



SPRUTBETONGBÅGAR – EN PRAKTIKFALLSSTUDIE

Sara Adlerborn

Catrin Edelbro

Miriam Isaksson Mettävainio

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

SPRUTBETONGBÅGAR – EN PRAKTIKFALLSSTUDIE

Shotcrete arches – a case study review

Sara Adlerborn

Catrin Edelbro

Miriam Isaksson Mettävainio

BeFo Rapport 267
Stockholm 2025
ISSN 1104-1773
ISRN BEFO-R-267-SE

FÖRORD

Sprutbetongbågens funktion bygger på att blockigt eller "löst" material över tunneln bärs i tunnelns profil och bågar användas även som stöd för spiling. Vid dimensionering av sprutbetongbågar bör man beakta avstånd mellan bågar, bergtäckning, bergmassans egenskaper, laster, förstärkningens bärförmåga samt förankringen eller upplagsreaktionen för sprutbetongbågen.

Vid dimensionering av permanent förstärkning, såsom bultning och sprutbetong, kan rådgivande dokument, exempelvis Trafikverkets projekteringshandbok för bergkonstruktioner användas. Sprutbetongbågar berörs i projekteringshandboken, men endast övergripande och i övrigt finns det inga sammanställda råd, beräkningssätt eller anvisningar inom svenskt bergbyggande för dimensionering av sprutbetongbågar; detta trots att drivning genom komplexa passager innebär en stor kostnad och ofta långa produktionstider.

Denna rapport sammanställer den idag gällande branschpraxisen kring sprutbetongbågar och arbetet har baserats på litteraturstudier, intervjuer och platsbesök. Arbetet har stöttats av bland annat Ulf Lindfors, Robert Swindell och en referensgrupp bestående av Eric Hegardt, Björn Stille, Jimmy Töyrä, Beatrice Lindström, Roger Olsson, Iad Saleh, Thomas Lechner, Fredrik Johansson och Patrik Vidstrand. Studien är samfinansierad av BeFo, Itasca Consultants AB och AFRY.

Stockholm

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

I tunnlar vid områden med låg bergtäckning eller svåra bergförhållanden behöver ofta tung bergförstärkning installeras för att säkra tunneln mot ras. Ett exempel på en sådan förstärkningsmetod är sprutbetongbågar. I dagsläget saknas sammanställda råd, beräkningsmetoder och generella anvisningar för dimensionering och byggande av sprutbetongbågar i svensk tunnelindustri trots att förstärkningsmetoden både är dyr och mycket tidskrävande.

I denna rapport har en litteraturstudie av principer för dimensionering av sprutbetongbågar sammanställts. Sammanställningen har fokuserat på att sammanfatta de riktlinjer som finns i dagsläget samt vanliga antaganden som görs vid dimensioneringsarbetet gällande exempelvis laster, funktion och beräkningsmetoder. Som komplement till litteraturstudien har även intervjuer utförts med personer i branschen med roller som beställare, projektörer eller entreprenörer för att kartlägga hur branschen i stort arbetar med dimensionering av sprutbetongbågar idag och var den allmänna bilden av det är. Intervjuerna har utförts med personer från infrastruktur- respektive gruvbranschen med varierande roller (beställare, projektörer och entreprenörer). Slutligen har även praktikfall där sprutbetongbågar använts sammanställts ur ett dimensioneringsperspektiv.

Studien påvisade att det finns stora variationer i hur dimensionering av sprutbetongbågar utförs. Applicerade lastfall bedöms och tolkas subjektivt och för en bedömning av sprutbetongbågarnas utformning arbetar vissa projektörer enbart med empiriska lösningar medan andra alltid använder sig av numeriska och analytiska beräkningar i kombination för sin dimensionering. Vid vilka markförhållanden som sprutbetongbågar rekommenderas beror till stor del på vilken projektör som utför projekteringen. Det finns i dagsläget inget flödesschema eller någon etablerad praxis för beslutsfattande gällande om, var och när sprutbetongbågar bör användas.

För själva installationen av sprutbetongbågar ser man i dagsläget att de största utmaningarna och hindren berör valvform, försämrad framdrift, kvalitet i utförandet och arbetsmiljö.

De viktigaste rekommendationerna från projektet är att man efter kartläggning och intervjuer bedömt att det finns ett behov och en önskan om framtagande av rådgivande dokument i branschen för dimensionering av sprutbetongbågar. Dokumentet bör inkludera riktlinjer för lastbedömning, kapacitetsberäkning samt kvalitetskontroll vid utförandet.

Nyckelord: Sprutbetongbågar, Projektering, Dimensionering

SUMMARY

In tunnels located in areas with low rock cover or challenging rock conditions, heavy rock reinforcement often needs to be installed to ensure the stability of the tunnel. One example of such a reinforcement method is shotcrete arches. Currently, there is a lack of compiled guidelines, calculation methods, and instructions for the design and construction of shotcrete arches in the Swedish tunnelling industry, despite the fact that this reinforcement method is expensive, time-consuming.

In this report, a literature study of design principles for shotcrete arches has been compiled. The compilation focuses on describing the current guidelines and common assumptions made during the design process, such as loads, function, and calculation methods. As a complement to the literature study, interviews were also conducted with industry professionals in roles such as clients, designers, or contractors, evaluate how the industry generally works with shotcrete arches today and the overall perception of them. Interviews were conducted with individuals from both the infrastructure and mining sectors and with various types of roles. Additionally, case studies where shotcrete arches have been used were examined.

The study revealed significant variations in how designers currently perform design of shotcrete arches. The methodology for determining applied loads varies between projects and practitioners. For the assessment of shotcrete arch design, some designers rely solely on empirical solutions, while others always use a combination of numerical and analytical calculations for their design. The conditions under which shotcrete arches are used also differs depending on the designer consulted. Currently, there is no decision making criteria or process that determines if, where, and when shotcrete arches should be used.

For the installation of shotcrete arches, the greatest challenges are currently seen in requirements for achieving arch profiles, reduced progress, execution quality, and working environment.

The key recommendations from the project concluded that the tunnelling industry sees a need for the development of guideline documents for the design of shotcrete arches. This document should include guidance regarding load assessment, calculation methods and approach and quality control during construction.

Keywords: Shotcrete arches, Design, Dimensioning.

INNEHÅLL

1	INTRODUKTION	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Metodbeskrivning och rapportutformning	2
2	NOMENKLATUR OCH RÅDGIVANDE DOKUMENT	5
2.1	Nomenklatur och begrepp	5
2.2	Rådgivande dokument	6
3	DIMENSIONERING	9
3.1	Övergripande definition och behovsbedömning	9
3.2	Verkande last	10
3.3	Beräkningsmetoder	15
3.4	Kontrollprogram	20
3.5	Dimensioneringsutmaningar	20
4	UTFÖRANDE	25
4.1	Utförande av sprutbetongbågar	25
4.2	Kvalitetskontroll	31
4.3	Produktionsutmaningar	31
5	PRAKTIKFALL	35
5.1	Introduktion	35
5.2	Förfarten Stockholm, Lovön	35
5.3	Västlänken, delprojekt Korsvägen	46
6	DISKUSSION KRING DIMENSIONERING	57
6.1	Nomenklatur och rådgivande dokument	57
6.2	Flödesschema för övergripande principer	57
6.3	Beräkningsmetoder	59
6.4	Aspekter vid val av teknisk lösning och utförande	61
6.5	Branschens syn gällande användandet av sprutbetongbågar	62
7	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	65
8	REFERENSER	67

1 INTRODUKTION

1.1 Bakgrund

När bergets bärförmåga är otillräcklig, på grund av bergmassans kvalitet och ofta i kombination med ogynnsamma geometrier och lastförutsättningar, måste en anpassad och omfattande förstärkningslösning utformas vilken kan utgöras av sprutbetongbågar. Sprutbetongbågar är en typ av aktiv förstärkning som kan ta last direkt när en rörelse sker och kan därmed användas som en tidig förstärkning; det skall dock noteras att betong normalt kräver en viss härdningstid för att kunna ta last (Komselis m.fl., 2005). Sprutbetongbågar kan därmed enskilt fungera som en temporär förstärkning för ökad säkerhet och bättre arbetsmiljö, men även ingå som en del i den permanenta systematiska förstärkningen. Sprutbetongbågar som byggs med oarmerad eller fiberarmerad sprutbetong förekommer, ofta är de också armerade med armeringsjärn.

Sprutbetongbågans funktion bygger på att blockigt eller "löst" material över tunneln bärs i tunnelns profil. Bågar kan även användas som stöd för spiling, då bågarna samverkar med spilingen längs med tunnelsträckningen. Vid dimensionering av sprutbetongbågar bör man beakta bergtäckning, bergmassans egenskaper, laster, förstärkningens bärförmåga samt förankringen eller upplagsreaktionen för sprutbetongbågen. Till detta bör även avstånd mellan bågar beaktas då avstånd mellan bågarna kan begränsa salvlängder. Vid projekteringen bör även installationen av bågarna anpassas till aktuell drivnings- och förstärkningsmetodik.

Vid dimensionering av permanent förstärkning, såsom bult och sprutbetong, kan råd och beräkningssätt användas, exempelvis projekteringshandbok för bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019). Sprutbetongbågar berörs i projekteringshandboken, men endast övergripande. I övrigt finns det idag inga sammanställda råd, beräkningssätt eller anvisningar inom svenskt bergbyggande för dimensionering av sprutbetongbågar, trots att drivning genom komplexa passager innebär en stor kostnad och kräver lång produktionstid. Projektering utförs därför ofta med varierande dimensioneringsmetoder vid olika tillfällen. För att utvärdera vald designstrategi och bågarnas funktion, verkningsätt och tillräcklighet i praktiken måste den framtagna tekniska lösningen kunna följas upp genom mätning och faktiskt utförande under konstruktionens uppförande.

Behovet av en kartläggning angående dimensionering av sprutbetongbågar har identifierats bland annat i Edelbro et al. (2023). En första sammanställning redovisas av Marklund (2022), men det krävs en mer heltäckande och omfattande nationell sammanställning av hur man arbetar med dimensionering och byggande av sprutbetongbågar.

1.2 Syfte och mål

Baserat på tidigare utförda, samt pågående, projekt där sprutbetongbågar använts ska exempel på design och erfarenhet av utförande av förstärkning med sprutbetongbågar sammanställas. Metoder, principer, ritningar, drivningsrestriktioner och praktikfall från främst Sverige men också internationellt presenteras och specificeras för funktion och verkningsätt. Praktikfall där instrumentering och mätning skett för att verifiera teknisk lösning i byggskedet presenteras. Där så är möjligt redogörs för mängder, kostnader, tid, arbetsmiljö och utförande.

Syftet med studien är att öka kunskap om metoder för dimensionering av sprutbetongbågar med fokus på bågarnas funktion och verkningsätt. Resultaten från projektet ska även ligga till grund för fortsatta studier och tillämpning av sätt att analysera, modellera och dimensionera sprutbetongbågar. Resultatet ska även kunna användas som underlag för att bedöma behov av fortsatta studier av funktion och verkningsätt av bågar kopplat till uppföljning, mätning och verifiering av den tekniska lösningen under byggskedet.

1.3 Avgränsningar

Innehållet för följande rapport avser inte att vara heltäckande för alla potentiella situationer och förutsättningar där sprutbetongbågar kan vara aktuella. Dokumentet ska inte ses som en norm eller som gränssättande vid dimensionering av sprutbetongbågar.

Definitionen av sprutbetongbågar i denna rapport avser förstärkningselement bestående av sprutbetong inklusive eventuell armering. Platsgjutna betongbågar innefattas inte i arbetet. Bågen har en begränsad utsträckning i tunnelns längdled, ofta installeras ett flertal bågar med ett visst cc-mått för att stabilisera tunneln.

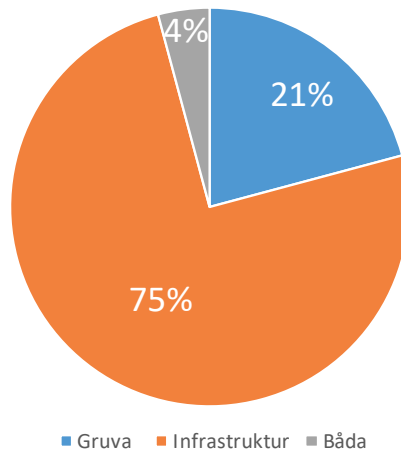
Rapporten är avgränsad till att studera hur branschen idag arbetar med dimensionering och byggande av sprutbetongbågar samt vilket underlag som utgör grund för använd dimensioneringsmetodik.

