 3

Table 9 Assumed costs for System 3

Komponent	Enhet	Kr/enhet
Borrning för injektering	m	100
Injektering inkl material	kg	20
Bergschakt	m ³	700
Bult ϕ 25mm, 3 m	st	900
Bult ϕ 25mm, 4 m	st	1200
Sprutbetong, 100 mm	m ²	800
Sprutbetong, 70 mm	m ²	600
Sprutbetong, 50 mm	m ²	450
Helinklädnad kanalnät	m ²	1500
Sprutbetong olika skikt, total tjocklek 80 mm	m ²	900

Uppskattade kostnader för underhåll framgår av Tabell 10 nedan.

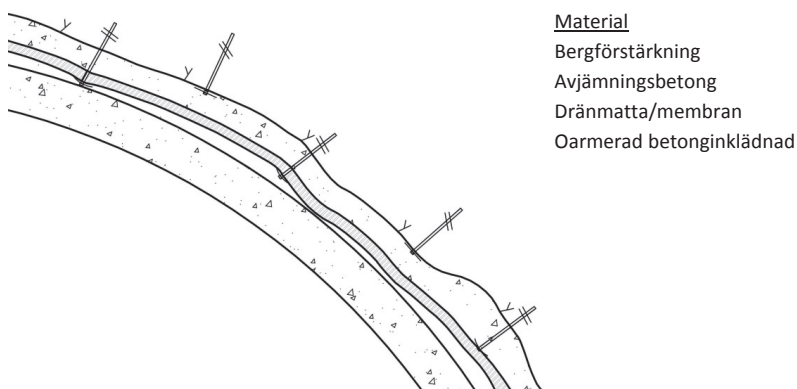
Tabell 10 Antagna kostnader för underhåll vid System 3. Underhållsarbeten som utförs nattetid regleras med 50% högre ersättning

Table 10 Assumed need and costs for maintenance of System 3. Maintenance work performed at night is increased with 50%

Komponent	Enhet	Kr/enhet	Periodicitet/frekvens
Underhåll	m	150	1 ggr per år
Inspektion (inkl åtgärder)	m	2000	1 ggr vart 6:e år
Jourarbeten	m	300	40 ggr/år

3.5.4. System 4

System 4 är en dränerad betonginklädnad med bult och sprutbetong som driftförstärkning samt dränmatta och tunnelduk som vattenavledning. Systemet illustreras i Figur 14. Förinjektering utförs för att nå miljödomens krav.



Figur 14 Illustration av förstärkning enligt System 4

Figure 14 Illustration of reinforcement and drainage system (System 4) using a drained lining

System 4 har förstärknings- och injekteringsbehov enligt Tabell 11 nedan. Dimensionering är gjord baserad på E6 Dovrebanan och tänkt som en tidig dimensionering.

Tabell 11 Dimensionering av förstärkning och design av injektering för system 4 i respektive tunnelmiljö. Injekteringsomgång avser hur många injekteringar som bedöms krävas där 1,0 innebär kontinuerlig förinjektering

Table 11 Calculated need of reinforcement and grouting for System 4 in respective tunnel environment

Tunnelmiljö	Tak och vägg		Invert		Injektering	
	Bultavstånd Bultlängd (m)	Betong- inklädnad (mm)	Bultavstånd Bultlängd (m)	Betong- inklädnad (mm)	Borrhål- avstånd Längd (m)	Injekterings- omgång (st)
A	S 5 4,0/3,0	300	-	-	2,5 20	1
B	-	300	-	-	2,5 20	1
C	S 5 4,0/3,0	300	-	-	2,5 20	1,8
D	-	300	-	-	2,5 20	1,8

Uppskattade kostnader för investering framgår av Tabell 12 nedan.

Tabell 12 Antagna kostnader för investering vid System 4

Table 12 Assumed costs for System 4

Komponent	Enhet	Kr/enhet
Borrning för injektering	m	100
Injektering inkl material	kg	20
Bergschakt	m ³	700
Bult ϕ 25mm, 3 m	st	900
Bult ϕ 25mm, 4 m	st	1200
Sprutbetong, avjämning	m ²	500
Dränmatta och tunnelduk	m ²	1000
Betonglining	m ²	2000
Kantbalk inkl bultförankring	m	6000

Uppskattade kostnader för underhåll framgår av Tabell 13 nedan.

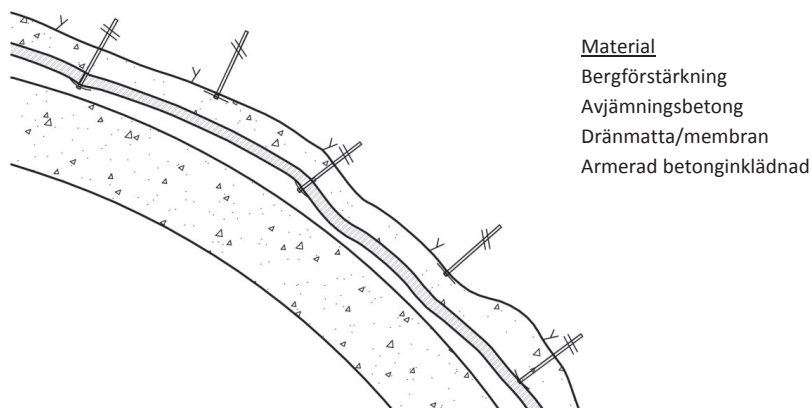
Tabell 13 Antagna kostnader för underhåll vid System 4. Underhållsarbeten som utförs nattetid regleras med 50% högre ersättning

Table 13 Assumed need and costs for maintenance of System 4. Maintenance work performed at night is increased with 50%

Komponent	Enhet	Kr/enhet	Periodicitet/frekvens
Underhåll (spolning drän)	m	100	
Inspektion	m	20	1 ggr vart 6:e år

3.5.5. System 5

System 5 är en odränerad betonginklädnad med bult och sprutbetong som driftförstärkning samt dränmatta och tunnelduk som vattentätning. Systemet illustreras i Figur 15.



Figur 15 Illustration av förstärkning enligt System 5

Figure 15 Illustration of reinforcement and drainage system (System 5) using a closed un-drained lining

System 5 har förstärknings- och injekteringsbehov enligt Tabell 14 nedan. Dimensionering är gjord baserad på projekt E6 Pålen-Tanumshede och design av förstärkningen är lika i de fyra tunnelmiljöerna med undantag av en viss mängd driftförstärkning. Injektion utförs i begränsad mängd för att klara produktionen och miljödömdom i byggskedet. Dimensionering och design av injektation redovisas i Bilaga 1.

Tabell 14 Dimensionering av förstärkning och design av injektering för system 5 i respektive tunnelmiljö. Injekteringsomgång avser hur många injekteringar som bedöms krävas där 1,0 innebär kontinuerlig förinjektering

Table 14 Calculated need of reinforcement and grouting for System 5 in respective tunnel environment

Tunnelmiljö	Tak och vägg		Invert		Injektering	
	Bultavstånd Bultlängd (m)	Betong- inklädnad (mm)	Bultavstånd Bultlängd (m)	Betong- inklädnad (mm)	Borrhål- avstånd Längd (m)	Injekterings- omgång (st)
A	S 5 4,0/3,0	700	-	700	2,5 20	0,2
B	-	700	-	700	2,5 20	0,2
C	S 5 4,0/3,0	700	-	700	2,5 20	0,2
D	-	700	-	700	2,5 20	0,2

Uppskattade kostnader för investering framgår av Tabell 15 nedan.

Tabell 15 Antagna kostnader för investering vid System 5

Table 15 Assumed costs for System 5

Komponent	Enhet	Kr/enhet
Borrning för injektering	m	100
Injektering inkl material	kg	20
Bergschakt	m ³	700
Bult Φ 25mm, 3 m	st	900
Bult Φ 25mm, 4 m	st	1200
Sprutbetong, avjämning	m ²	500
Dränmatta och tunnelduk	m ²	1000
Betonglining* 700mm	m ²	5000

*Betonglining inklusive armering (150 kg/m³)

Uppskattade kostnader för underhåll framgår av Tabell 16 nedan.

Tabell 16 Antagna kostnader för underhåll vid System 5. Underhållsarbeten som utförs nattetid regleras med 50% högre ersättning

Table 16 Assumed need and costs for maintenance of System 5. Maintenance work performed at night is increased with 50%

Komponent	Enhet	Kr/enhet	Periodicitet/frekvens
Inspektion	m	20	1 ggr vart 6:e år

3.6. Övrig indata

3.6.1. Kalkylränta och inflation

Som redan nämnt i Kapitel 2 så påverkas kalkylränta och inflation resultatet mycket.

Analys har gjorts för Trafikverkets verksamhet och redovisas i ASEK 5. Där rekommenderas kalkylräntan 3,5% (ASEK 5, 2012) som visas i Figur 16 och det är en real kalkylränta, dvs inkluderar även inflation. Det ASEK uttrycker är en rekommendation och osäkerheter i värdet diskuteras. Exempelvis anges referenser till forskning som visar att diskonteringsräntan bör vara lägre på längre sikt, från år 31 och framåt.

I denna studie tillämpas 3,5% som kalkylränta baserat på ASEK 5. För att visa på betydelsen av kalkylräntan och för att hantera den osäkerhet som gäller kalkylräntan på delmarknader, tex tunnlar eller bergarbeten, så studeras även ett fall med lägre kalkylränta 2,5%.

ASEK 5 rekommenderar:

- Att den samhällsekonomiska diskonteringsräntan sätts till 3,5 procent.

Figur 16 Utdrag ur ASEK 5 som visar sammanfattande rekommendation av nivå på den samhällsekonomiska diskonteringsräntan

Figure 16 Recommendation from ASEK to use 3.5% as rate of interest (ASEK 5)

3.6.2. Samhällsekonomiska kostnader

Beroende på var tunneln är placerad så kan kommande underhållsinsatser se helt olika ut. Möjligheten till underhåll för en tunnel i stadsmiljö, där underhållsfönstret kanske bara är ett par timmar per dygn, skiljer sig helt från en tunnel på landsbygden som kanske kan tillåtas stängas av under en vecka. Förutsättningarna och därmed även kostnaderna för underhåll kan därmed bli helt olika.