1.4 Metodbeskrivning och rapportutformning

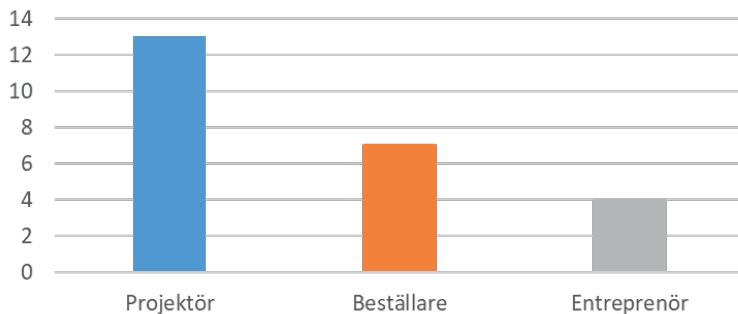
Metodiken utgår ifrån en praktikfallsstudie avseende dimensionering och byggande av sprutbetongbågar. Praktikfallstudien innefattar intervjuer med personer i branschen som arbetar med sprutbetongbågar i någon form av roll (beställare, projektör eller entreprenör) i antingen gruv- eller infrastrukturbranschen samt närmare studier av utvalda projekt där sprutbetongbågar applicerats. Intervjuerna har utgjort en viktig del av kartläggningen av branschens sätt att arbeta med sprutbetongbågar. Totalt genomfördes intervjuer med 24 personer i branschen fördelat mellan gruvindustrin och infrastrukturbranschen enligt Figur 1. Intervjuerna i sig varade mellan 1 – 1.5 timme och frågorna beskrivna i Bilaga 1 avhandlades. Då olika intervjupersoner har olika bakgrund och erfarenhet har varje enskild intervju, så som frågor anpassats efter personens förutsättningar. Målet vid urvalet av intervjupersoner var att täcka in så stora

delar av branschen som möjligt. Exempelvis valdes personer med varierande antal års erfarenhet, från olika bakgrund och från olika delar av landet för att fånga upp potentiella skillnader i hur man arbetar.

Som ovan nämnt intervjuades personer med varierande roller för deras erfarenheter gällande sprutbetongbågar, se sammanställningen för infrastrukturbranschen i Figur 2. För gruvbranschen förekommer inte samma typ av rollfördelning, de intervjuade personerna agerade i många fall som projektörer, beställde arbeten och deltog vid utföranden. Utöver intervjuerna har praktikfall där förstärkningsmetoden använts också varit en del av studien.



Figur 1. Fördelning branscherfarenhet bland intervjuade personer.



Figur 2. Fördelning antalet intervjuade personer inom infrastrukturbranschen för projektörs-, beställar- och entreprenörsroller. Vissa intervjupersoner förekommer inom två roller.

Som komplement till praktikfallsstudien har också en litteraturstudie utförts där rådgivande dokument och olika beräkningssätt som används vid designarbeten med sprutbetongbågar studerats.

2 NOMENKLATUR OCH RÅDGIVANDE DOKUMENT

2.1 Nomenklatur och begrepp

Vad som innefattas i begreppet sprutbetongbåge är inte entydigt. Efter sammanställningen av de svar som framkommit under intervjuerna förekommer följande varianter av bågar som kan hamna inom begreppet sprutbetongbåge:

- Stålfiberarmerade betongbågar – bågar som enbart utgörs av fiberarmerad sprutbetong.
- Lösjärnsarmerade bågar – bågar som utgörs av en eller två rader med lösjärnsarmering kombinerat med sprutbetong (ej fiberarmerad).
- Nätarmerad betongbåge – bågar armerade med nät som är uppbyggda likt de lösjärnsarmerade bågarna men där armeringen istället utgörs av armeringsnät.
- Bultbågar – bågar som utgörs av tätt mönster av bult, som kan vara kombinerad med fiberarmerad sprutbetong utanför.
- Gitterbågar – bågar av grövre prefabricerad armeringskorg (fackverk) som sprutas in med oarmerad sprutbetong (behandlas inte fortsatt i denna rapport då denna förstärkningsmetod inte är vanligt förekommande i Sverige samt eftersom det inte har identifierats några exempel som visar hur svenska projektörer valt att applicera dessa typer av bågar).

Gemensamt för samtliga varianter av sprutbetongbågar är att de konstrueras över hela tunneltvärsnittet och med en begränsad bredd (ca 0,5 – 1,5 m) längs med tunneln. Oftast förekommer flertalet bågar efter varandra med ett visst avstånd emellan.

Sprutbetongbågar kan utformas fristående eller så förankras sprutbetongbågarna till berget med hjälp av bultar och benämns då vara i samverkan med berget.

Några exempel på utformning av sprutbetongbågar kan ses i förstärkningskategorierna angivna i *Q*-systemet, se Figur 3 . För de olika kategorierna förekommer lösjärnsarmerade bågar med varierande tjocklek, diameter på armeringsjärnen samt antal lager armeringsjärn.

Nedan i Tabell 1 finns en översättning på de tidigare benämnda typerna av bågar på engelska. Ytterligare varianter och översättningar kan förekomma.

Support categories

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E700)+RRS I +B**
- ⑦ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Cast concrete lining, **CCA** or **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Special evaluation


Bolts spacing is mainly based on $\varnothing 20$ mm

E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete


ESR = Excavation Support Ratio

Areas with dashed lines have no empirical data

RRS - spacing related to Q-value

 **S130/6 $\varnothing 16 - \varnothing 20$ (span 10m)**

D40/6+2 $\varnothing 16-20$ (span 20m)

 **S135/6 $\varnothing 16-20$ (span 5m)**

D45/6+2 $\varnothing 16-20$ (span 10m)

D55/6+4 $\varnothing 20$ (span 20m)

 **D40/6+4 $\varnothing 16-20$ (span 5 m)**

D55/6+4 $\varnothing 20$ (span 10 m)

Special evaluation (span 20 m)

S130/6 = Single layer of 6 rebars,
30 cm thickness of sprayed concrete

D = Double layer of rebars

$\varnothing 16$ = Rebar diameter is 16 mm

c/c = RRS spacing, centre - centre

Figur 3. Förstärkningsklasser erhållna från tabeller för Q -systemet (NGI, 2015).

Tabell 1. Engelsk översättning av varianter av olika sprutbetongbågar.

Svenskt begrepp	Engelsk översättning
Stålfiberarmerad betongbåge	Steel fiber reinforced concrete arch/rib Sprayed concrete structural ring
Lösjärnsarmerad betongbåge	Reinforced ribs of sprayed concrete (RRS) Sprayed concrete structural ring Sprayed reinforced concrete with bars
Nätarmerad betongbåge	Mesh reinforced concrete arch/ribs
Bultbåge	Bolt arch
Gitterbåge	Lattice girder

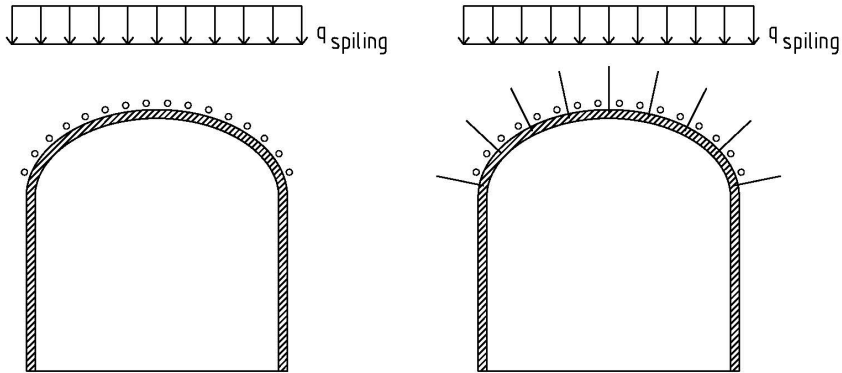
2.2 Rådgivande dokument

Enligt det rådgivande dokumentet "Projektering av bergkonstruktioner" (Trafikverket, 2019) kan sprutbetongupplag utformas som tryckt valv om kontinuerlig och jämn/rätt form kan förutsättas. Detta kräver normalt utfyllnadssprutning och att tunnelformen kan anpassas till valvlinjen (trycklinjen). Om en temporär förstärkning i form av spiling är installerad kan lasten från spilingen uppträda på delar av tvärsnittet. För sprutbetongbågar i samband med spiling bör sprutbetongbågen (även kallat sprutbetongvalvet) utföras med armerad sprutbetong och eventuellt förankras till berget.

Vid dimensionering av upplag med sprutbetongvalv skall bärighetsmodellen redovisas där följande punkter beaktas:

- Sprutbetongbågar bör dimensioneras för hela tvärsnittet, Figur 4.

- Sprutbetongbågar kan dimensioneras som "fribärande" d v s enbart med stöd från berget, alternativt som en samverkanskonstruktion mellan berg och sprutbetong.
- Dimensionering kan utföras empiriskt, analytiskt och/eller numeriskt.



Figur 4. Sprutbetongbåge med utbredd last från spiling, fribärande (vänster) och bergförankrad (höger) (Trafikverket, 2019).

Det rådgivande dokumentet "Projektering av bergkonstruktioner" (Trafikverket, 2019) presenterar inga beräkningsexempel vid dimensionering av sprutbetongbågar utan beskriver mer en metodik kortfattat. I "Tung bergsikring i undergrunnsanlegg" (Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, 2008) finns erfarenheter från dimensionering och utförande av tung bergförstärkning (förstärkningslösningar som innefattar mer än enbart bult och sprutbetong) från norska praktikfall sammanställt. Gemensamt för de båda rådgivande dokumenten är att inga beräkningsexempel anges. Exempelvis redovisar Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (2008) enbart att empiriska och/eller numeriska metoder kan appliceras vid dimensioneringsarbetet av sprutbetongbågar. Det beskrivs dock att empiriska lösningar inte får appliceras "okritiskt", men att de kan utgöra bra riktlinjer för bedömning av aktuell förstärkningsnivå.

3 DIMENSIONERING

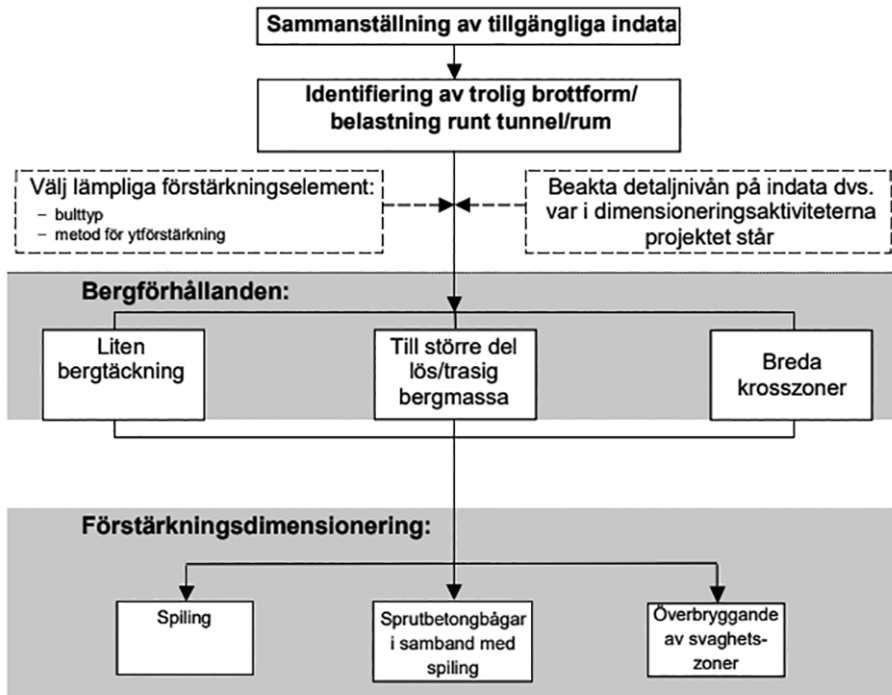
3.1 Övergripande definition och behovsbedömning

I Projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019) finns flödesschemat (resenterat i Figur 5) beskrivet där sprutbetongbågar benämns som en förstärkningsmetod för områden med någon av följande förutsättningar, (i) liten bergtäckning, (ii) till större del lös/trasig bergmassa samt (iii) för breda krosszoner.

Vid genomförda intervjuer beskriver projektörer i infrastrukturbranschen att de applicerar bågar vid liknande förutsättningar som beskrivet i stycket ovan, med viss variation i hur pass dåliga bergförhållanden skall råda för att bågar ska bedömas som nödvändiga. Vissa projektörer gör bedömningen enligt metodiken i Q -systemet (se exempelvis NGI, 2015), det vill säga utifrån spännvidd och karaterat Q -värde. Andra projektörer ser sprutbetongbågar som ett sista alternativ om inga andra lösningar ansetts vara tillräckliga. Några betonar även att sprutbetongbågar enbart bör anvisas om projektören varit på plats och sett de faktiska bergförhållandena.

I gruvbranschen beskrivs sällan att sprutbetongbågar används som planerad förstärkning utan främst vid samband med rehabiliteringsarbeten eller i vissa fall i lerområden och vid krosszoner. Samtliga av de intervjuade personerna verksamma inom gruvor var överens om att behovet av eventuella sprutbetongbågar bedöms av de geologer och ingenjörer som arbetar i produktionen.

Överlag kan man utifrån de utförda intervjuerna se att användandet av sprutbetongbågar i infrastrukturbranschen har varit relativt konsekvent eller eventuellt ökat under de senaste 20–30 åren. I gruvorna verkar utvecklingen snarare gått åt andra hållet. I dagsläget används sällan sprutbetongbågar i gruvor då de anses vara tidskrävande att installera i kombination med att de inte klarar av större dynamisk belastning lika bra som många andra förstärkningsalternativ som finns tillgängliga idag.



Figur 5. Flödesschema vid eventuell installation av sprutbetongbågar i tunnelprojekt (Trafikverket, 2019).

3.2 Verkande last

En av de största utmaningarna vid dimensionering av sprutbetongbågar är att välja tillvägagångssätt för antagande om verkande last. Exempelvis föreslår både Carranza-Torres & Diederichs (2009) samt Kaiser & Barlow (1985) följande alternativ för att beskriva last- och bärighetsmodeller:

- A. Fördelat tryck från ovanliggande material ("död last") (t.ex. Hewett och Johannesson, 1922; Terzaghi, 1946).
- B. Som A men där förstärkningen hanteras som elastiska fjädrar som belastas (t.ex. Schulze & Duddeck, 1964).
- C. Mekanisk samverkan mellan mark och förstärkning (t.ex. Einstein & Schwartz, 1979).
- D. Numerisk modellering, kontinuum- eller diskontinuum-modellering (t.ex. med finita elementmetoder eller finita differensmetoder).
- E. Konvergens och omgivande tryck (t.ex. Brown m.fl., 1983).

Samtliga av dessa metoder (bortsett från metod A) beaktar interaktionen mellan berget med förstärkning och effekten från rådande spänningar. Dock antas bergmassan vara homogen, vilket leder till en symmetrisk lastfördelning, men i verkligheten är så inte fallet. Även i många numeriska modeller görs liknande antaganden då bergmassan heterogenitet sällan modelleras. Dock kan tredimensionella numeriska modeller ta hänsyn till förändringen i lastfördelning beroende av sprutbetongbågens läge relativt till tunnelfronten.

En vanligt applicerad metod för att empiriskt bedöma laster från jord och berg är Terzaghis (1946) sammanställning där last bedöms utifrån ett antagande om att bergets karaktär delas upp i nio olika kategorier, se Figur 6 och Figur 7. Zonen som antas utgöra en belastning på sprutbetongbågen har höjden H_p (omnämns som Rock Load Factor i Figur 7) i Figur 6 och en viss skjuvhållfasthet antas motverka vikten av det lösa berget. Terzaghis teori är tillämpbar för tunnlar med bredd upp till 6 m, men används i svenska projekt för avsevärt mycket större spännvidder.

Höjden på lasten/löskärnan (i meter), H_p (för bergklasser över IV enligt Figur 7) är en funktion av tunnelns bredd och höjd och bestäms genom Ekvation [1].

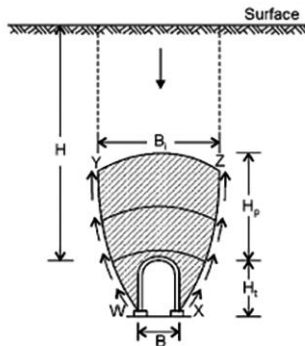
$$H_p = C \cdot (B + H_t) \quad [1]$$

där

C = en konstant som beror av bergets karaktär enligt uppdelade bergklasser,

B = bredd på tunnel och

H_t = höjd på tunnel.



Figur 6. Rekommenderade laster på lining (Terzaghi, 1946).

TABLE 5.2 Rock Load in Tunnels within Various Rock Classes

Rock class	Rock condition	Rock load factor H_p	Remarks
I	Hard and intact	Zero	Light lining required only if spalling or popping occurs.
II	Hard stratified or schistose	0 to 0.5 B	Light support mainly for protection against spalling.
III	Massive, moderately jointed	0 to 0.25 B	Load may change erratically from point to point.
IV	Moderately blocky and seamy	0.25 B to 0.35 (B + H_t)	No side pressure
V	Very blocky and seamy	(0.35 to 1.10) (B + H_t)	Little or no side pressure
VI	Completely crushed but chemically intact	1.10 (B + H_t)	Considerable side pressure. Softening effects of seepage toward bottom of tunnel requires either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs.
VII	Squeezing rock—moderate depth	(1.10 to 2.10) (B + H_t)	Heavy side pressure, invert struts required. Circular ribs are recommended.
VIII	Squeezing rock—great depth	(2.10 to 4.50) (B + H_t)	
IX	Swelling rock	Up to 250 ft. (80 m), irrespective of the value of (B + H_t)	Circular ribs are required. In extreme cases, use of yielding support recommended.

B = tunnel span in meters; H_t = height of the opening in meters; and H_p = height of the loosened rock mass above tunnel crown developing load (Figure 5.1).

Source: Terzaghi, 1946.

Figur 7. Terzaghis förslag på höjder på löskärnor baserat på bergets karaktär (Singh & Goel, 2011).

Vid valvteori och dimensionering av tunnel används begreppet pilhöjd (f) för trycklinje (se Figur 8) vilket innebär en trolig höjd på den lösa bergmassan (se rekommendationer i Projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019)). Pilhöjden motsvarar här höjden på den antagna löskärnan. Den lösa bergmassans pilhöjd baseras på bergmassans friktionsvinkel respektive spänningar i horisontal och vertikalled. Den ekvation (se nedan) som ger störst värde på pilhöjden används för att bestämma karaktäristiskt värde.

$$f = \frac{B}{2} \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad [2]$$

$$f = B \sqrt{\frac{q_v}{8q_h}} \quad [3]$$

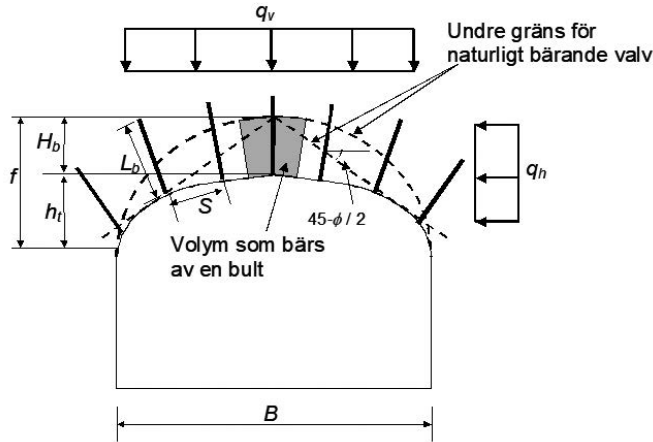
där

B = tunnelbredd,

φ = inre friktionsvinkel,

q_v = vertikal last och

q_h = horisontell last.



Figur 8. Förklarande figur över benämningen pilhöjd (f) (Trafikverket, 2019). Notera att h_t här avviker från det av Terzaghi (1946) använda h_t .

Utöver det kan även empiriska metoder användas för att bedöma lasten, P_{arch} (förstärkningstryck i MPa), på sprutbetongbågen. En sådan metod beskrivs av Grimstad m. fl. (2008) och baseras på bergmassans karterade Q -värde samt ett antal verkliga fall. Förstärkningstrycket uttrycks enligt Ekvation 4.

$$P_{arch} = \frac{2 * J_n^{1/2} * Q^{1/3}}{3 * J_r} \quad [4]$$

Där

Q = karterat Q -värde,

J_n = joint set number enligt Q-systemet, och

J_r = joint roughness number enligt Q-systemet.

För ett exempel med en bergmassa med $Q = 0,01$ ges ett förstärkningstryck i ungefärlig storlek $P \approx 1,1$ MPa för $J_r = 1,0$ och $J_n = 12$.

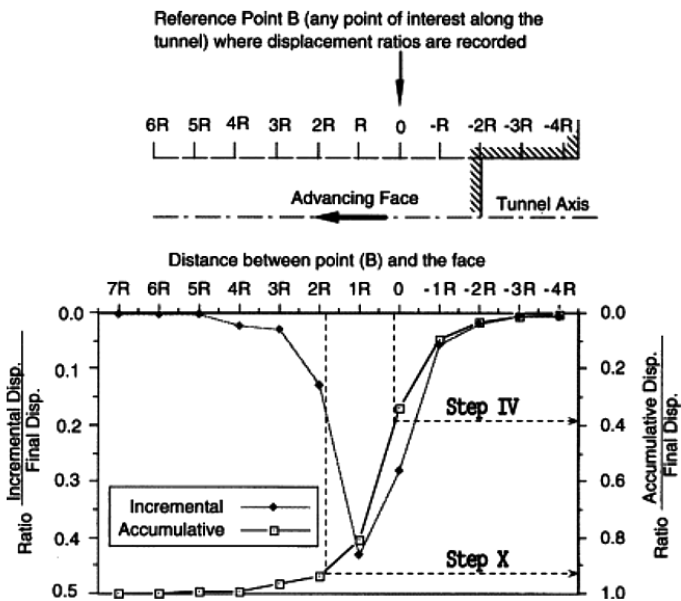
Efter en kartläggning i branschen från de utförda intervjuerna framgår att tillvägagångssätten för bedömning av last på sprutbetongbågar varierar kraftigt. Ett vanligt exempel från infrastrukturbranschen är att en "löskärna" uppskattas enligt alternativ A (som en "död last" på bågen). Hur löskärnan i fråga uppskattas varierar mellan olika projektörer, exempelvis genom:

- Uppskattning av en pilhöjd och därefter en utbredd last likt ovan beskrivet (Terzaghi, 1946).
- All tyngd från ovanliggande bergmassa beaktas som en död last.

- En uppskattning av mängden löst berg görs utifrån en numerisk analys (utifrån ett projektspecifikt kriterium).
- Lasten antas utgöras av last från exempelvis en svällande lera.
- Lastkombinationer för att studera olika scenarion.

Uppskattningen av storleken på löskärnor är i många fall konservativa. Vissa projektörer riktar kritik mot att överhuvudtaget resonera kring förekomst av en löskärna i en mindre uppsprucken bergmassa då det inte är ett förväntat beteende.

Hur stor belastningen blir på sprutbetongbågen är också påverkat av dess läge relativt stufven. I Figur 9 beskrivs relationen mellan en viss referenspunkt samt förväntade radiella deformationer för en oförstärkt tunnel i elastiska förhållanden (Hanafy & Emery, 1980). Redan en tunnelradie från stufv bedöms ungefär 80 % av rörelserna ha skett, vilket indikerar att belastningen på sprutbetongbågarna kommer variera beroende på hur pass nära stufv som installation av bågarna sker.



Figur 9. Radiell deformation i en referenspunkt (B) med respekt till tunnelns front för en tunnel utan förstärkning och under elastiska förhållanden (Hanafy & Emery, 1980).

En annan aspekt som vissa inom infrastrukturbranschen påpekar är att man i dagsläget inte hanterar dimensionering av sprutbetongbågar enligt anvisningar i Eurokod om bågen anses vara fristående. Exempelvis är det ovanligt att man i Sverige arbetar med verifiering genom analyser med olika lastkombinationer och man applicerar heller inte alltid partialkoefficienter i sina beräkningar. Hur lastkombinationerna i fråga ska

beskrivas för sprutbetongbågar är dock inte något som har beskrivits i vare sig litteratur eller intervjuer.

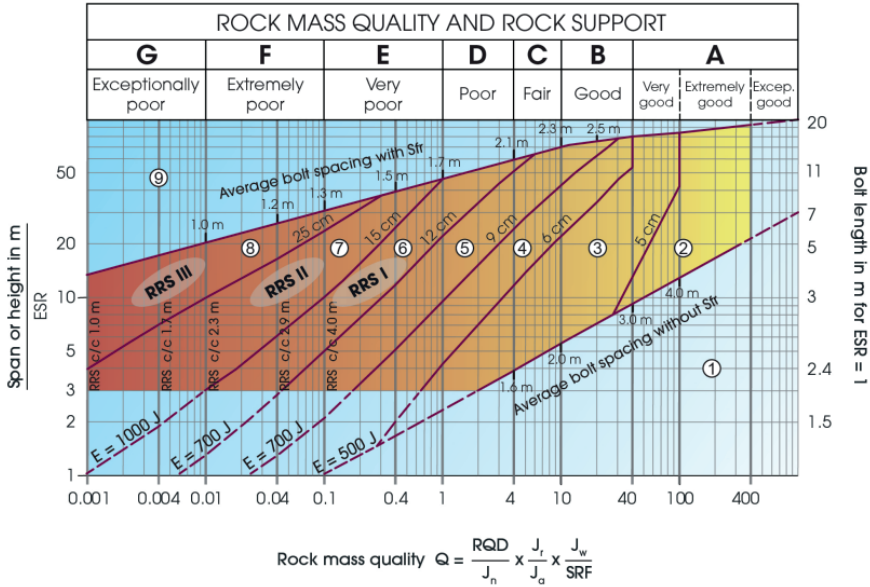
Angående bågarnas verkningsätt råder delade meningar bland de intervjuade personerna gällande huruvida lasten i fråga behöver föras ner till tunnelbotten eller inte. De flesta anser att lasten kan hanteras genom bultning av bågen för att överföra lasten till bergmassan och därmed finns inget behov av att laster i sprutbetongbågarna ska föras ner till schaktbotten. I vissa fall där bågarna erhåller önskad valvform ansågs även det vara tillräckligt för att uppta lasten.