Detta studeras utifrån två fall av tunnel med "Stor" eller "Liten" påverkan på omgivande trafiksituation. Här avses en bedömning av den situation som orsakas av en hel eller partiell avstängning vilket kan variera med avseende på stad eller landsbygdsmiljö, väg eller järnväg, möjligheter till omledning, påverkan på industrier etc.

Kostnader som uppstår utöver de direkta kostnaderna för investeringen och åtgärder under livstiden är sådan som kan påverka 3:e part eller uppstå pga av fel, exempelvis skadestånd. I analysen som tillämpas i denna rapport inkluderas samhällsekonomiska kostnader som uppstår för 3:e part, bilister etc, utifrån riktlinjer i ASEK 5.

Antaganden redovisas i Tabell 17 som är framtagna med förutsättningen att det är en vägtunnel som påverkas. Det framgår av tabellen att det endast förutsätts att trafik påverkas i stor påverkan och inte i fallet med liten påverkan. Detta görs för att få en indikation på denna parameters betydelse. I ett verkligt fall får naturligtvis en exakt bedömning göras utifrån den situation som faktiskt gäller, oavsett detta är stadsmiljö eller landsbygd. I förhållande till ASEK förutsätts samtliga bedömda resor vara av lokal/regional karaktär och långväga resor förutsätts inte påverkas.

Tabell 17 Antagna värde för påverkad trafik i scenario med stor respektive liten påverkan

Table 17 Values on affected traffic in a scenario of high respectively low traffic influence

Scenario	Transport typ	Medeltrafik (ÅMD)	Kostnad per timme	Bedömd medeltrafik natt
Stor	Personresor med bil, privat och tjänsteresor	100 000	300	10 000
	Varutransporter, bil eller lastbil	2 000	500	1 000
Liten	Personresor med bil, privat och tjänsteresor	0	300	0
	Varutransporter, bil eller lastbil	0	500	0

För att uppskatta de kostnader i kronor från en viss trafikpåverkan så behöver två saker bedömas/antas:

- Hur lång tid en för en viss insats i tunneln tar, exempelvis att tunneln är avstängd i en timme.
- Vilken påverkan denna avstängning får på trafiken, exempelvis att avstängningen orsakar en 20 minuter längre restid pga en längre resväg.

Följande värden har antagits gälla för ett visst arbetsmoment i denna studie:

- Inspektion utförs på natten och leder till en partiell avstängning av tunneln.
- Underhåll utförs på natten och leder till en helt avstängd tunnel.
- Jourarbeten utförs hela dygnet med en trafikintensitet baserat på ÅMD per timme då jourarbeten utförs på några timmar.
- Ersättning av system utförs hela dygnet med trafikintensitet baserat på ÅMD då ersättning av system tar flera dagar.

Det antas vidare att en partiell avstängning ger en försening på 10 minuter och en hel avstängning på 20 minuter per fordon under den tid underhållet pågår.

Tidsåtgång för inspektion och underhållsåtgärder är skattade av projektets referensgrupp.

4. RESULTAT OCH ANALYS

4.1. Inledning

I det följande kapitlet redovisas resultat från de olika LCC-beräkningarna. Resultaten redovisas med ett grundalternativ och därefter varianter på detta. Grundalternativet är det som bedöms i denna studie som det mest relevanta och övriga alternativ redovisas som underlag för en känslighetsbedömning av resultaten.

Resultaten redovisas i diagram där alternativ jämförs. I Bilaga 2 redovisas samtliga beräknade resultat också i tabeller där de modellerade kostnaderna framgår.

Som kommer att framgå i texten under avsnitt 4.2 så är skillnaderna i kostnad mellan de olika tunnelmiljöerna små. Därför kommer jämförelserna i vissa fall endast göras för Tunnelmiljö A.

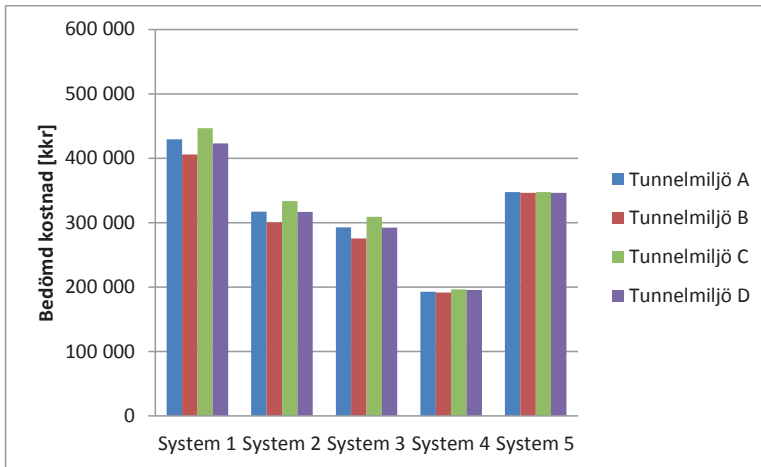
I analysen som görs åtskillnad på stor respektive liten trafikpåverkan. Med detta avses de två trafiksituationer som visas i Tabell 17 och avser kostnader för samhället pga restidsförlängning. I fallet med stor trafikpåverkan är det en högtrafikerad tunnel och i fallet med liten ett fall där inga kostnader uppstår.

4.2. Redovisning av grundalternativ

Nedan i Figur 17-21 redovisas grundalternativen. Grundalternativ är de som beräknas för respektive utgående från en kalkylränta på 3,5% och med stor trafikpåverkan. Det förutsätts vidare att inspektion och underhåll utförs nattetid eller vid tillfällena med låg trafikintensitet. Figurerna redovisar bedömda kostnader för systemen i respektive tunnelmiljö A-D och bedömda kostnader inkluderar investering och framtida kostnader, dvs LCC-kostnaden.

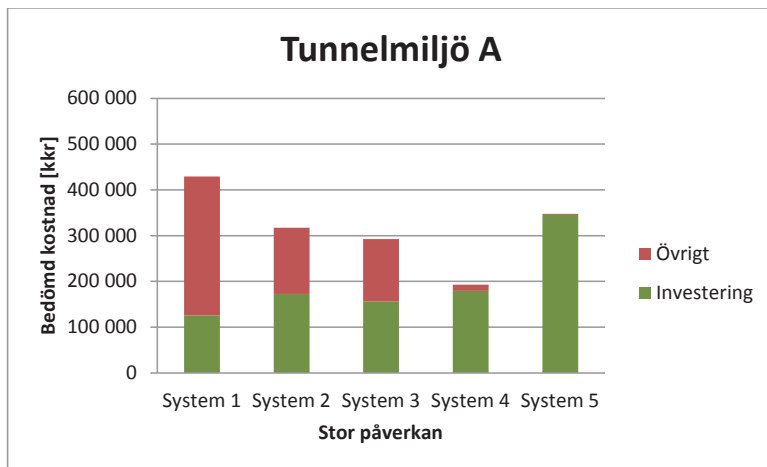
Det är en viss skillnad mellan olika tunnelmiljöer vilket framkommer av Figur 17, där systemen jämförs i olika Tunnelmiljöer. De skillnader i mängder som uppkommit pga av olika behov av bergförstärkning och injektering slår igenom på totalkostnaden men skillnaden är relativt liten i förhållande till de osäkerheter som råder. Störst skillnader noteras i System 1-3 och System 4 och 5 är mycket lika i de olika tunnelmiljöerna. Totalt sett är dock skillnaden mellan de olika tunnelmiljöerna mycket liten, i storleksordningen 5%.

Det är en stor skillnad i uppskattad total kostnad mellan systemen i respektive tunnelmiljö där System 1 i samtliga fall har en den högsta LCC-kostnaden och System 4 den lägsta, vilket framgår av Figur 17. Skillnaden mellan högst och lägst kostnad är i storleksordningen 60%.



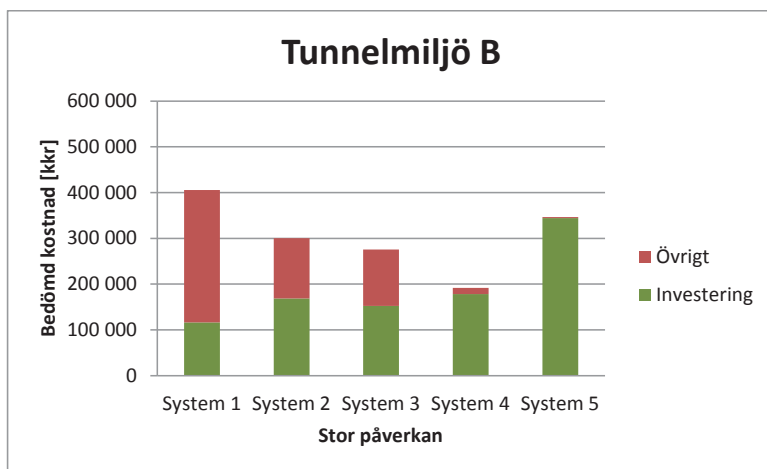
Figur 17 Jämförelse av LCC-kostnaden för systemen i olika tunnelmiljöer
 Figure 17 Comparison of LCC cost for each system in different tunnel environments

I figur 18-21 så redovisas dels investeringskostnaden, dels övriga kostnader, för respektive tunnelmiljö. Övriga kostnader inkluderar kostnader för inspektioner, underhåll, jourarbeten och ersättning av system, samt även samhällskostnader för dessa insatser. Högst total kostnad har System 1 och investeringskostnaden är endast ca 25% av total kostnaden, 75% bedöms uppkomma senare. Detta visar att lägst investeringskostnad kan vara en suboptimering av LCC-kostnaden. I system 4 och 5 är i princip hela kostnaden investeringskostnad.