3.3 Beräkningsmetoder

3.3.1 Empiriska metoder

Trots att det rådgivande dokumentet "Projektering av bergkonstruktioner" (Trafikverket, 2019) rekommenderar att dimensionering av sprutbetongbågar ska göras med analytiska och numeriska metoder så visade resultaten från intervjuerna att empiriska metoder använts som det enda verktyget för framtagen teknisk lösning. Oftare används dock empiriska samband och deras föreslagna förstärkningsalternativ som en grundidé för projektörer att analysera vidare. I Norge är hävdvunnen metod genom empiriskt samband den vanligaste metoden för att bedöma storlek och omfattning av sprutbetongbågar.

Den vanligaste empiriska metoden för dimensionering av sprutbetongbågar är dimensionering enligt, eller med stöd av, Q -systemet. Olika utformningar av sprutbetongbågsförstärkningen presenterades tidigare i Figur 3 för de tre förstärkningsklasserna namngivna 6, 7 och 8. För vilka förhållanden dessa ska användas visas i Figur 10. Fortsatt finns flera kategorier av sprutbetongbågar inom respektive förstärkningsklass (ej redovisade i denna rapport) där antal och dimension på armeringsjärn, rader av armeringsjärn samt sprutbetongtjocklek varierar beroende av tunnels spännvidd (NGI, 2015).

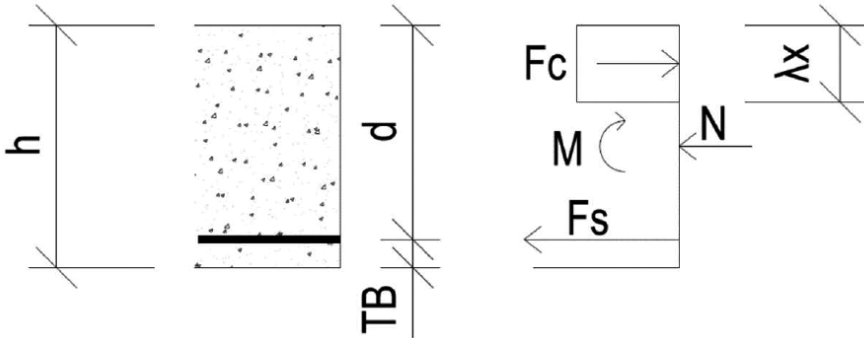


Figur 10. Tabell med olika förstärkningskategorier beroende av spännvidd och karterat Q -värde (från NGI, 2015).

3.3.2 Analytiska metoder

Exempel där sprutbetongbågskapacitet beräknas i moment-kraft-diagram (M-N-diagram) beskrivs bland annat av Carranza-Torres och Diederichs (2009) och Kaiser & Barlow (1985). Nedan följer en mer detaljerad beskrivning för beräkning av bågarnas kapacitet.

Moment och normalkraft har beräknats i tvärsnittet från betongens övre kant ner till armeringens tyngdpunkt. Denna tyngdpunkt anpassas i de fall man räknar på dubbelarmerade sprutbetongbågar. Tryckspänningen i betongen, F_c , beräknas enligt ekvation 5 där f_{cd} är dimensionerande tryckhållfasthet för betong, λx är höjden och b är bredden av det tryckta blocket, se även Figur 11.



Figur 11. Beskrivning av parametrar för sprutbetongbågsdimensioner, beteckningar återfinns i beräkningar nedan (exempelfigur).

$$F_c = f_{cd} * \lambda x * b \quad [5]$$

Draglasten i armeringen beräknas enligt ekvation 6 med spänningen i stålet, σ_s , och armeringsjärnets totala area, A_s .

$$F_s = \sigma_s * A_s \quad [6]$$

För att bestämma spänningen i stålet beräknas först den mekaniska armeringsandelen, ω , enligt ekvation 7 där x stegas från 0 till h .

$$\omega = \frac{\lambda x}{d} \quad [7]$$

För att bestämma om tvärsnittet är normal- eller överarmerat så jämförs sedan armeringsandelen, ω , mot armeringsandelen i ett balanserat tvärsnitt, ω_{bal} .

Armeringsandelen för ett balanserat tvärsnitt beräknas enligt ekvation 8.

$$\omega_{bal} = 0,8 * \frac{\varepsilon_{cu} * E_s}{f_{yd} + \varepsilon_{cu} * E_s} \quad [8]$$

Om $\omega < \omega_{bal}$ (normalarmerat) gäller att spänningen i armeringen, σ_s , är lika med stålets dimensionerande draghållfasthet, f_{yd} . Om $\omega > \omega_{bal}$ (överarmerat) ges spänningen istället av Hookes lag enligt ekvation 9.

$$\sigma_s = \varepsilon_s * E_s = \frac{d-x}{x} * \varepsilon_{cu} * E_s \quad [9]$$

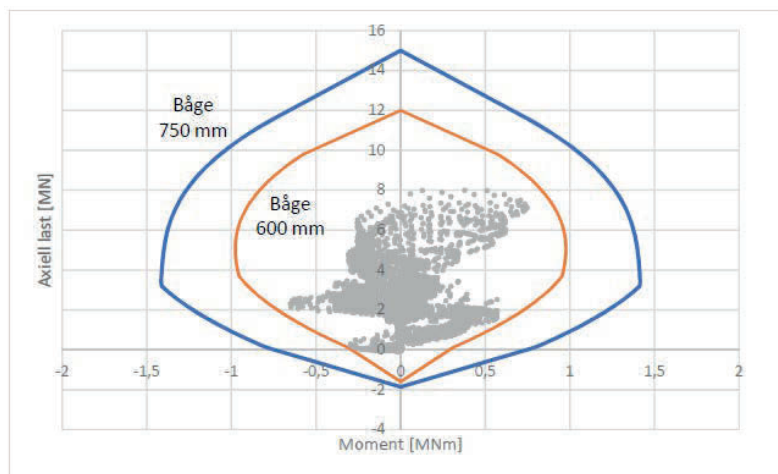
För kraftjämvikten i tvärsnittet gäller ekvation 10.

$$N = F_c - F_s \quad [10]$$

Momentjämvikten beräknas kring tvärsnittets mitt enligt ekvation 11 där M_f är momentet i sprutbetongen. För att ovanstående ekvationer ska vara giltiga krävs dock att draghållfastheten i bågen försummas och M_f sätts därför till 0.

$$M = F_c \left(\frac{h}{2} - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_s * \left(d - \frac{h}{2} \right) + M_f \quad [11]$$

Ekvationerna ovan (ekvation 5 – 11) är ej definierade för $N < 0$ eller när den axiella tryckkraften är den klart dominerande lasten. För $N < 0$ antas momentkapaciteten minska linjärt ner till rent drag där hållfastheten styrs av dimensionerande draghållfastheten, f_{ctd} . För fall där tryckkraften är dominerande extrapoleras interaktionskurvan linjärt till rent tryck vilket ger ett konservativt hållfasthetsvärde.



Figur 12. Exempel moment-kraft-diagram med armering och varierade sprutbetongbågstjocklek (fiktivt exempel).

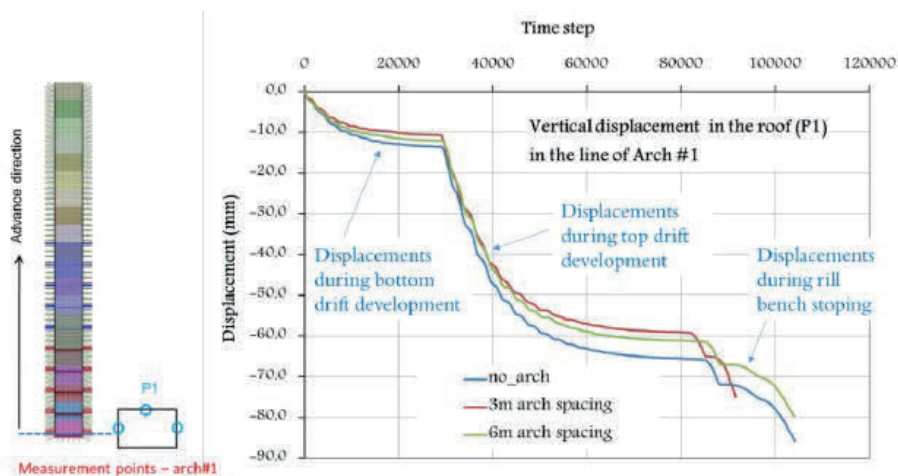
3.3.3 Numeriska metoder

Baserat på publicerad litteratur och intervjuer med projektörer finns flertalet exempel där man har dimensionerat sprutbetongbågar med hjälp av numeriska beräkningsmetoder. Valda programvaror och metoder varierar mellan de intervjuade projektörerna. Analyser förekommer både i 2D och 3D och har utförts i olika programvaror som *FLAC3D* (Itasca, 2024a), *UDEC* (Itasca, 2024b), *3DEC* (Itasca, 2024c), *Phase2D* (RocScience, 2024), *Plaxis* (Bentley, 2024a) och *STAAD* (Bentley, 2024b).

Gemensamt för de projektörer som utför numeriska analyser av sprutbetongbågar är att man generellt kombinerat analytiska och numeriska metoder vid sin dimensionering. Initialt gör man en numerisk analys där man antingen bedömer lasten genom att modellera någon typ av förstärkningselement där last tas fram numeriskt, alternativt att en löskärna uppskattas utifrån modellresultaten och en last bestäms analytiskt utifrån det. Fortsatt för att jämföra lasterna med sprutbetongbågskapaciteten appliceras i många fall kapacitetsberäkningar som presenteras i moment-kraft-diagram i enlighet med lasten beskriven kapitel 3.3.2.

Generellt är publicerat material kring numerisk modellering av sprutbetongbågar mycket begränsat.

En numerisk modelleringsstudie i *FLAC3D* gjordes i ett testprojekt i Garpenbergsgruvan (Saiang och Nyström, 2020) där effekten av sprutbetongbågar för höga brytningsrum studerades. Den studerade orten där bågar installerades är belägen på 890 m djup och är 5 m hög och 8 m bred. Avstånden mellan bågar varierade mellan 3–6 m och installerades 20 m bakom stoff. Bågarna modellerades som liner-element. I analyserna inkluderades även historiepunkter på sprutbetongbågarna i både väggar och tak i motsvarande lägen där konvergensmätningar utförts i fält, detta med syfte att kalibrera och validera modellen. Uttagsordningen för gruvbrytningsmetoden var tillredning av en först nedre och sedan övre ort med efterföljande uttag av malm mellan orterna (s.k. rill). Förväntade rörelser i väggar och tak för den undre orten beror därmed av de olika brytningsstegen och där uttag av den övre orten genererar större rörelser än uttag av den undre orten. Resultaten från analyserna visade på en viss minskning av deformationer i fallen med sprutbetongbågar i jämförelse med fallet utan bågar, se Figur 13.



Figur 13. Deformationer i numerisk modell med och utan sprutbetongbågar (Saiang och Nyström, 2020).

Ett annat sätt att applicera numeriska beräkningar i sin dimensionering är att använda numeriska metoder för att optimera en tidigare framtagen förstärkningslösning (exempelvis empiriskt). Den antagna lösningen kan modelleras numeriskt för att kontrollera belastningen på sprutbetongbågarna och därmed kan designen optimeras.

Ett exempel på när detta har gjorts har presenterats av Günther m.fl. (2024). I projektet hade en initial förstärkningslösning för ett av tunnelområdena tagits fram baserad på Q -systemet. Lösningen i fråga inkluderade lösjärnsarmerade sprutbetongbågar med ett lager armeringsnät. För att optimera lösningen för de andra delarna av anläggningen utfördes numeriska analyser där tunnelns sekventiella uttag modellerades. Installation av förstärkning skedde direkt vid stoff i modellen, vilket ger högsta möjliga påverkan på

förstärkningen. Flertalet olika förstärkningslösningar studerades och en slutsats som drogs var att det inte fanns ett behov av sprutbetongbågar i tunneln. Resultatet från den numeriska analysen blev därmed en stor besparing för projektet då de tidskrävande och kostsamma sprutbetongbågarna inte längre bedömdes som nödvändiga.