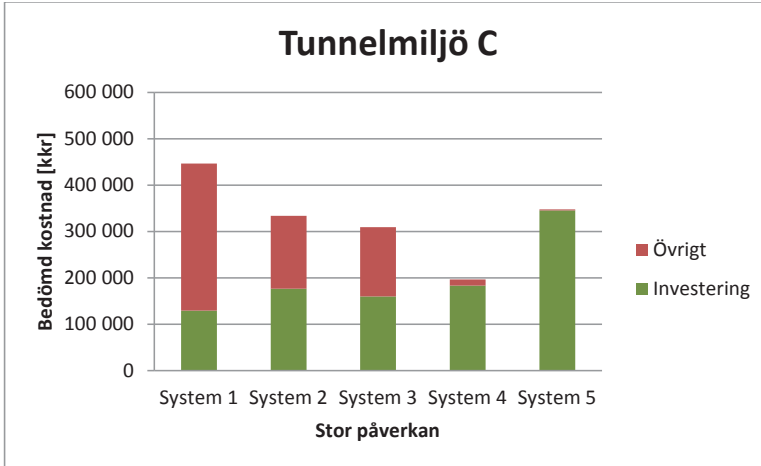
Figur 18 Bedömda LCC-kostnader för de olika systemen i Tunnelmiljö A

Figure 18 Estimated LCC cost for the different system in Tunnel Environment A

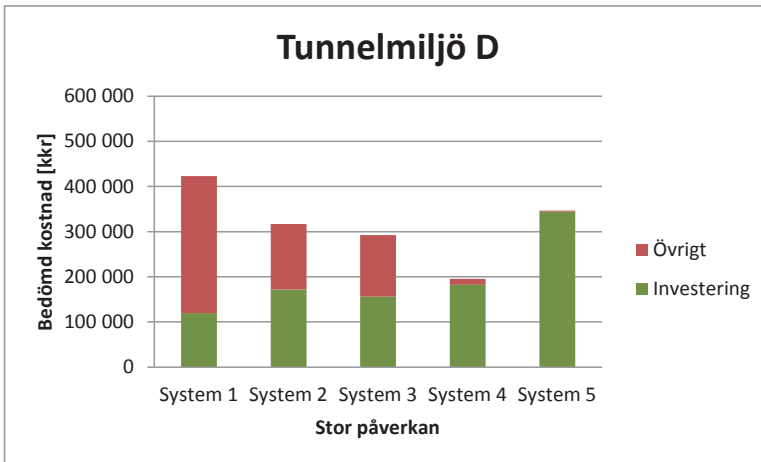


Figur 19 Bedömda LCC-kostnader för de olika systemen i Tunnelmiljö B

Figure 19 Estimated LCC cost for the different system in Tunnel Environment B



Figur 20 Bedömda LCC-kostnader för de olika systemen i Tunnelmiljö C
 Figure 20 Estimated LCC cost for the different system in Tunnel Environment C



Figur 21 Bedömda LCC-kostnader för de olika systemen i Tunnelmiljö D
 Figure 21 Estimated LCC cost for the different system in Tunnel Environment D

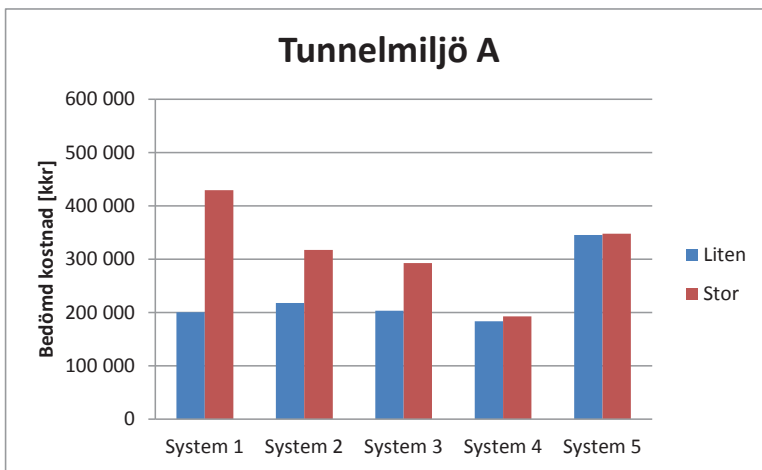
4.3. Redovisning av jämförelsealternativ

4.3.1. Alternativ med liten trafikpåverkan

Betydelsen av en stor eller liten trafikpåverkan redovisas i Figur 22 för tunnelmiljö A. Eftersom skillnaderna mellan olika tunnelmiljöer är så begränsad (se Figur 17) redovisas bara tunnelmiljö A och övriga tunnelmiljöer uppvisar samma mönster.

Det framgår av figuren att effekten av trafikpåverkan får en stor påverkan på LCC-kostnaden i System 1, 2 och 3 men mindre betydelse i System 4 och 5. Det framgår vidare att lägst totalkostnad kan bli olika för olika bedömningar på trafikverkan och att denna fråga på så vis kan vara systemstyrande.

Totalt erhålls resultatet att System 1-4 är relativt lika avseende LCC-kostnaden i de fall där inte kostnader för trafikpåverkan inkluderas.



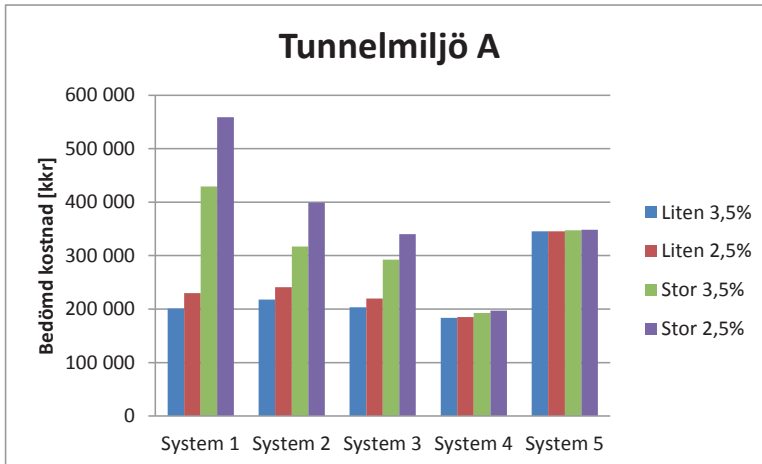
Figur 22 Beräknad LCC-kostnad i fall med stor respektive lite trafikpåverkan

Figure 22 Calculated LCC cost in case with large and small effect on traffic

4.3.2. Alternativ med lägre kalkylränta

Kalkylräntan påverkar bara direkta och diskonterade kostnader, dvs i detta fall kostnader för underhåll. Bedömd LCC-kostnad i fall med kalkylränta 3,5% respektive 2,5% framgår av Figur 23.

Det framgår av resultaten att en lägre kalkylränta ökar den uppskattade LCC-kostnaden vilket är enligt förväntat. Effekten slår igenom i de fall som har underhållskostnader och därför blir det ingen egentlig skillnad i System 4 respektive System 5 då dessa i princip inte har några underhållskostnader.



Figur 23 Bedömd LCC-kostnad i Tunnelmiljö A i fall med 3,5% och 2,5% kalkylränta för fall med stor och liten trafikpåverkan

Figure 23 Calculated LCC cost in Tunnel Environment A with 3.5% and 2.5% rate of interest in cases with large and small effect on traffic

4.4. Känslighetsanalys underhåll

En faktor som slår igenom betydande på LCC-kostnaden är underhåll och effekt av underhåll. Det är samtidigt något som är svårt att bedöma hur stor mängden underhåll blir i de olika systemen.

I det följande görs en känslighetsstudie där mängden underhåll ökas och livslängden för vattenavledningen minskar i förhållande till grundalternativen. Utgångspunkten är att mängden underhåll är rätt bedömd relativt mellan systemen men att den totala mängden underhåll kan variera. Det krävs dock anpassningar i förhållande till detta. Texten nedan redovisar vilka ändringar som gjorts och sammanfattas i tabell 18.

Livslängden för system 1 minskar med 20%. För system 2 minskar livslängden med ca 30%. System 3 är oprövat men uppges ha en livslängd på 120 år. Det bedöms genomförbart att byta system för vattenavledning om det efter ett antal år skulle sluta

fungera tillfredställande. För känslighetsstudien påförs därför ett byte av system efter 60 år. För system 4 och 5 är livslängden satt till 120 år och det förutsätts att byte av vattenavledningssystem inte kommer att kunna ske.

För system 1-3 påförs en generell ökning om 30% för underhåll av dräner och jourarbeten. Eftersom ingen justering av livslängden utförs för system 4 förutsätts istället att man får ett ytterligare utökat underhåll gentemot ökningen för system 1-3. För system 5 som är odränerad och där underhåll av dräner i grundalternativet ej utförs förutsätts istället att man efter 60 år får utföra underhåll av tätningen motsvarande en viss del av tunnelsträckan per år.