3.4 Kontrollprogram

Att verifiera den tekniska livslängden för sprutbetongbågar är komplicerat. I branschen beskrivs av många av de intervjuade personerna att man ofta bedömer den tekniska livslängden utifrån angiven livslängd hos de olika komponenterna inkluderade i sprutbetongbågarna. Andra menar att detta egentligen inte är tillräckligt då utförandet har en stor inverkan på sprutbetongbågens faktiska livslängd. Då bågen är slutprodukten och man inte kan veta hur väl utförd den är kan man heller inte bedöma vad den faktiska tekniska livslängden bör vara. Vissa projektörer belyser också inspekterbarheten som en viktig aspekt för kontroll av förstärkningen. Kan sprutbetongbågarna inte inspekteras menar de på att man inte heller kan kontrollera bågens livslängd då inspekterbarheten blir särskilt relevant för förstärkningselement där den initiala tekniska livslängden är svårbedömd.

Genom utförda intervjuer har arbetet kring kvalitetskontroll av sprutbetongbågar kartlagts i hela kedjan från beställare till projektör och entreprenör. På infrastruktursidan råder det delade meningar om vilken detaljnivå som bör krävas av entreprenören under installation av bågar. Vissa projektörer förespråkar en omfattandedokumentation av arbetet med lösjärnsarmeringen, insprutningen etc. medan andra tycker att grundläggande "syn" är tillräcklig. På beställarsidan beskrevs att man generellt arbetar med stickprovskontroller för att bedöma kvalitén på utförandet men att inte konstruktionen av varje specifik båge kontrolleras. Entreprenörerna beskrev också att det är viktigt att hålla kontroll på lagertjockleken samt fiberinnehållet i sprutbetongen som en del av kvalitetskontrollen, i det fall fiberarmerad sprutbetong appliceras.

3.5 Dimensioneringsutmaningar

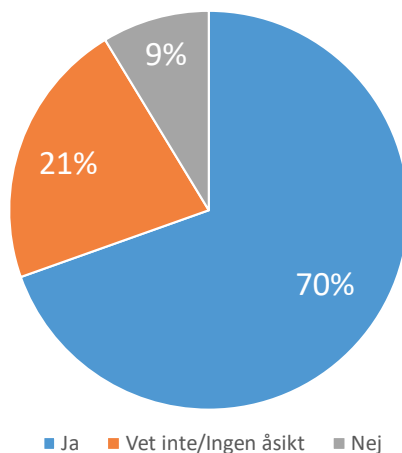
Bland de intervjuade personerna bedömdes följande två faktorer som de mest utmanande vid dimensionering av sprutbetongbågar, (i) bestämning av lasten, och (ii) dimensioneringsmetodik för att bedöma sprutbetongbågens kapacitet.

I Figur 14 presenteras fördelningen på svaren på frågan huruvida man i branschen idag ser ett behov av rådgivande dokument för dimensionering av sprutbetongbågar i branschen. Av de intervjuade personerna svarade 70% att de anser att det finns ett behov av någon typ av rådgivande dokument. Hur dokumentet i fråga skulle vara utformat fanns olika åsikter om, exempelvis önskade vissa att det skulle vara en väldigt detaljerad handbok med steg för steg hur man dimensionerar bågar. Några ville gärna se någon form av exempel på "typ-bågar" med lämpliga appliceringsområden. Majoriteten av de som ställde sig positiva till att ha någon typ av rådgivande dokument önskade

dock ett mer vägledande dokument där principer kring lastbestämning och dimensioneringsmetodik beskrivs utan att man blir fastlåst i en specifik dimensioneringsprocess.

Av de intervjuade personerna ansåg 9% att det inte behövdes några ytterligare rådgivande dokument i branschen. Anledningarna varierade, en av de intervjuade personerna ansåg att behovet inte fanns för att dimensioneringsarbetet borde utföras av en betongkonstruktör och för deras arbete finns i dagsläget redan tydliga riktlinjer och regler enligt Eurokod. Övriga ansåg att det snarare handlade om den ingenjörsmässiga biten och att man som bergkonstruktör borde klara av att göra dessa bedömningar själv utan någon typ av handbok.

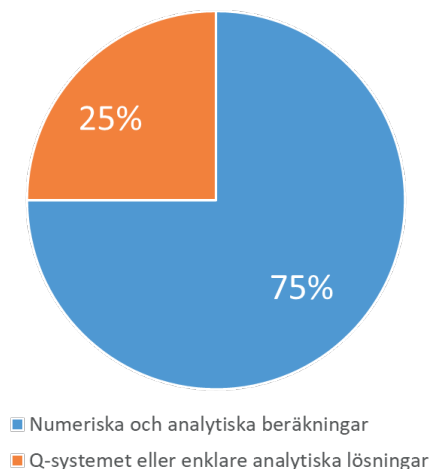
Slutligen svarade 21 % att de antingen inte visste eller hade någon stark åsikt kring behovet av stödjande dokument vid dimensionering. Det ska tilläggas att majoriteten av dessa intervjupersoner antingen arbetade hos entreprenör med själva utförandet eller hos beställare med bygglledning.



Figur 14. Fördelning svar på frågan huruvida rådgivande dokument behövs för dimensionering av sprutbetongbågar bland de intervjuade personerna.

En annan frågeställning där åsikter överlag varierat mellan de intervjuade personerna gäller beräkningsmetodiken vid dimensionering av sprutbetongbågar. Vissa projektörer anser att empiriska lösningar i många situationer är tillräckligt, så länge förutsättningarna för tunneln är inom vad som beskrivs och kan appliceras utifrån Q -systemet. Det finns också personer bland de som intervjuats som anser att sprutbetongbågar enbart tas till i fall där man har väldigt komplicerade och/eller dåliga förhållanden. De anser att man i ett sådant fall behöver använda numeriska beräkningar om bågar ska användas. Hur resultaten från de numeriska beräkningarna ska användas och om 2D- eller 3D-beräkningar är ett måste finns det därmed olika åsikter om. Vissa

belyser också att det kan vara en budgetfråga i vissa projekt, att projektörer inte anser att de har utrymme i budgeten att göra mer avancerade beräkningar. I Figur 15 visas fördelningen mellan de verktyg som de intervjuade personerna anser sig vara korrekt att använda vid dimensionering av sprutbetongbågar.

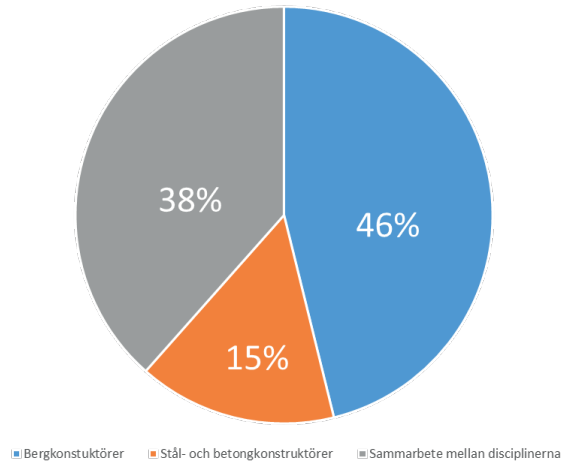


Figur 15. Fördelning svar på frågan om vilka verktyg de intervjuade personerna använder eller anser borde användas vid dimensionering av sprutbetongbågar.

Slutligen var åsikterna i frågan om vem som ska utföra arbetet med dimensionering av sprutbetongbågar spridda, se sammanställning i Figur 16. Av de svarande anser 46% att bergkonstruktörer är bäst lämpade att jobba med dimensioneringen. Motiveringen till varför var bland annat att bergkonstruktörer har bäst förståelse för lastsituationen i en tunnel och önskat beteende i sprutbetongbågen. Också att betongkonstruktörer ofta tenderar att designa överdrivet robusta lösningar då deras lastantaganden skiljer sig från en bergkonstruktörs. Vissa av de intervjuade personerna belyste dock att alla bergkonstruktörer inte är lämpade för att designa sprutbetongbågar. Man ska ha rätt erfarenhet och utbildning så man har en förståelse för bergets och förstärkningens beteende.

Dock svarade 38 % att man gärna såg ett samarbete mellan berg- och betongkonstruktörer vid dimensionering av sprutbetongbågar. Vissa ansåg att lastbedömningen bör göras av en bergkonstruktör och den efterföljande kapacitetsberäkningen av en som arbetar med betong. Vissa andra såg snarare betongkonstruktören som ett potentiellt stöd vid sitt eget dimensioneringsarbete.

Av de intervjuade personerna ansåg 15% dock att ett dimensioneringsarbete som innefattade sprutbetongbågar helt klart skulle utföras av en person med kompetens inom betongkonstruktioner. En av personerna ansåg även att en sprutbetongbåge inte bör särskiljas från andra platsgjutna konstruktioner och att Eurokod därmed ska följas.



Figur 16. Fördelning av svar på frågan om vem som ska arbeta med dimensionering av sprutbetongbågar.

4 UTFÖRANDE

I detta avsnitt redovisas en sammanställning av hur sprutbetongbågar utförs och kontrolleras baserat på utförda intervjuer. Vid intervjuerna har personer från gruv- och infrastrukturbranschen delat med sig av sin kunskap och erfarenheter från utförandet av sprutbetongbågar.

Vid de utförda intervjuerna noterades att beslutsgången för installation av sprutbetongbågar varierar mellan infrastrukturprojekt och gruvindustrin samt att det även finns variationer mellan olika gruvor. I en gruva, där sprutbetongbågar främst används vid rehabilitering, är det generellt en bergmekaniker som tar beslut om sprutbetongbågar ska installeras och hur de utformas, ibland tillsammans med någon från produktionen. I en annan gruva tas beslut om installation av sprutbetongbågar i samband med att riskanalyser för ett nytt drivningsområde utförs. Beslutet baseras på berg- och spänningsförhållanden.

Inom infrastrukturprojekt är det generellt beställarsidan som ger direktiv, oftast baserade på projektörernas framtagna handlingar, och tar beslut om sprutbetongbågar ska installeras och entreprenören utför arbetet enligt dessa direktiv. Beslutet om att installera sprutbetongbågar är en kombination av projektörens dimensionering och en ingenjörsgelogisk bedömning av bergförhållanden. Oftast är det föreskrivet att bågar ska installeras vid vissa bergförhållanden eller till exempel vid låg bergtäckning. I vissa fall kan berget vara bättre än prognosen och då kanske inte sprutbetongbågarna behövs, men man måste ändå förbereda för att rymma bågar genom att utöka sektionen. Vid en totalentreprenad, där alla detaljer inte är beskrivna och det framkommer att sprutbetongbågar krävs i efterhand, måste man ta fram bygghandlingarna snabbt för att möta behoven som uppstår under projektets gång.

4.1 Utförande av sprutbetongbågar

4.1.1 Förekomst

Av de intervjuade personerna är det två entreprenörer inom infrastrukturbranschen som har besvarat frågan om hur ofta de har etablerat sprutbetongbågar. Den ena entreprenören uppger att det är relativt ovanligt med sprutbetongbågar, och att personen har erfarenhet av att ha utfört det ca 10 gånger under en relativt lång karriär. Den andra entreprenören uppger att sprutbetongbågar har utförts i tre projekt som personen varit delaktig i. Med andra ord förekommer inte sprutbetongbågar i alla tunnelprojekt.

Inom gruvbranschen uppgav samtliga de intervjuade personerna att sprutbetongbågar var vanligare förr men används mindre frekvent i dagsläget. Anledningen till det är att man hellre väljer andra förstärkningslösningar.

4.1.2 Praktisk genomförbarhet av projekterade lösningar

Utmaningarna med den praktiska genomförbarheten av projekterade lösningar varierar mellan olika branscher. Inom gruvindustrin anges till exempel att utmaningarna är en ojämn deformation längs tunnel/ort-konturen, antingen sker deformationerna i taket eller väggarna. Detta innebär att man inte har bra förutsättningar för att installera sprutbetongbågar och att lastfördelningen blir mycket ojämn.

Bland beställare inom infrastrukturbranschen upplevs det ibland att bygghandlingarna för sprutbetongbågar inte är produktionsanpassade, det kan till exempel förekomma detaljer på ritningar som har brister. När projekterade lösningar inte har varit optimalt anpassade för produktionen, har det medfört besvärliga utföranden för entreprenörerna. Det hade kunnat lösas med produktionssättning där involverade parter sitter ner och diskuterar innan bygghandlingarna fastställs, där man kan identifiera möjliga produktionsoptimeringar. I praktiken kan det exempelvis vara en utmaning med utrymmesbrist och att välja lämplig utrustning för arbetet. Ofta ser beställarna också problem med arbetsflödet mellan entreprenörer och projektörer då frågor dyker upp under byggnationstiden. Det upplevs ofta utmanande att få svar i rimlig tid och att svarstiden inte ska få en negativ tidsmässig inverkan på produktionen.