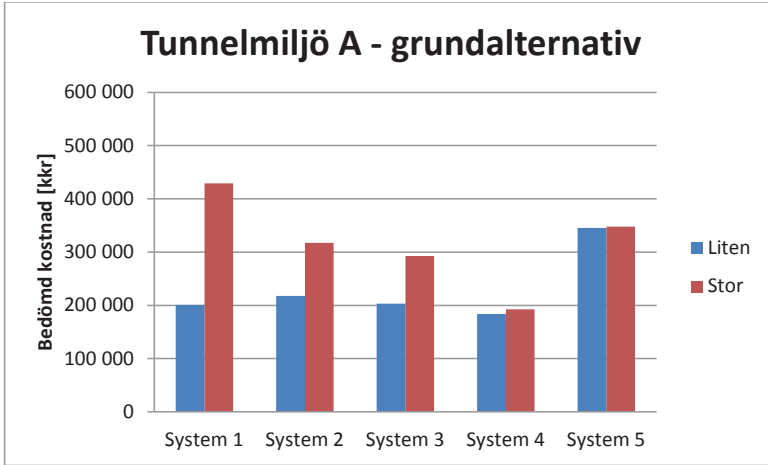
Tabell 18 Justerade parametrar för underhåll av dräner och jourarbeten, samt justerad livslängd för vattenavledning. *För system 5 påförs en viss mängd underhåll av tätningen efter 60 år

Table 18 Adjusted parameters in a sensitivity analysis on amount of maintenance

System	Ökning underhåll dräner	Ökning jourarbeten	Livslängd (Livslängd grundalternativ)
System 1	30 %	30 %	24 år (30 år)
System 2	30 %	30 %	40 år (60 år)
System 3	30 %	30 %	60 år (120 år)
System 4	40 %	40 %	Ingen justering (120 år)
System 5	*	-	Ingen justering (120 år)

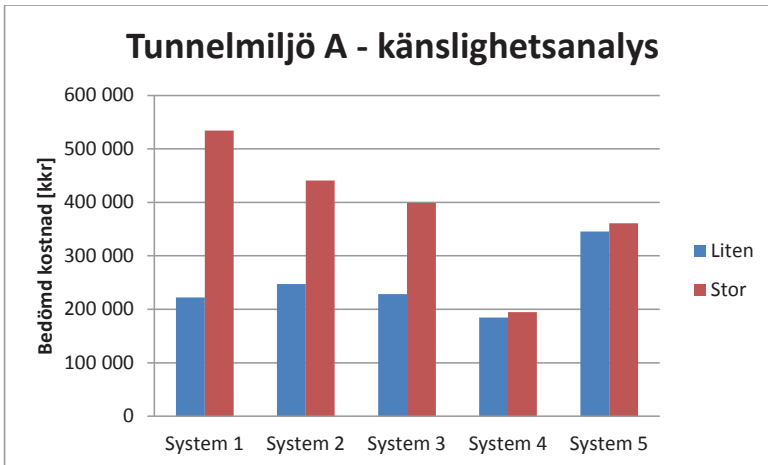
Det är en påtaglig skillnad i LCC-kostnad för system 1-3 vid stor påverkan, medan det vid liten påverkan är marginella förändringar för system 4 och 5 vilket framgår av Figur 24 och Figur 25. Figur 24 visar LCC-kostnaden för tunnelmiljö A för grundalternativet och Figur 25 motsvarande alternativ från känslighetsanalysen. LCC-kostnaden för en tunnel i stadsmiljö är alltså betydligt känsligare för mängden framtida underhåll för system 1-3, medan system 4 och 5 förefaller vara i princip okänsliga.

Värt att notera är även en betydande skillnad i LCC-kostnad för system 1 mellan en tunnel med liten påverkan och kalkylränta på 3,5%, jämfört med en tunnel med stor påverkan och kalkylränta på 2,5% vilket framgår av Figur 26 och Figur 27. Det framgår också tydligt hur okänsligt system 4 och 5 är i jämförelse med system 1-3.



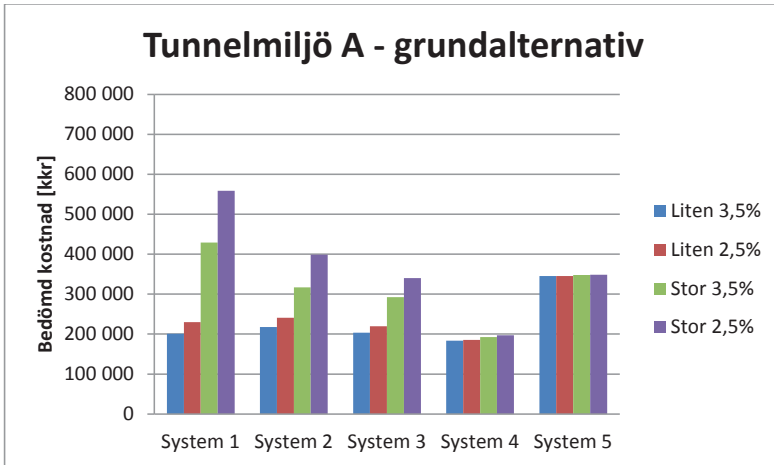
Figur 24 LCC-kostnader i Tunnelmiljö A i grundalternativen vid stor och liten trafikpåverkan

Figure 24 Calculated LCC cost in Tunnel Environment A in the basic case with small and large traffic effect



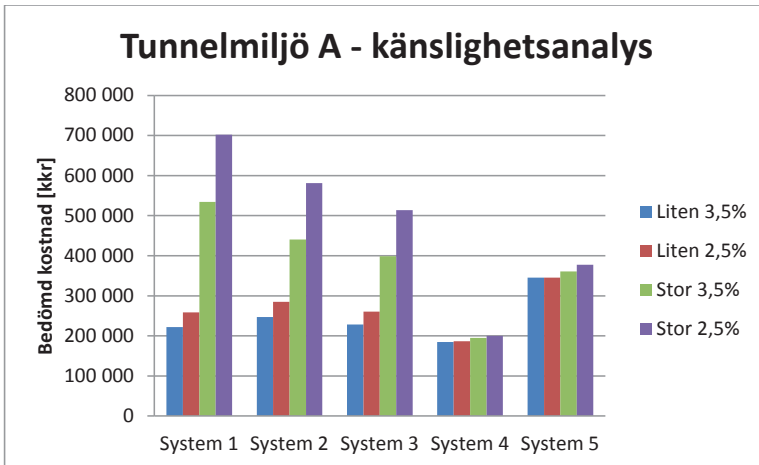
Figur 25 LCC-kostnader i Tunnelmiljö A i känslighetsanalysen vid stor och liten trafikpåverkan

Figure 25 Calculated LCC cost in Tunnel Environment A in the sensitivity analyses with small and large traffic effect



Figur 26 Beräknad LCC- kostnad i Tunnelmiljö A från grundalternativ visande kalkylräntans och samhällskostnadens inverkan

Figure 26 Calculated LCC cost in the basic cases with different rate of interest and with small and large effect on traffic



Figur 27 Beräknad LCC-kostnad i Tunnelmiljö A från känslighetsanalys visande kalkylräntans och samhällskostnadens inverkan

Figure 27 Calculated LCC cost in the sensitivity analyses with different rate of interest and with small and large effect on traffic

5. DISKUSSION

5.1. Betydande faktorer

Analyserna som redovisades i kapitel 4 visar på relativt stora skillnader i LCC-kostnader mellan de olika tekniska systemen och stor påverkan av osäkra parametrar.

Man kan konstatera från det modellerade materialet att skillnaderna mellan tekniska system förefaller större än skillnaderna är mellan olika tunnelmiljöer, dvs en detaljerad förundersökning är inte avgörande för val av tekniskt system enligt resultaten utan val av tekniskt system bör kunna göras tidigt i processen för de flesta tunnelmiljöer.

Det som tycks ha stor påverkan på resultaten är följande (förutom investeringskostnaden):

- Bedömd mängd drift- och underhållsåtgärder samt livslängd
- Kalkylräntan
- Om samhällsliga kostnader för påverkan på trafiksituation inkluderas eller ej.

Dessa tre bör därför bedömas i samband med en LCC-analys. Kalkylräntan och den samhällsliga kostnaden för påverkan på trafiksituationen får betydelse i de fall en stor mängd drift- och underhållsåtgärder förväntas. Mängden drift- och underhållsåtgärder är svårt att uppskatta och känslighetsanalyser samt risk- och felträdsanalyser kan därför krävas. Till exempel kan det vara svårt att direkt bedöma indirekta kostnader för trafikpåverkan utan att studera möjligheterna till omläggning av trafiken och göra trafikflödesbedömningar, speciellt i storstäderna. Här finns också en osäkerhet utifrån kommande investering i ny transportinfrastruktur och i bedömd framtida trafikmängd. Ett exempel är hur projekt Förbifart Stockholm i detta perspektiv kommer att påverka trafiksituationen i och omkring Stockholm.

Kalkylräntan är en osäkerhetsparameter och man kan säga att det är omöjligt att i förväg veta vad som är "rätt" kalkylränta. Kalkylräntan slår kraftigt mot bedömd LCC-kostnad i system med stort underhåll och påverkar inte alls i system utan egentligt underhåll. Val av kalkylränta i analyserna kan vara systemstyrande.

För att välja system med hänsyn till behov av underhåll bedöms det att detta behöver förenklas. Det är mycket komplicerat eller kanske till och med omöjligt att försöka skatta underhållsbehovet för ett visst system i en viss tunnelmiljö, speciellt om systemet är ett nytt system där erfarenhet saknas av underhållsbehov. Möjligen kan istället system klassas med hänsyn till underhåll, exempelvis litet, medel eller stort

underhåll för att förenkla. Detta kanske i all mening inte skulle bli rätt men fördelen kan vara att det understödjer den kreativa process som LCC-studien bör vara (Mattsson & Stille, 2010).

Utöver de ovan nämnda aspekterna så visar känslighetsanalysen av mängden underhåll att denna faktor kan vara betydande om en felbedömning görs. Eftersom system 2 och 3 är mindre beprövade än framförallt system 1 är dessa mer osäkra med avseende på mängden underhåll och deras faktiska tekniska livslängd. I samband med systemval bör därför göras en mer noggrann genomgång av vilket underhåll och teknisk livslängd som bedöms i det enskilda fallet. En metodik för inspektion av tunnlar utformad baserad på felträdsanalyser presenteras i Fredriksson et al (1997) med målsättningen att minimera tiden för underhåll och oplanerade insatser. Denna eller liknande metodik kan ligga till grund för en detaljerad uppskattning av underhållsbehov etc. i de fall erfarenhetsdata saknas.

5.2. Förslag på metodik för LCC-analyser

Egentligen önskas en enkel modell som kräver enkla ingångsvärden som underlag inför val av ett system. LCC-analyser baserade på nuvärdesmetoden är svåra och baserat på stora osäkerheter. Att analysen är komplicerad kan göra att den helt enkelt inte görs. Osäkerheterna kan göra att analysen blir subjektiv.

Mot bakgrund i det processflöde som rekommenderas i Langdon (2007) och som beskrevs i Kapitel 2 samt den rekommendation som ges Mattsson & Stille (2010) tillsammans med de resultat som framkommit i denna studie, föreslås följande som preliminär modell för LCC-studier. Den behöver vidarebearbetas men är en intressant idé utifrån de slutsatser som framkommer i denna studie.