De intervjuade entreprenörerna upplever att de projekterade lösningarna inte tar hänsyn till arbetsmiljöfrågorna, särskilt när det gäller att arbeta under dåliga bergförhållanden och vid montering av armering. Det är viktigt att skapa en säkrare arbetsmiljö, vilket kan vara den största utmaningen. En entreprenör nämner utmaningen med att bygga efter ritningar där sprutbetongbågar är utformade baserade på teoretisk tunnelkontur. Entreprenören tycker att man borde kunna acceptera små intrång, i stället för att utjämningspruta för att erhålla en jämn yta, vilket leder till att bågen blir tjockare än vad som var föreskrivet.

En projektör som arbetar med infrastruktur och har erfarenhet både från arbete med sprutbetongbågar i Norge och i Sverige jämför skillnaderna mellan länderna. I Norge finns det en standard för installation av sprutbetongbågar, vilket innebär att alla parter vet hur arbetet ska utföras. I Sverige finns ingen enhetlig nationell metodik, vilket innebär att det är den enskilda projektören och entreprenören som får hantera frågor om utförande.

4.1.3 Designförändringar i produktion

Inom gruvindustrin väljer man ofta att frångå användandet av sprutbetongbågar för att istället applicera andra förstärkningslösningar. Att sprutbetongbågar ofta väljs bort i produktion beror på att önskad förstärkningseffekt inte alltid kan uppnås med sprutbetongbågar samt för att det är kostsamt att installera bågarna. I stället för sprutbetongbågar väljs ofta att förstärkningen utförs med svetsade nätrader i kombination med bultar för att uppnå förbättrad ytförstärkning eller mer deformationstålig förstärkning med dynamiska bultar.

En person i beställarroll berättade om sin erfarenhet av att det inte alltid finns nog med utrymme för de projekterade sprutbetongbågarna, vilket leder till att man antingen behöver justera förstärkningsmetod alternativt utöka sektionen. Det kan därmed vid utförandet bli mycket problematiskt att applicera sprutbetongbågar som vald förstärkningsmetod om man inte redan vid projekteringen planerat för det.

Inom infrastrukturprojekt ställer projektören/beställaren också ofta höga krav på att deformationer ska mätas väldigt nära stoff för att övervaka om otillåtna rörelser sker. Samtidigt ska entreprenören förstärka och spränga ut kommande salvor utan att prismorna som används vid mätningen påverkas. För att det arbetet ska göras så bra som möjligt behöver ibland justeringar göras i produktion.

Om bågarna ska installeras nära stoff kan det bli svårt att skapa tillräckligt med utrymme för att spruta bakom armeringen, då har det förkommit att sprutbetongbågarna har installerats med ett längre avstånd till stoff än projekterat. Själva designen av sprutbetongbågen har inte ändrats och projektören har i dessa situationer godkänt att man släpat lite med monteringen av bågarna.

Enbart en av de intervjuade projektörerna har erfarenhet av att armeringen i bågarna ändrades i byggskede. På grund av felaktigt erhållna dimensioner på armeringsjárn fick projektet övergå till 16 mm järn i stället för 20 mm. Detta beaktades som en avvikelse men lösningen godkändes då den bedömdes vara tillräcklig för de aktuella förhållandena.

Erfarenheterna bland de intervjuade personerna varierar dock. Enligt en entreprenör görs sällan några stora förändringar från den projekterade lösningen. Det kan förekomma, men oftast löser man det enligt projektörens anvisningar. En annan entreprenör påpekar att det är svårt att skapa perfekta bågar med sprutbetong, till skillnad från vid platsgjutning av betong. Entreprenören tycker därför att det blir enklare att spruta över hela tvärsnittet och ha en mer genomgående tjockare sprutbetong för att försöka skapa en bärande valvform.

Inom infrastrukturprojekt förekommer det exempel på när en planerad projektering med sprutbetongbågar har ersatts av en annan förstärkningslösning. Det förekommer exempel både från beställare och entreprenör att man valt att anlägga tjockare sprutbetong i stället för sprutbetongbågar. Ett exempel är att man valt att göra det i

samråd med karterande geologer när det enbart förekommit kortare sträckor (1–2 m) med sämre bergkvalitet, där man skulle installera bågar enligt uppställda kriterier för just den bergkvaliteten. En intervjuad entreprenör har ett exempel från när man, i stället för sprutbetongbågar med tjocklek 500 mm och med centrumavstånd 0,5 m, valt att göra en sprutbetonglining med tjocklek 300 mm i stället.

En av de intervjuade personerna som arbetar med infrastrukturprojekt har erfarenhet av att sprutbetongbågar har ersatts av bultbågar, vilket den intervjuade personen tycker är en minst lika bra lösning för många fall.

En projektör föreslår att man ska använda förförstärkning i stället för sprutbetongbågar. Berguttaget ska då utföras med korta salvor och med succesiv installation av spiling. Exakt utformning ansåg projektören kunna behöva anpassas beroende på lokala förhållanden.

4.1.4 Installationstid och praktiska begränsningar

Uppskattningen av tidsåtgången för att utföra sprutbetongbågen varierar mellan olika intervjuade personer. Nedan följer exempel från de svar som gavs under de utförda intervjuerna.

- Inom gruvindustrin bedömer en person att det tar ungefär två dagar att bygga upp en sprutbetongbåge, bågarna installeras i en serie och det uppskattas att man kan göra ca tio stycken på en månad. En annan person inom gruvindustrin uppskattar att det tar cirka en till två timmar att utföra sprutningen för en båge, dock ges ingen information om sprutbetongbågen är uppbyggd med någon armering.
- En beställare som arbetar med infrastruktur ger ett exempel från ett projekt där sprutbetongbågar applicerats där tvärsnittsarean på tunneln var 120 m² och framdriften var 0,5 m per vecka. Personen påpekar också att tiden för att anlägga sprutbetongbågen beror av leveranser av sprutbetong etc. När man ska spruta tjocka lager med betong gäller det också att man kan få leveranser av sprutbetong med rätt tidsmässiga mellanrum för att kunna spruta två lager per dag.
- Inom ett infrastrukturprojekt bedömer en beställare att man kunde anlägga ungefär fyra sprutbetongbågar på två dagar, om man installerar bågarna längs en längre sträcka. Det tar nästan lika lång tid att anlägga en enskild sprutbetongbåge som att anlägga flera vid samma tillfälle eftersom applicering av sprutbetong är tidskrävande. Även väntan på att spruta nästa lager gör det mer effektivt att göra flera sprutbetongbågar vid samma tillfälle.
- En entreprenör bedömer att det tar cirka åtta arbetstimmar per sprutbetongbåge, för en enkelarmerad båge. En annan entreprenör bedömer att man kan installera ungefär två sprutbetongbågar på en vecka. Hur fort det går beror bland annat på tillgängliga resurser.
- En projektör som även har erfarenhet från bygglidning bedömer att det oftast tar mer tid att installera bågar i början av ett projekt, eftersom alla är ovana och det

är ett arbetsmoment många saknar erfarenhet av. Tiden för att anlägga en sprutbetongbåge varierar, det är vanligt att det tar en till två dagar i början. En viktig del av förarbetet som också är tidskrävande är att rensa ned till tunnelbotten för att skapa möjlighet att grundlägga bågen på berget och att utjämningsprutning utförs med syfte att skapa en jämn yta, vilket underlättar arbetet. Tiden det tar för att installera en sprutbetongbåge beror även på om det krävs ett eller två lager av armering och därefter tillkommer tid för betongsprutningen.

Vid installationsarbetet finns också vissa praktiska begränsningar man behöver ta hänsyn till när sprutbetongbågar sätts in, framförallt relaterat till drivningsrestriktioner. Nedan sammanställs de olika faktorer de intervjuade personerna har belyst gällande läge för installation av sprutbetongbågarna.

- Inom gruvindustrin varierar syftet med varför sprutbetongbågar installeras mellan olika gruvor. Inom en gruva där intervju gjorts anläggs bågarna oftast i rehabiliteringssituationer, vilket innebär att ortprofilen redan är uttagen. Därför finns i ett sådant fall inga restriktioner angående avstånd från sprutbetongbågen till gaveln.
- I en annan gruva beror avståndet man sätter från sprutbetongbågen till gaveln på vilken belastning som förväntas på bågarna. I vissa fall kan man driva ut en hel ort innan bågarna installeras. Men i ett område med stora deformationer placeras bågarna cirka 2–15 meter bakom fronten. Exakt avstånd varierar beroende på lokala förutsättningar. Den intervjuade personen påpekar att det är viktigt att installera bågarna i rätt tid, helst inte direkt efter berguttag, men inte heller för sent. Det är en avvägning och bedömning baserad på erfarenhet, man måste uppskatta och överväga när deformationerna kommer att inträffa och därmed när behovet av installation av bågen finns.
- Inom infrastrukturbranschen finns olika erfarenheter om hur nära fronten en sprutbetongbåge brukar installeras, det varierar från 2 till upp emot 20 meter. Både beställare, projektör och entreprenör påpekar att det bland annat beror på vilken utrustning man har, vilken borrhög som används och vilken typ av arbete som ska utföras.
- Både projektörer och entreprenörer nämner att det finns en risk för sprängskador om bågarna installeras nära tunnelfronten. En projektör anser att man bör installera bågen minst fyra meter bakom stuff för att undvika sprängskador på sprutbetongbågar, medan en entreprenör bedömer att man kan stå mycket nära tunnelfronten om sprutbetongbågen görs helt klar innan nästa salva sprängs. En entreprenör hänvisar till en utredning i Södra länken, i denna undersökning redovisas hur nära tunnelfronten man kan installera sprutbetong för den generella förstärkningen. Enligt denna undersökning är det inga problem att utföra förstärkning till väldigt nära front. Dock tror entreprenören att oinsprutad armering kan skadas eller bli förstörd om man spränger för nära. Entreprenören i fråga anser att bågen bör vara klar innan man skjuter nästa salva, men nackdelen är då att bågen kan vara i vägen på grund av tjockleken. Sprutbetongen kan

- också bli något skadad vid nästa salva, men det är ett mindre problem anser entreprenören.
- En entreprenör tycker att ett avstånd på tre till fem meter bakom tunnelfronten är rimligt, så länge sprutbetongbågen inte är för tjock. Avstånd till tunnelfronten och läget för sprutbetongbågen måste anpassas, så att inte framdriften påverkas.
 - En annan entreprenör anser att åtta meter bakom stuff är det närmsta man kan ha en färdiginstallerad sprutbetongbåge, om man ska fortsätta driva stuffen framåt. Om entreprenören har maskiner med kortare arbetsbord så kan man minska avståndet till stuff. Det blir en stor påverkan på framdriften om sprutbetongbågen måste göras färdig innan man kan gå vidare till nästa steg, vilket innebär att man kanske bara kan skjuta en salva per vecka.
 - En beställare ger ett exempel där man började installera bågarna två meter bakom fronten och att avståndet var fyra meter när sprutbetongbågen var helt färdig. I detta fall bestod bågen av dubbla lager armeringsnät. En annan beställare anser att man kan installera en sprutbetongbåge cirka tre till fyra meter bakom stuffen. Vid detta avstånd kan man komma åt att spruta betong från sidan av bågen och på så vis undvika sprutbetongskuggor och hela bågen kan göras klart innan nästa salva skjuts. Om bågen sitter för nära tunnelfronten finns det en risk att utstickande förankringsbultar skadas eller är i vägen för borrhjulen.
 - En projektör anger att kravet ofta brukar vara att sprutbetongbågen ska installeras två – tre meter bakom fronten, helst vill man av praktiska skäl installera bågen längre ifrån men då kan inte bågen ta upp de deformationer som bildas nära fronten.

Sammanfattningsvis anser entreprenörerna att det är tillgängliga maskiner och borrhjulen som är begränsande faktorer för hur nära stuff en sprutbetongbåge kan installeras. Hur pass begränsande detta anses vara finns ingen gemensam bild av i branschen. Ett alternativ för att minska problematiken kring att ha sprutbetongbågarna nära stuff kan vara att påbörja installationen av sprutbetongbågarna och sen succesivt bygga upp bågarna med mer sprutbetong. Därmed erhålls inte full effekt direkt när nästkommande salva skjuts utan istället på ett längre avstånd från stuff, när bågen inte utgör ett hinder för andra arbetsmoment.

4.2 Kvalitetskontroll

En av de intervjuade personerna från gruvindustrin uppger att en uppföljning av kvalitén vid installationen av sprutbetong och bultar utförs, men att det inte finns någon rutin för att utföra kontroller av just sprutbetongbågar.

En beställare inom infrastrukturprojekt uppger att kontroller består av att följa upp att rätt material används och att arbetet utförs i rätt sekvenser. Tjockleken på sprutbetongen kontrolleras och dokumentationen som entreprenören är kravställd att utföra ska samlas in. Under anläggningen av sprutbetongbågarna kontrolleras utförandet via okulära inspektioner på nära avstånd, inspektionerna i fråga dokumenteras. En kontroll av sprutbetongbågarna utförs även efter att bågen är färdigställd för att kontrollera att det ser bra ut. En annan beställare uppger att det inte finns några metoder för att utföra kvalitetskontroller med hänsyn till den tekniska livslängden som ställs på förstärknings-elementen.