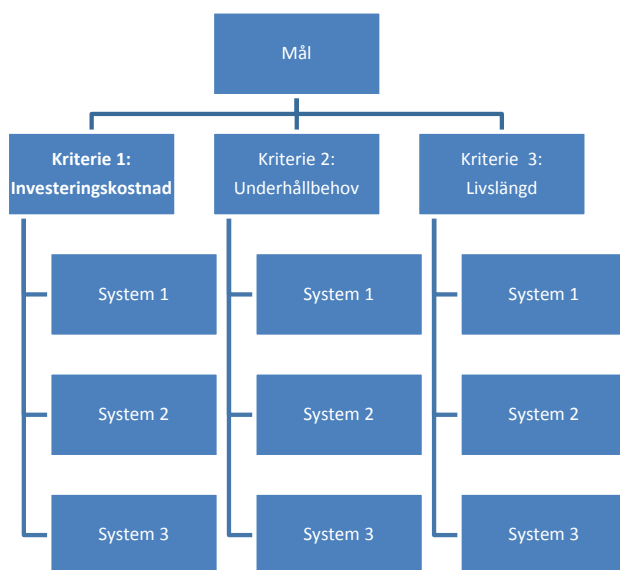
Eftersom val av tekniskt system egentligen är ett beslut föreslås uppbyggnaden av en metodik baseras på AHP (Analytic Hierarchy Process) som är en möjlig metod för beslutsfattande. Metodiken möjliggör olika grad av informationsinnehåll. I princip kan val av system baseras på en expertgrupps bedömning med det går lika väl att göra bedömning på siffror från offertunderlag eller liknande.

Figur 28 illustrerar hur en AHP-analys för vattenavledning och förstärkningssystem principiellt kan vara uppbyggd. Detta är bara en tentativ uppbyggnad och det behöver utredas mer på vilka grunder en struktur kan byggas upp.

AHP-analysens tillämpning är att värdera olika kriterier mot varandra. Beroende på var en tunnel ska byggas och om det är en järnvägs- eller vägtunnel etc., kan vikten hos

olika kriterier alterneras. I förhållande till Langdon (2007) och Mattsson och Stille (2010) erbjuder en AHP-analys eller alternativa beslutsteorier det underlag för tillämpning som efterfrågas. I förhållande till resultaten i denna rapport kan nämnas följande som skäl till en AHP-analys.

- Kräver inte mycket detaljerad information om de tekniska systemen utan i princip bara relativa jämförelser.
- Kräver inte kunskap om kalkylränta samt expertkunskap i LCC-analyser utan kan göras av mer tekniskt orienterad personal.



Figur 28 Illustration av en möjlig AHP-struktur för val av tekniskt system

Figure 28 *Illustration of a possible structure for an AHP analysis to select system for reinforcement and drainage*

6. SLUTSATSER OCH FÖRSLAG PÅ FORTSATT ARBETE

6.1. Behövs LCC-analyser för att välja rätt system?

Med rätt system avses här det system som uppfyller funktionskraven till lägst kostnad under sin livslängd.

Studien visar att:

- LCC-analyser (Livscykelkostnadsanalyser) bör användas som verktyg för att bedöma alternativa lösningar på vattenavlednings- och förstärkningssystem i tunnlar utifrån ett totalkostnadsperspektiv.
- Slutsatsen är att den totala kostnaden för olika system påverkas betydligt av framtida kostnader och att en LCC-analys därför bör tillämpas. Att välja system uteslutande baserat på investeringskostnaden kan leda till en suboptimering med hänsyn till den totala kostnaden och kostnader för systemets hela livslängd bör beaktas.

Som framgått av analyserna så blir System 4 mycket konkurrenskraftigt. Vi vill dock inte göra den bedömning att detta gäller generellt ute i projekten utan rekommenderar en specifik bedömning för varje projekt. Det kan finnas skäl och förutsättningar som inte omfattas av denna rapport som kan ge anledning att välja andra system.

6.2. Vad är viktigt i LCC-analysen?

LCC-analyser baserade på nuvärdesmetoden bygger på kunskap om investeringskostnader, drift och underhållskostnader samt en kalkylränta för diskontering av de framtida kostnaderna. Förutom dessa bör även indirekta kostnader beaktas eftersom dessa påverkar samhällsekonomin.

Studien visar att framtida kostnader kan vara systemstyrande och att man därför behöver beakta dessa. Framtida kostnader är mer osäkra än investeringskostnaderna och därför studeras med ett större osäkerhetsintervall. En känslighetsstudie på mängden underhåll visar i denna studie att inom ett rätt litet osäkerhetsintervall (+30%) är mängden underhåll styrande för lägst beräknad LCC-kostnad.

Indirekta kostnader kan bli betydande vilket motiverar att i tunnlar med hög trafik och där en omläggning av trafiken får effekt på restid etc., så bör ett system som innebär lite underhåll och åtgärder väljas. I det omvända fallet, när trafiken är begränsad och

omläggning kan göras utan för stor påverkan, blir de indirekta kostnaderna små och påverkar LCC-kostnaden lite.

Kostnader för framtida underhåll riskerar att uppskattas fel pga. av en felaktig kalkylränta. Eftersom kalkylräntan endast är en prognos bedöms det att inte alltför stort fokus ska läggas på diskontering av kostnader. Istället bör underhållsbehov i förhållande till påverkan på trafik beaktas då denna effekt i analysen kan ha ett större ekonomiskt värde.

Studien visar på liten skillnad mellan system för de fall på tunnelmiljöer som studerats. Därmed är det möjligt att val av system kan göras tidigt i planeringsprocessen vilket kan ge underlag till tidiga kalkyler både på anläggningskostnad och framtida driftskostnader utan detaljerad kunskap om mark och bergförhållanden.

6.3. Huvudsakliga osäkerheter i föreliggande studie

Uppgifter runt System 2, och i synnerhet System 3, känns osäkra i förhållande till övriga system. System 2 har inte prövats någon längre tid och System 3 är i princip oprövat i Sverige, vilket gör att bedömningar av ingående värden inte har stor erfarenhetsbas. En djupare bedömning av underhållsbehov och andra påverkande faktorer bör ingå i en bedömning i ett skarpt fall.

Dimensioneringen av system 4 och 5 utfördes lite rudimentärt baserat på två projekt i denna studie. Det är möjligt att kostnaderna för dessa system under- eller överskattats.

En sista aspekt är tunnellängden. I studien har en tunnel på 1000 m studerats för att få en relation för hur lång tid en tunnel kan vara avstängd och därmed hur underhållskostnader påverkas. Det framgår dock inte hur känslig den parametern är. I förhållande till framtida kostnader så har dock tunnellängden en betydelse och även andra faktorer som tillgång till servicetunnlar etc.

6.4. Förslag till fortsatt arbete

Avseende fortsatt arbete så rekommenderas en bredare bedömning av underhåll i tunnlar än avseende förstärkning och vattenavledning. Förvisso är dessa betydande system men underhåll görs även av andra system och det rekommenderas en övergripande studie av tunnelunderhåll som tar in alla tekniska system, el, kommunikation mm och även behov av tvätt etc. Med en sån studie tillgänglig går det

bättre att bedöma betydelsen av underhåll på förstärkning- och vattenavledningssystem.

Det rekommenderas vidare att ta fram en enkel och tillämpbar modell för bedömning av systemval på projektnivå. Att tillämpa en LCC-analys baserat på nuvärdesmetoden blir komplicerat då många osäkra och i viss mån subjektiva steg krävs. Som alternativ till LCC-modell föreslås att arbeta vidare på underlag i denna rapport och utifrån en AHP-struktur (Analytic Hierarchy Process) ta fram en beslutsmodell för inriktning på systemval som inkluderar livscykelkostnaden.

Föreliggande studie visar inte på betydande skillnader mellan olika tunnelmiljöer. Det finns dock vissa skillnader och dessa bör öka om ett bredare spektrum på tunnelmiljöer studeras. För vidare bedömning av systemval är det fördelaktigt med detaljerad dokumentation och uppföljning på vilket underhåll som görs i olika tunnlar, och i delar av tunnlar med speciella förhållanden. Det rekommenderas vidare studier på hur tunnelmiljön påverkar behovet av underhåll. Som exempel på detta har det inte studerats här vilken effekt kontinuerlig infiltration har på LCC-kostnaden i de fall sättningskänsliga jordlager överlagrar tunneln.

ERKÄNNANDEN

Studien har utförts med ett aktivt deltagande av referensgruppen som bidragit med sina kunskaper om de olika systemens uppbyggnad, kostnader och underhållsbehov. Referensgruppen bidrag uppskattas stort. I referensgruppen har deltagit Per Tengborg BeFo, Anders Fredriksson på Sweco, Tommy Ellison på Besab samt Thomas Dalmalm, Per Thunstedt och Fredrik Brynielsson från Trafikverket. Värdefull input har därtill erhållits av:

- Skanska och Robert Sturk från Projekt E6 Pålen-Tanumshede
- Fellesprojektet E6 Dovrebanan och Jan Ausland på Jernbaneverket Norge
- Elisabeth Olsson och Thomas Andersson på Ramböll Sverige AB för input om inspektioner av tunnlar.