En projektör har varit med om att det fanns ett kontrollprogram inom ett projekt som beskrev vilka kontroller som skulle utföras vid sprutbetongbågsinstallationen. Med erfarenhet från att faktiskt applicera det i projektet kunde kontrollprogrammet förbättras och användas i flera delar av projektet senare.

Intervjuade entreprenörer svarar att kvalitetskontroller utförs, dels genom att kontrollera att bågen monteras på rätt sätt och att armeringen är korrekt installerad, dels genom att ta prover på sprutbetongen och utföra all föreskriven fortlöpande provning. En entreprenör nämner att det är viktigt att tvätta av och säkerställa att ytor som ska betongsprutas är rena innan sprutningen påbörjas. Armeringsjärnen måste också kontrolleras och rengöras vid behov. Detta är viktigt för att minimera risken för håligheter bakom armeringsjärnen samt för att erhålla en bra vidhäftning för sprutbetongen. Det är viktigt att kontrollera och följa upp hur tjockt lager sprutbetong som sprutats under utförandet, det är svårt att mäta i efterhand. Efter att sprutbetongbågen är färdigställd kontrolleras sprutbetongbågen okulärt. Entreprenören anser att det är svårt att göra andra kontroller. Det som kan utföras i efterhand är konvergensmätning samt att kontrollera om det uppstår sprickbildning i bågen.

4.3 Produktionsutmaningar

Nedan har de produktionsutmaningar som nämnts under de utförda intervjuerna sammanställts. Exempelvis beskrivs det att inom gruvindustrin är en utmaning i praktiken att få en bra valvverkan för sprutbetongbågen. Till exempel vid utfall i tak (s.k. kyrktak) är det inte möjligt att få en valvverkan, det har ännu inte lösts på ett tillfredsställande sätt. Samma person påpekar att utförandeprocessen av sprutbetongbågar inte är välkänt för de flesta och det fördelaktigt att ha erfarenhet av det för att underlätta beställandet av arbetet. En entreprenör som arbetar med tunneldrivning nämner också att det är en utmaning att skapa en bra valvform, eftersom spräng-

resultatet inte alltid lämnar en jämn profil. Det kan resultera i en avvikande form, och då kan det krävas betydande mängder utfyllnadsbetong.

En annan av de intervjuade personerna från gruvindustrin uppger att en utmaning är att det tar extra tid att installera sprutbetongbågar och att man förlorar i produktionstempot. Men att det i övrigt inte är några stora utmaningar, personen anser att sprutbetongbågen (i detta fall utan lösjärnsarmering) är väldigt enkel att installera och det är därför den används.

En beställare inom infrastrukturbranschen svarar att det egentligen inte är några svårigheter att bygga sprutbetongbågarna, men att det är en utmaning i att entreprenören ofta har en ovilja att utföra bågar, eftersom det tar så mycket tid. Det innebär att det är en utmaning att se till att bågarna utförs enligt ritningarna och erhåller en god kvalitet.

En beställare uppger att det är tidskrävande för entreprenören att installera bågar och att mycket av utmaningarna hänger på det. Den intervjuade personen anser att ersättningsformen inom projekten sätter entreprenören under en tidspressad och reglerad situation. Ofta är det komplicerat för entreprenörerna att ersätta förlora tid i produktion vilket kan upplevas som orättvist hos entreprenören och skapa stress, vilket också ökar sannolikheten att utförandet blir sämre. Beställaren påpekar att anläggandet av sprutbetongbågar inte är lätt utan att det kräver teknisk skicklighet och yrkeskunnande. Det är en utmaning både i utförande och i hanteringen av tid och ekonomi för entreprenörerna.

Vissa projektörer har också erfarenheter att entreprenörer kan vara motvilliga till att installera sprutbetongbågar. Entreprenören kan tycka att det stör framdriften, att det går långsamt, och att det innebär nya arbetsmomentmoment som ur arbetsmiljösynpunkt är komplicerade. En entreprenör påpekar att det därför är viktigt att diskutera och planera för sprutbetongbågarna i förväg för att undvika problem. Genom att vara förberedd på vad som kommer kan man undvika stress orsakad av att man måste få allt på plats på kort tid för att kunna utföra sprutbetongbågarna och undvika diskussioner om hur det ska genomföras. Det är också viktigt att man har diskuterat och planerat med alla involverade parter, inklusive bygglidare, beställare och entreprenörer, för att undvika överraskningar.

En av de intervjuade entreprenörerna delar bilden av att missnöje ofta uppstår när sprutbetongbågar ska installeras, på grund av att det tar tid och saktar ned framdriften. Den intervjuade personen tycker inte att det alltid är motiverat och att man inte ser behovet till varför man ska använda sprutbetongbågar.

Under intervjuerna kommer även utmaningar kring materiallogistik upp som en produktionsutmaning. En nyckelaspekt är att se till att väsentliga delar till sprutbetongbågarna, såsom armeringen och speciellt betongen, finns tillgänglig när den behövs och är redo för användning. Logistiken kan vara svår att få till men har en stor inverkan på tidsåtgången vid båginstallationen. Med noggrann planering och förberedelse kan man dock minska svårigheterna.

För själva utförandet beskriver entreprenörerna en del utmaningar kopplat till både sprutningsarbetena och installation av armering. Vid utförandet av bågarna finns det risker att det blir skuggor bakom armeringen och fickor där sprutbetongen inte når in ordentligt. Det är en utmaning att övervaka och kontrollera kvalitén på insprutningen. Reflektioner från de intervjuade entreprenörerna var att när man arbetar med sprutbetongroboten är det bäst att använda flera lager armering och montera dem ett i taget, spruta in betong, och sedan gå vidare till nästa lager för att minska problemen med dålig insprutning. Man ska undvika att använda fiberarmerad sprutbetong på armeringen då de ansåg att det kan leda till ett dåligt utförande.

Det är också viktigt att montera armeringen på ett korrekt sätt för att undvika vibrationer vid sprutning av betong. Dessutom bör man undvika för grova armeringsjärn; den intervjuade personen skulle föredra 12 mm istället för 16 mm ur arbetsmiljösynpunkt.

5 PRAKTIKFALL

5.1 Introduktion

För följande sammanställning ligger fokus på praktikfall där sprutbetongbågar förekommer i Sverige men även internationellt. Internationellt har praktikfall studerats i de fall som de aktuella tunnlarna är byggda i liknande berggrund som i Sverige.

I Sverige förekommer sprutbetongbågar i många av de stora infrastrukturprojekten som pågått under de senaste 20–30 åren. Två av dessa mer aktuella fall har sammanställts i närmare detalj i denna rapport, se vidare kapitel 5.2 för exempel från projekt E4 Förbifart Stockholm och kapitel 5.3 för exempel från projekt Västlänken.

Historiskt har sprutbetongbågar varit mer vanligt förekommande i Norge än i Sverige. De första bågarna av sprutbetong (utan armering) applicerades för första gången år 1952. Fiberarmerad sprutbetong introducerades omkring 1980 (Olsson, 2021). I Norge har man i många fall sedan början av 1990-talet installerat lösjärnsarmerade sprutbetongbågar istället för platsgjuten lining, vilket innan dess var den vanligaste lösningen i områden med låg bergkvalité ($Q = 0,001 - 0,1$). I de flesta fallen har man inte gjort några analyser av laster och sprutbetongbågskapaciteten och har istället dimensionerats utifrån rekommendationer givna i Q -systemet (Grimstad & Bhasin, 2002). År 2002 gjordes numeriska beräkningar för att ta fram femton olika alternativ för utformning av sprutbetongbågar i Norge. Fortsatt mellan 2008–2016 reducerade norska Statens Vegvesen antal rekommenderade utformningar från femton varianter till två. Exempel från norska projekt där sprutbetongbågar förekommer finns det i flertal, som exempelvis E18 Fjelltunneln och Finnfast subsea tunnel (Olsson, 2021).

Ett annat internationellt exempel där sprutbetongbågar förekommer är Crossrail-projektet i London som innefattar två tunnlar med respektive längd av 21 km. I projektet gjordes tester med lösjärnsarmering med varierande diametrar mellan 16–32 mm varav armering med diameter 16–20 mm bedömdes vara mest lämpligt att använda. Även avstånd mellan järnen studerades och slutsatserna som drogs var att insprutningen förbättrades när avståndet ökades utan försämring av förstärkningsfunktionen (Fisher & Hofmann, 2015).

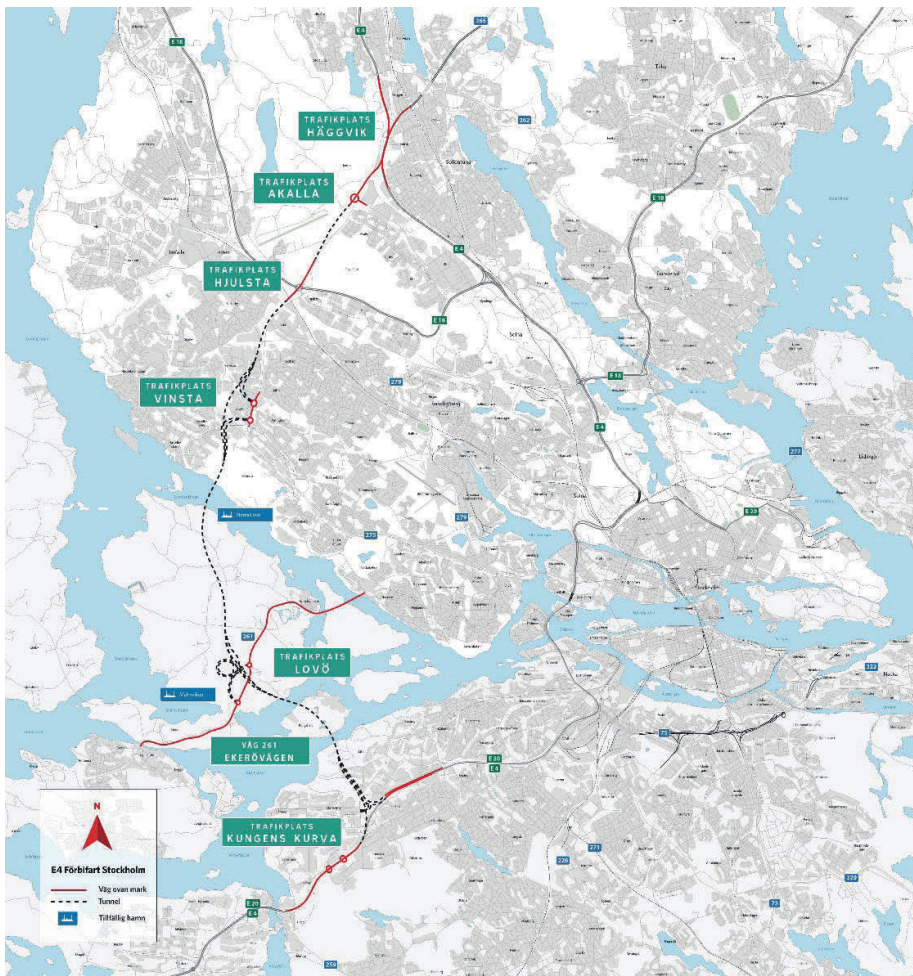
5.2 Förbifarten Stockholm, Lovön

5.2.1 Bakgrund

Projekt Förbifart Stockholm uppför en ny sträckning av väg E4, väster om Stockholm, från Kungens kurva i söder till Häggvik i norr, se Figur 17. Den nya sträckningen är 21 km lång, varav drygt 18 km anläggs i tunnel.

Längs tunnlarna inom E4 Förbifart Stockholm finns det områden där sprutbetongbågar har installerats. I denna studie kommer installerade sprutbetongbågar inom delprojekt

Lovö att beskrivas som ett praktikfall. Studien beskriver förutsättningar, den tekniska lösningen och hur den verifierats samt utförandet och uppföljningen av byggandet av sprutbetongbågarna.



Figur 17. Översiktsskarta E4 Förbifart Stockholm (Trafikverket, 2024a).

5.2.2 Förutsättningar och förväntat beteende hos bergmassa

Sprutbetongbågarna ingick i den projekterade förstärkningen för bergkvalitet V (BK V), $0,01 < Q_{bas} < 0,1$ och spännviddsklass B (12–17 m) samt spännviddsklass C (17–21 m).

Sprutbetongbågar har installerats i ena huvudtunneln, typsektionen för huvudtunnlarna har en spännvidd på ca 16,5 m. Förutsättningarna var att spiling och sprutbetongbågar skulle installeras vid första tecken på svaghetszoner klassade som BK V.