REFERENSER

- Almfeldt, S. (2012): Modelling life time costs of maintenance in hard rock tunnels – Using spreadsheet as a modeling tool. Examensarbete 2012:134, Inst. För bygg- och miljöteknik, Chalmers.
- Andrén, A. (2009): Degradation of Rock and Shotcrete Due to Ice Pressure and Frost Shattering. Licentiate thesis, Dep of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå tekniska universitet. ISSN: 1402-1757.
- Andrén, A., Eriksson, M., Wilén, P. (2008). Hantering av vatten i tunnlar – problem och möjligheter. Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm 2008. ISSN 0281-4714. Pp 111-120.
- Ansell, A., Holmgren, J., Mundt, E., Silfwerbrand, J., Stille, H., Sundquist, H. (2006): Drift, underhåll och reparation av trafiktunnlar – State-of-the-art och förslag till forskningsprojekt. Rapport 110, Bygghälsa, Brobyggnad, KTH, 2006. ISSN 1103-4289.
- ASEK 5 (2012): ASEK – arbetsgruppen för samhällsekonomiska kalkyl- och analysmetoder inom transportområdet. Rapporter tillgängliga via www.trafikverket.se.
- Boverket (2008): Livscykeekonomi vid planering, byggande och förvaltning. Ej publicerad rapport men tillgänglig på www.byggherre.se
- Eriksson, M. Stille, H. (2005). Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo Rapport 22. ISBN 91-631-6632-1.
- Fredriksson, A., Johansson, K-Å, Johansson, J., Olsson, L. (1997). Bergunderhåll i Ringens trafiktunnlar. Metodik för framtagande av inspektionsprogram. Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm 1997. ISSN 0281-4714. Pp 111-120.
- Fredriksson, A., Creütz, M., Hässler, L., Niland, J., Olsson, L. (2006). Citybanan i Stockholm – Vatten- och frostsäkring i spårtunnlar – LCC-analys av alternativa lösningar. T1-0903-0102-05_PM07.
- Gluch, P.; Baumann, H.: The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making. J. of Building and Environment 39 (2004) 571-580.

Hargelius, H. (2006). Dräner i tunnlar – inventering baserad på litteratur, intervjuer och fältstudier. SveBeFo Rapport 77. ISBN 91-631-6632-1.

Langdon, D. (2007): Life Cycle Costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology.
http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/construction/studies/life-cycle-costing_en.htm

Lindblom, U., Almfeldt, S. (2013): Planering av bergunderhåll med en LCC-modell. Föredrag vid Bergmekanikdag i Stockholm, 11 mars 2013. ISSN 0281-4714. Pp 107-113.

Lindblom, U., Dahlström, L-O. (2013): Life time optimization of hard rock tunnel maintainance. Proc. to the 2nd Nordic Rock Mechanics Symposium, Gothenburg, Sweden 2013. ISBN 978-91-637-4351-1. Pp 73-80.

Mattsson, H-Å, Stille, H. (2010). Drift och underhåll av tunnlar i ett livslängdsperspektiv. Föredrag på Tunnlar och berganläggningar 2010, Wennergren Center Stockholm. Presentation erhållen via e-post.

Noring, M.; Hochschorner, E.: A case study with environmental LCC in the Swedish building and construction sector. SB11 Helsinki World Sustainable Building Conference. Artikel presenterad på World Sustainable Building Conference 2011, Helsingfors.

Skoglund, A. (2012): Nyttan av LCC-analyser vid planering av underhållsarbetet i SL:s spårtunnlar. Examensarbete 345, Bygghälsa, Brobyggnad, KTH, 2012. ISSN 103-4297.

Trafikverket (2011): Trafikverkets tekniska krav Tunnel. TRV publ nr 2001:087. ISBN: 978-91-7467-155-1.

Tupamäki, O. (2008): Total LCC and Probabilistics. Proc. to the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC-2008. Pp. 500-506.

Trafikanalys (2012). Anläggningsbranschen – utveckling, marknadsstruktur och konjunkturkänslighet. PM 2012:1. Trafikanalys.

Trafikverket (2012): Introduktion till samhällsekonomisk analys – Samhällsekonomi och modeller PM 2012:01. Tillgänglig via www.trafikverket.se.

BILAGA 1 – DIMENSIONERING AV TEKNISKA SYSTEM

Allmänt

Syftet med den förenklade dimensioneringen är att ringa in bergförstärkningen så att representativa värden på t ex sprutbetongtjocklek och bulttäthet fastslås.

Noggrannheten behöver inte vara större än att systemen kan prissättas och i förlängningen jämföras med ett tillförlitligt och representativt resultat.

I detta görs därför antaganden och förenklingar som i en normal dimensioneringsprocess skulle behöva underbyggas med ytterligare beräkningar och analyser för att erhålla en såväl helt korrekt som optimal dimensionering.

För system 1-3 utförs dimensionering av sprutbetong och bergbultar med metoder angivna i Trafikverkets BVH 1585.36 "Projektering av bergtunnlar, Dimensionering av det bärande huvudsystemet".

För system 4-5 utförs erfarenhetsbaserad dimensionering genom att utgå ifrån faktiska projekt som bedöms representativa för denna studie. Att utföra en komplett dimensionering skulle bli alltför omfattande i denna studie. Dimensioneringen av system 4 baseras på Fellesprojektet E6-Dovrebanan och för system 5 har projekt E6 Pålen-Tanumshede använts.

Dimensionering av bergförstärkning för system 1-3

Dimensionering utförs med avstamp i empirisk metod angiven i BVH 1585.36, kapitel 5.8. Därefter utförs en ingenjörsmässig bedömning av resultatet och eventuella justeringar.

EKVIVALENT DIMENSION

Det fria rummet ska vara 10 meter brett. Utrymme för vattenavledning och bergförstärkning antas till ca 0,5 meter varvid den totala dimensionerande spännvidden bedöms till ca 11 meter. Med förstärkningsindex ESR satt till 1,0 (kategori E) erhålls den ekvivalenta dimensionen D_e för tak lika med 11.

Det fria rummet ska vara 5 meter högt. Med samma värde på ESR erhålls D_e för vägg lika med 5.

- D_e , tak = 11
- D_e , vägg = 5

DIMENSIONERANDE Q-VÄRDE

Två förstärkningssystem ska tas fram baserat på en bergmassa A med sämre berg och en bergmassa B med bättre berg, med bedömt Q-värde på 1 respektive 10.

Det bedömda Q-värdet för vägg ska multipliceras med en faktor 2,5 då $0,1 < Q < 10$ vilket ger dimensionerande Q-värden på 2,5 respektive 25.

Tabell 1 Dimensionerande Q-värden för tak och vägg för de två olika bergmassornas bedömda Q-värden

Table 1 Q-values in roof and wall for two different rock cases

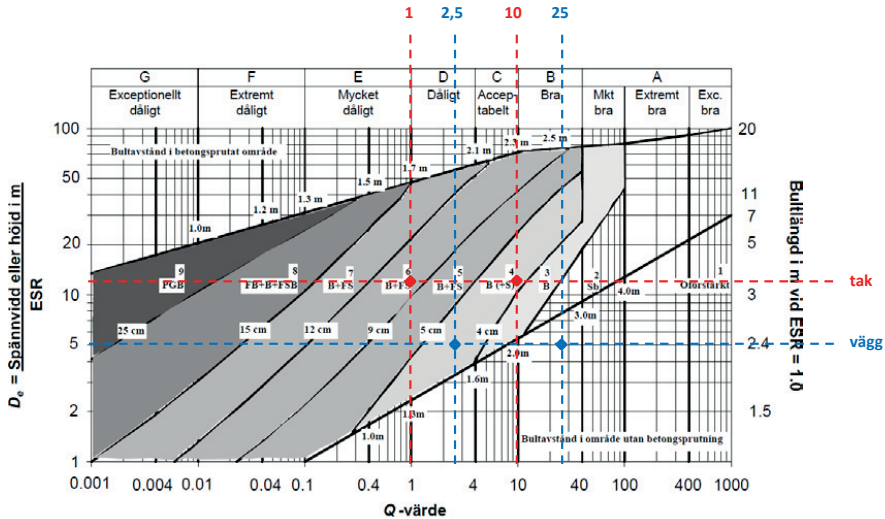
Dimensionerande Q-värden	tak	vägg
Bergmassa A, bedömt Q=1	1	2,5
Bergmassa B, bedömt Q=10	10	25

TILLÄMPNING AV Q-SYSTEMET FÖR BESTÄMNING AV FÖRSTÄRKNING

Ovan bedömda värden för D_e och dimensionerande Q-värden är inritade i förstärkningsdiagram vilket ses i figur 1. Förstärkningskategorier framgår av tabell 2.

För bergmassa A erhålls förstärkningskategori 6 och 4 för tak respektive vägg.

För bergmassa B erhålls förstärkningskategori 4 och 1 för tak respektive vägg.



Figur 1 Förstärkningsdiagram ur Q-systemet för bestämning av förstärkning. (NGI, 2013)

Figure 1 Q-diagram used in the design of the reinforcement (NGI, 2013)

Tabell 2 Aktuella förstärkningskategorier angivna i Q-förstärkningsdiagrammet
Table 2 Interpreted reinforcement class based on the Q-diagram

Kategori	Beskrivning	Förkortning
1	Oförstärkt	
4	Systematisk bultning samt oarmerad sprutbetong 40-100 mm	B (+S)
6	Systematisk bultning samt fiberarmerad sprutbetong 90-120 mm	B + FS

Interpolering i Q-förstärkningsdiagrammet ger aktuell förstärkning enligt empirisk metod. Resultatet ses i tabell 3.

Tabell 3 Aktuell förstärkning enligt empirisk design
Table 3 Obtained reinforcement need based on the empirical design approach

Bergmassa, bedömt Q	Tak			Vägg		
	bult (m)	sprutbetong (mm)	bultlängd (m)	bult (m)	sprutbetong (mm)	bultlängd (m)
A / Q=1	S 1,7	100	3,5	S 2,0	45	3,5
B / Q=10	S 2,3	40	3,5	-	-	-

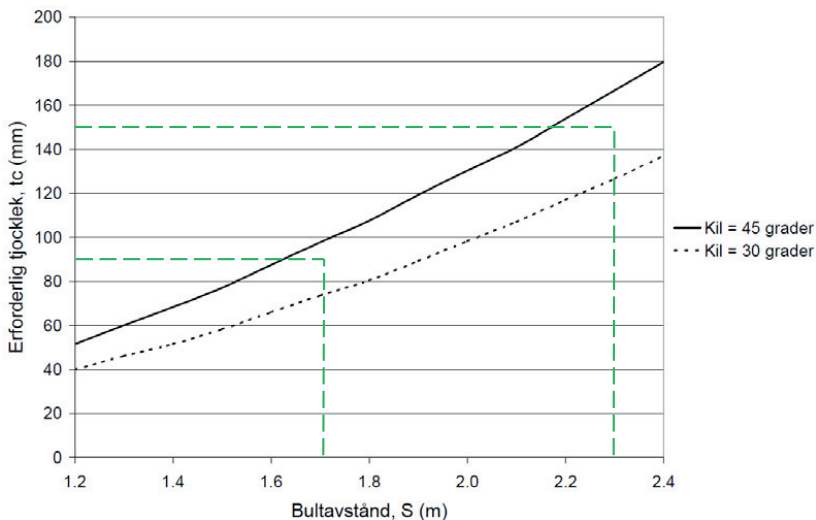
SPRUTBETONG UTAN VIDHÄFTNING

För de fall där vidhäftning mellan berg och sprutbetong ej kan tillgodoräknas utförs en analytisk studie med avstamp i BVH 1585.36, kapitel 5.10 för fallet dålig vidhäftning och böjbrott i sprutbetong.

Typexempel taget från BVH 1585.36 bedöms som rimligt för dimensionering på denna nivå. Figur 2 anger erforderlig sprutbetongtjocklek som funktion av bultavstånd.

Diagrammet är upprättat med vissa förutsättningar för bultbrickans diameter, partialkoefficienter, böjdraghållfasthet och moment. Aktuella bultavstånd och härav givna sprutbetongtjocklekar är inritade i figuren.

Aktuell sprutbetongtjocklek för de fall där vidhäftning bedöms till noll redovisas i tabell 4.



Figur 2 Erforderliga sprutbetongtjocklekar som funktion av bultavståndet i ett kvadratisk bultmönster vid momentbelastning (d v s vid noll vidhäftning) för en antagen pyramidlast med två olika vinklar på löskärnan (ur Rosengren & Chang, 2005)

Figure 2 Necessary thickness on shotcrete as a function of bolt distance with a quadratic pattern with distance S

Tabell 4 Aktuell sprutbetongtjocklek enligt typexempel analytisk metod från
BVH 1585.36

Table 4 *Calculated thickness of shotcrete based on BVH 1585.36*

Bergmassa, bedömt Q	Tak	
	bult (m)	sprutbetong (mm)
A / Q=1	S 1,7	90
B / Q=10	S 2,3	150

INGENJÖRSMÄSSIGA BEDÖMNINGAR OCH SLUTLIGT VAL AV FÖRSTÄRKNING

Dimensionerad bulttätet i tak, samt i vägg för den sämre bergmassan, bedöms rimlig. Att väggar kommer vara helt oförstärkta vid Q=10 bedöms dock inte som ett troligt scenario då någon form av selektiv bultning i princip alltid utförs. I ett försök att ansätta något som sedan ska kunna prissättas och analyseras har en fiktiv systembultning valts med bulttätet motsvarande en bult per 30 m², dvs en bulttätet på s 5,5 m.

Den teoretiska och dimensionerade bultlängden av 3,5 meter är inte en normal standardlängd. Det bedöms troligt att bultlängden i tak beroende på bergmassans kvalitet och sprickstruktur skulle variera mellan 3,0 och 4,0 meter. Bultlängden i vägg bedöms för normalfallet ligga i spannet 2,4-3,0 meter. Bedömningen är därför att bultlängder i tak och vägg ansätts till 4 meter respektive 3 meter.

Erfarenhet från tidigare utförda projekteringar av Trafikverkets tunnlar visar på att oarmerad sprutbetong normalt ej används som permanent bergförstärkning utan enbart som täckskikt utanpå den fiberarmerade sprutbetongen. Härav bedöms att all sprutbetong som utförs som bergförstärkning ska vara fiberarmerad.

I de fall ingen vidhäftning mellan berg och sprutbetong ska förutsättas blir sprutbetongtjockleken med oförändrad bulttätet kraftigt utökad från exempelvis 40 mm till 150 mm. Om bulttäteten istället minskas till s 1,6 meter så ökar sprutbetongtjockleken bara med ungefär motsvarande ett påslag till totalt ca 70 mm. Den extra mängden bult bedöms vara avsevärt billigare än vad den extra sprutbetongen är. Därav bedöms det som ett rimligt antagande att bulttäteten sätts till s 1,6 meter och sprutbetongtjockleken till 70 mm.

Tabell 5 Slutligt val av förstärkningar för system 1-3. System 2 och 3 är dimensionerade utan vidhäftning mellan berg och sprutbetong

Table 5 Final design of reinforcement for system 1-3. System 2 and 3 are designed based on the assumption of no adhesion between the rock and the shotcrete

Bergmassa, bedömt Q	Tak			Vägg		
	bult (m)	sprutbetong (mm)	bultlängd (m)	bult (m)	sprutbetong (mm)	bultlängd (m)
SYSTEM 1						
A / Q=1	S 1,7	100	4,0	S 2,0	45	3,0
B / Q=10	S 2,3	40	4,0	S 5,5	-	3,0
SYSTEM 2						
A / Q=1	S 1,7	100	4,0	S 2,0	45	3,0
B / Q=10	S 1,6	70	4,0	S 5,5	-	3,0
SYSTEM 3						
A / Q=1	S 1,7	100	4,0	S 2,0	45	3,0
B / Q=10	S 1,6	70	4,0	S 5,5	-	3,0

Dimensionering av bergförstärkning för system 4-5

System 4 är en dränerad betonginklädnad i tak och vägg med bult och sprutbetong som driftförstärkning samt dränmatta och tunnelduk som vattenavledning. Dimensionering är gjord baserad på Fellesprojektet E6 Dovrebanan.

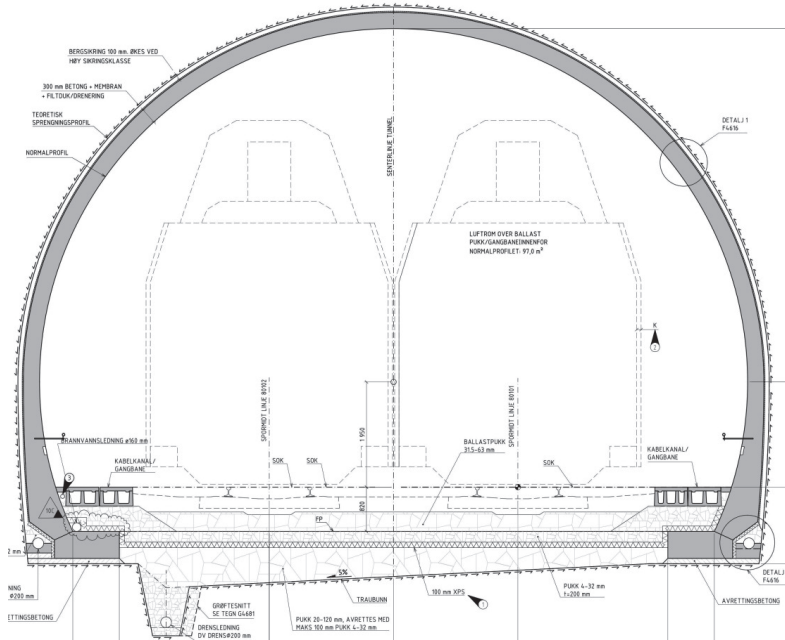
System 5 är en odränerad betonginklädnad i tak, vägg och invert med bult och sprutbetong som driftförstärkning samt dränmatta och tunnelduk som vattentätning. Dimensionering är gjord baserad på projekt E6 Pålen-Tanumshede. För detta system är vattentrycket dimensionerande.

Figur 3 visar exempel på tvärsnitt från Fellesprojektet E6 Dovrebanan.

Båda systemen har bedömts behöva en viss mängd driftförstärkning motsvarande en bulttäthet på i medeltal s 5,5 m. Därefter läggs ett lager med sprutbetong som utjämning innan dränmatta och membran monteras.

För system 4 består betonginklädnaden av oarmerad betong t=300 mm.

För system 5 består betonginklädnaden av armerad betong t=700 mm. Utrymmet mellan betonginklädnad och membran kontaktnjekteras.



Figur 3 Exempel på tvärsnitt från Fellesprojektet E6 Dovrebanan

Figure 3 Example of section with lining (from the Felles project on E6 Dovrebanan)

Design av injektering

Design av injekteringen utförs mycket förenklat baserat på erfarenhet och praxis. Utgångspunkten är att en normal injekteringsomgång ger ca 90% reduktion av inflödet (Gustafson, 2009).

Inläckaget utan injektering (q [m/s]) beräknas med ekvation 1 för respektive tunnelmiljö där K är konduktiviteten och H djupet under grundvattenytan.

$$q = K \cdot H \quad (\text{Ekvation 1})$$

Därefter beräknas ett krav på reduktion av flödet utifrån tillåtet inläckage (5 l/min/100 m) och behov av antal injekteringsomgångar beräknas. Beräkningen redovisas i Tabell 6.

För system 5, som är en vattentät betonginklädning, antas att endast 20% av sträckan behöver injekteras i byggskedet.

Tabell 6 Redovisning av beräkning på antal injekteringsomgångar
 Table 6 Estimated amount of grouting for the four tunnel environments

Tunnelmiljö	Beräknat inläckage [l/min/100m]	Beräknat krav på reduktion av inläckaget [%]	Beräknat antal injekteringsomgångar
A	60	~91%	1
B	60	~91%	1
C	180	~97%	1,8
D	180	~97%	1,8

Referenser

Rosengren, L. & Chang, Y. 2005. Citybanan i Stockholm. Riktlinjer för dimensionering av bärande huvudsystem i bergtunnlar med avseende på bärförmåga och beständighet. PM T1- 0802-0702-0107. BRÖ 03-2289/IN60. Rev B. 2005-06-02.

Banverket 2009. Projektering av bergtunnlar, Dimensionering av det bärande huvudsystemet. Handbok BVH 1585.36

Gustafson, G. 2009. Hydrogeologi för bergbyggare. Formas. ISBN 978-91-540-6029-0.

NGI. 2013. Using the Q-system, Rock mass classification and support design. Handbook

BILAGA 2 – BERÄKNADE KOSTNADER

Kalkylränta 3,5 % - (UI) och (UD) natt, (UJ) och (UE) dag

SYSTEM 1		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	125 805	116 080	129 429	119 704
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	5 216	5 216	5 216	5 216
Underhåll dräner(UD)	kr/m	55 248	41 436	69 060	55 248
Jourarbeten (UJ)	kr/m	113 109	113 109	113 109	113 109
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	129 944	129 944	129 944	129 944
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	228 567	216 988	240 146	228 567
LCC	Stor påverkan	429 322	405 785	446 758	423 221
	Liten påverkan	200 755	188 797	206 612	194 654

SYSTEM 2		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	172 642	168 392	176 530	172 280
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	13 506	13 506	13 506	13 506
Underhåll dräner(UD)	kr/m	24 944	12 472	37 416	24 944
Jourarbeten (UJ)	kr/m	34 977	34 977	34 977	34 977
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	71 154	71 154	71 154	71 154
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	99 436	87 857	111 015	99 436
LCC	Stor påverkan	317 223	300 501	333 583	316 861
	Liten påverkan	217 787	212 644	222 568	217 425

SYSTEM 3		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	156 430	152 360	160 054	155 984
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	14 961	14 961	14 961	14 961
Underhåll dräner(UD)	kr/m	51 675	38 756	64 594	51 675
Jourarbeten (UJ)	kr/m	69 606	69 606	69 606	69 606
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	89 424	77 845	101 003	89 424
LCC	Stor påverkan	292 672	275 683	309 214	292 226
	Liten påverkan	203 248	197 838	208 212	202 802

SYSTEM 4		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	179 342	178 412	183 134	182 204
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	2 215	2 215	2 215	2 215
Underhåll dräner(UD)	kr/m	9 362	9 362	9 362	9 362
Jourarbeten (UJ)	kr/m	1 740	1 740	1 740	1 740
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	8 901	8 901	8 901	8 901
LCC	Stor påverkan	192 659	191 729	196 451	195 521
	Liten påverkan	183 758	182 828	187 550	186 620

SYSTEM 5		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	345 436	344 296	345 436	344 296
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	2 215	2 215	2 215	2 215
Underhåll dräner(UD)	kr/m	0	0	0	0
Jourarbeten (UJ)	kr/m	0	0	0	0
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	2 086	2 086	2 086	2 086
LCC	Stor påverkan	347 651	346 511	347 651	346 511
	Liten påverkan	345 565	344 425	345 565	344 425

Kalkylränta 2,5 % - (UI) och (UD) natt, (UJ) och (UE) dag

SYSTEM 1		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	125 805	116 080	129 429	119 704
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	7 105	7 105	7 105	7 105
Underhåll dräner(UD)	kr/m	74 211	55 658	92 764	74 211
Jourarbeten (UJ)	kr/m	151 933	151 933	151 933	151 933
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	199 767	199 767	199 767	199 767
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	329 135	313 581	344 688	329 135
LCC	Stor påverkan	558 821	530 543	580 998	552 720
	Liten påverkan	229 686	216 962	236 310	223 585

SYSTEM 2		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	172 642	168 392	176 530	172 280
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	18 522	18 522	18 522	18 522
Underhåll dräner(UD)	kr/m	33 506	16 753	50 259	33 506
Jourarbeten (UJ)	kr/m	46 982	46 982	46 982	46 982
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	127 405	127 405	127 405	127 405
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	158 042	142 489	173 595	158 042
LCC	Stor påverkan	399 057	378 054	419 698	398 695
	Liten påverkan	241 015	235 565	246 103	240 653

SYSTEM 3		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	156 430	152 360	160 054	155 984
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	20 702	20 702	20 702	20 702
Underhåll dräner(UD)	kr/m	69 412	52 059	86 765	69 412
Jourarbeten (UJ)	kr/m	93 497	93 497	93 497	93 497
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	120 202	104 649	135 756	120 202
LCC	Stor påverkan	340 041	318 618	361 018	339 595
	Liten påverkan	219 839	213 969	225 262	219 393

SYSTEM 4		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	179 342	178 412	183 134	182 204
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	3 065	3 065	3 065	3 065
Underhåll dräner(UD)	kr/m	12 576	12 576	12 576	12 576
Jourarbeten (UJ)	kr/m	2 337	2 337	2 337	2 337
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	12 041	12 041	12 041	12 041
LCC	Stor påverkan	197 320	196 390	201 112	200 182
	Liten påverkan	185 279	184 349	189 071	188 141

SYSTEM 5		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	345 436	344 296	345 436	344 296
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	2 215	2 215	2 215	2 215
Underhåll dräner(UD)	kr/m	0	0	0	0
Jourarbeten (UJ)	kr/m	0	0	0	0
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	2 086	2 086	2 086	2 086
LCC	Stor påverkan	347 651	346 511	347 651	346 511
	Liten påverkan	345 565	344 425	345 565	344 425

Känslighetsanalys. Kalkylränta 3,5 % - (UI) och (UD) natt, (UJ) och (UE) dag

SYSTEM 1		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	125 805	116 080	129 429	119 704
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	4 908	4 908	4 908	4 908
Underhåll dräner(UD)	kr/m	71 822	53 867	89 778	71 822
Jourarbeten (UJ)	kr/m	147 042	147 042	147 042	147 042
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	184 564	184 564	184 564	184 564
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	312 193	295 117	325 222	310 169
LCC	Stor påverkan	534 141	506 461	555 721	528 040
	Liten påverkan	221 948	211 344	230 499	217 871

SYSTEM 2		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	172 642	168 392	176 530	172 280
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	13 918	13 918	13 918	13 918
Underhåll dräner(UD)	kr/m	31 997	15 998	47 995	31 997
Jourarbeten (UJ)	kr/m	44 866	44 866	44 866	44 866
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	177 340	177 340	177 340	177 340
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	193 403	178 550	208 256	193 403
LCC	Stor påverkan	440 763	420 515	460 650	440 401
	Liten påverkan	247 360	241 964	252 394	246 998

SYSTEM 3		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	156 430	152 360	160 054	155 984
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	14 519	14 519	14 519	14 519
Underhåll dräner(UD)	kr/m	67 177	50 383	83 972	67 177
Jourarbeten (UJ)	kr/m	90 487	90 487	90 487	90 487
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	70 202	70 202	70 202	70 202
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	170 216	155 163	185 269	170 216
LCC	Stor påverkan	398 815	377 951	419 233	398 369
	Liten påverkan	228 599	222 787	233 965	228 153

SYSTEM 4		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	179 342	178 412	183 134	182 204
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	2 215	2 215	2 215	2 215
Underhåll dräner(UD)	kr/m	13 107	13 107	13 107	13 107
Jourarbeten (UJ)	kr/m	244	244	244	244
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	10 335	10 335	10 335	10 335
LCC	Stor påverkan	194 908	193 978	198 700	197 770
	Liten påverkan	184 573	183 643	188 365	187 435

SYSTEM 5		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	345 436	344 296	345 436	344 296
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	2 215	2 215	2 215	2 215
Underhåll dräner(UD)	kr/m	13 082	13 082	13 082	13 082
Jourarbeten (UJ)	kr/m	0	0	0	0
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	15 128	15 128	15 128	15 128
LCC	Stor påverkan	360 733	359 593	360 733	359 593
	Liten påverkan	345 605	344 465	345 605	344 465

Känslighetsanalys. Kalkylränta 2,5 % - (UI) och (UD) natt, (UJ) och (UE) dag

SYSTEM 1		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	125 805	116 080	129 429	119 704
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	6 678	6 678	6 678	6 678
Underhåll dräner(UD)	kr/m	96 474	72 356	120 593	96 474
Jourarbeten (UJ)	kr/m	197 512	197 512	197 512	197 512
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	275 652	275 652	275 652	275 652
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	443 653	420 726	461 164	440 945
LCC	Stor påverkan	702 121	668 278	729 864	696 020
	Liten påverkan	258 468	247 552	268 700	255 075

SYSTEM 2		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	172 642	168 392	176 530	172 280
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	19 259	19 259	19 259	19 259
Underhåll dräner(UD)	kr/m	42 862	21 431	64 293	42 862
Jourarbeten (UJ)	kr/m	60 101	60 101	60 101	60 101
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	286 520	286 520	286 520	286 520
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	296 729	276 832	316 625	296 729
LCC	Stor påverkan	581 384	555 703	606 703	581 022
	Liten påverkan	284 655	278 870	290 078	284 293

SYSTEM 3		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	156 430	152 360	160 054	155 984
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	19 910	19 910	19 910	19 910
Underhåll dräner(UD)	kr/m	90 235	67 676	112 794	90 235
Jourarbeten (UJ)	kr/m	121 546	121 546	121 546	121 546
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	125 700	125 700	125 700	125 700
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	253 145	232 926	273 364	253 145
LCC	Stor påverkan	513 822	487 193	540 005	513 376
	Liten påverkan	260 677	254 267	266 641	260 231

SYSTEM 4		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	179 342	178 412	183 134	182 204
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	3 065	3 065	3 065	3 065
Underhåll dräner(UD)	kr/m	17 606	17 606	17 606	17 606
Jourarbeten (UJ)	kr/m	327	327	327	327
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	13 967	13 967	13 967	13 967
LCC	Stor påverkan	200 340	199 410	204 132	203 202
	Liten påverkan	186 374	185 444	190 166	189 236

SYSTEM 5		A	B	C	D
	enhet	kostnad	kostnad	kostnad	kostnad
Investeringskostnad (G)	kr/m	345 436	344 296	345 436	344 296
Inspektion, inkl åtgärder (UI)	kr/m	3 065	3 065	3 065	3 065
Underhåll dräner(UD)	kr/m	28 892	28 892	28 892	28 892
Jourarbeten (UJ)	kr/m	0	0	0	0
Demontering/ersättn drän (UE)	kr/m	0	0	0	0
Indirekt samhällskostnad (S)	kr/m	31 690	31 690	31 690	31 690
LCC	Stor påverkan	377 393	376 253	377 393	376 253
	Liten påverkan	345 703	344 563	345 703	344 563

BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773