Designens giltighet för förstärkning med typförstärkning BK V var enligt följande:

- Svaghetszon med $Q_{bas} > 0,01$ (SRF 5) och/eller bergmassa med struktur U2, S2 eller leromvandling L2 (se Tabell 2).
- Bredden på svaghetszonens kärna ska maximalt vara 3,5 m.

SRF, Stress Reduction Factor, är en faktor som används i Q -systemet för att reducera karterade Q -värden vid till exempel en svaghetszon. SRF beskriver relationen mellan bergspänningar och bergmassans hållfasthet runt en berganläggning under jord. SRF 5 används vid enstaka svaghetszoner, med eller utan lera.

Tabell 2. Koder för beskrivning av bergmassans struktur samt av leromvandling (Trafikverket, 2019).

Kod	Typ av bergmassa	Beskrivning
U2	Mycket uppsprucken	Helt sönderkrossat berg med en genomsnittlig kantlängd < 0,06 m
S2	Tunnskivig	Tunnskivigt berg, skivornas genomsnittliga tjocklek < 0,2 m
L2	-	Lermineraliserad diskontinuitet (bredd < 0,10 m)

5.2.3 Teknisk lösning

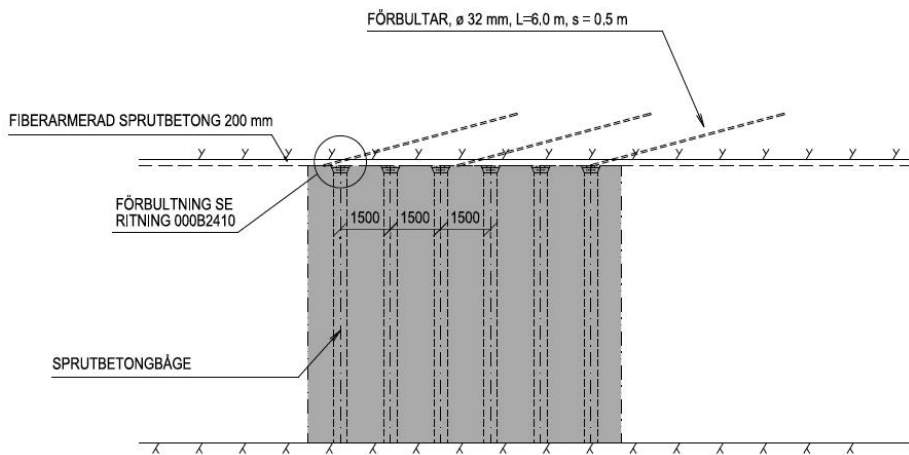
Den tekniska lösningen utgjordes av temporär förförstärkning samt permanent förstärkning med systembult, sprutbetong och sprutbetongbågar. Förförstärkning utgjordes av spiling med bultavstånd 0,5 m och bultlängd 6 m. Spilingen skulle installeras innan varje tunnelsalva togs ut och bakåtförankrades med fjällband och upphängningsbultar.

Den permanenta förstärkningen utfördes med 200 mm fiberarmerad sprutbetong och systematisk bultning med bultavstånd 1 x 1,5 m och bultlängd 6 m (se Figur 20). Bultavståndet var 1 m i tunnelns tvärsektion och 1,5 m i tunnelns längdsektion. Bultavståndet var anpassat för att två rader bultar skulle installeras i varje salvcykel, salvlängden var 3 m.

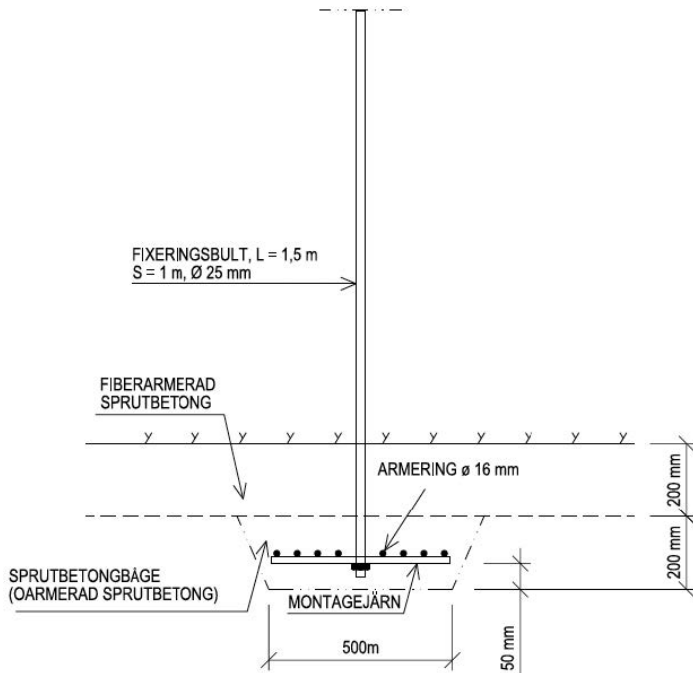
Sprutbetongbågarna utfördes med en tjocklek av 400 mm, detta inkluderar lagret med 200 mm sprutbetong som installerats innan bågen. Bredden på sprutbetongbågen var 0,5 m och den armerades med en rad av 8 kamjärn med diameter 16 mm. Sprutbetongbågarna installerades med centrumavstånd 1,5 m. Avståndet mellan tunnelfront och sista sprutbetong bågen fick inte överstiga 6 m under tunneldriften.

Schematiska skisser av förstärkning med sprutbetongbågar redovisas i Figur 18 och Figur 19.

Sprutbetongbågarna anlädes mot rensad bergbotten och fästes in med förankringsstag, som installerats minst 2 m in i bergmassan och med avstånd 1 m mellan stagen.



Figur 18. Schematisk längdsektion av permanent förstärkning med sprutbetongbågar (Lundman, 2022).



Figur 19. Detalj av sprutbetongbågen (Lundman, 2022).

5.2.4 Metod för att verifiera teknisk lösning

Två analyser har utförts av Radonic (2016) för att ta fram den tekniska lösningen för förstärkning inom bergklass V med sprutbetongbågar. Analyserna utfördes med numeriska modeller i 2D med programvaran *RS2* (RocScience). Vid analyserna har förstärkning med systematisk bultning och sprutbetong samt sprutbetongbågar modellerats. Från analyserna har laster på bultar, sprutbetong och sprutbetongbågen erhållits och använts för att verifiera föreslagen förstärkningslösning. Analys 1 utfördes för att ta fram en förstärkning för svaghetszoner med bergklass V och analys 2 utfördes för att verifiera designen i analys 1. Analys 2 utfördes för en sträcka i huvudtunneln och korsande tvärtunnel där en svaghetszon med bergklass V karterats efter att berguttaget utförts.

Information om de geologiska förhållandena hämtades från utförda kärnborrhål och kartering av en närliggande arbetstunnel för analys 1 och för analys 2 hämtades informationen från utförda karteringar i de utsprängda huvudtunnlarna och en tvärtunnel.

I analyserna beräknades lasten, som utvecklas på förstärkningen. Lasten utgjordes av den uppspruckna bergmassan som bildas runt kärnan i svaghetszonen samt av en löskärna som bildas inom svaghetszonen.

Båda analyserna är utförda med förutsättningen att en svaghetszon klassad som bergklass V passerar vinkelrätt mot huvudtunnlarna och parallellt med tvärtunnlar/nischer.

Följande steg modellerades:

1. Avlastning av bergmassan framför tunnelfronten genom att belasta den oförstärkta profilen med ca 30 % av den totala lasten.
2. Fortsatt avlastning från ca 70 till 45 % och installation av lining (200 mm sprutbetong) med egenskaper för ung sprutbetong.
3. Full avlastning och installation av sprutbetongbågar och bultar (egenskaper för 28 dagar gammal sprutbetong).

I analys 1 togs huvudtunnel ut med pilot och stross, den oförstärkta profilen belastades med ca 30 % av den totala lasten och 50 mm sprutbetong installerades. Därefter utfördes beräkning till ny jämvikt för piloten och sedan utfördes steg 1–3.

Nischen/tvärtunneln analyserades enligt steg 1-4, dock utan sprutbetongbågar. I analys 2 har både huvudtunneln och tvärtunneln analyserats enligt steg 1–3.

Syftet med att avlasta bergmassan i flera steg var för att modellera effekten av bergguttaget. Denna metod innebar att en hel tunnelsektion tas ut samtidigt, men lasten läggs på gradvis. Det har antagits att sprutbetong installeras fram till tunnelfronten innan nästa salva tas ut eftersom det är mer konservativt på grund av det skapar den högsta lasten på sprutbetongen. Lasten på sprutbetongen ökas sedan i två steg (ung respektive mogen sprutbetong). Bultar installeras i det sista steget. Detta innebär att den oförstärkta profilen belastas med ca 30% av den totala lasten och resterande 70 % appliceras i två steg: ca 25 till 45% på den unga sprutbetongen och ca 25 till 45% på den mogna sprutbetongen med bultar och sprutbetongbågar.

Sprutbetongbågen har modellerats som en balk och egenskaperna motsvarar en sprutbetongbåge med bredden 0,5 m och höjden 0,4 m. Den ekvivalenta tjockleken (h_{eq}) och elasticitetsmodulen (E_{eq}) för balken beräknades enligt nedan:

$$h_{eq} = 2 \frac{\sqrt{3C_A C_1}}{C_A} \quad [12]$$

$$E_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{6} \frac{C_A^2}{\sqrt{C_A C_1}} \quad [13]$$

$$C_A = n(A_1 E_1 + A_2 E_2) \quad [14]$$

$$C_1 = n(I_1 E_1 + I_2 E_2) \quad [15]$$

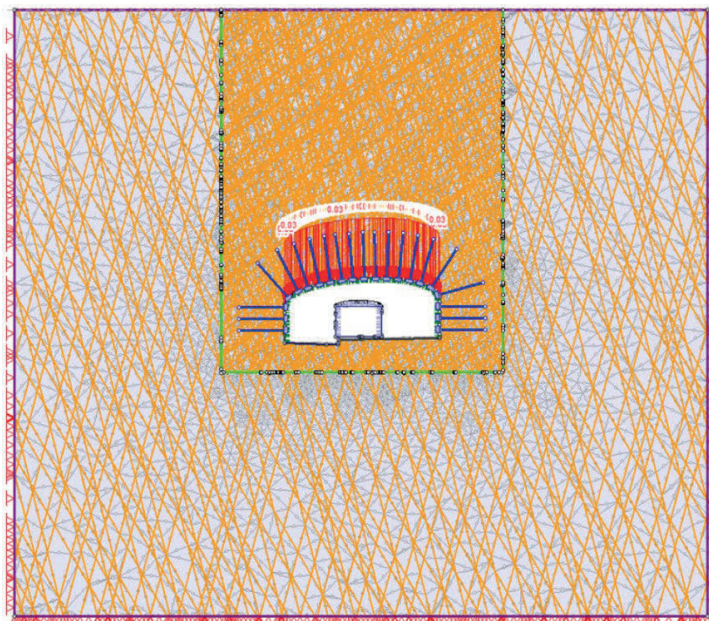
där

A = tvärsnittsarea,

I = tröghetsmoment,

n = antalet bågar (= 1/avstånd mellan bågar) och

E = elasticitetsmodulen.



Figur 20. Numerisk modell av huvudtunneln med spricksystem (orange) och installerad förstärkning för analys 1 (Radoncic, 2016).

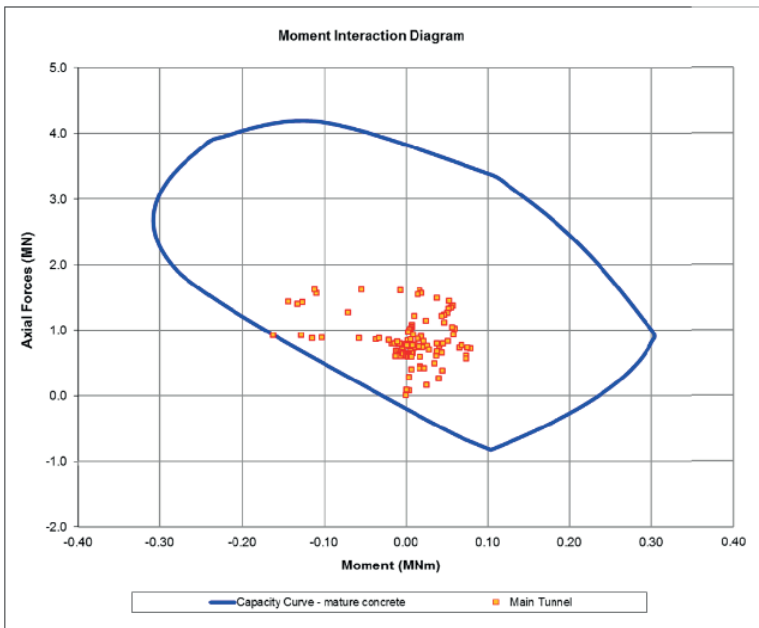
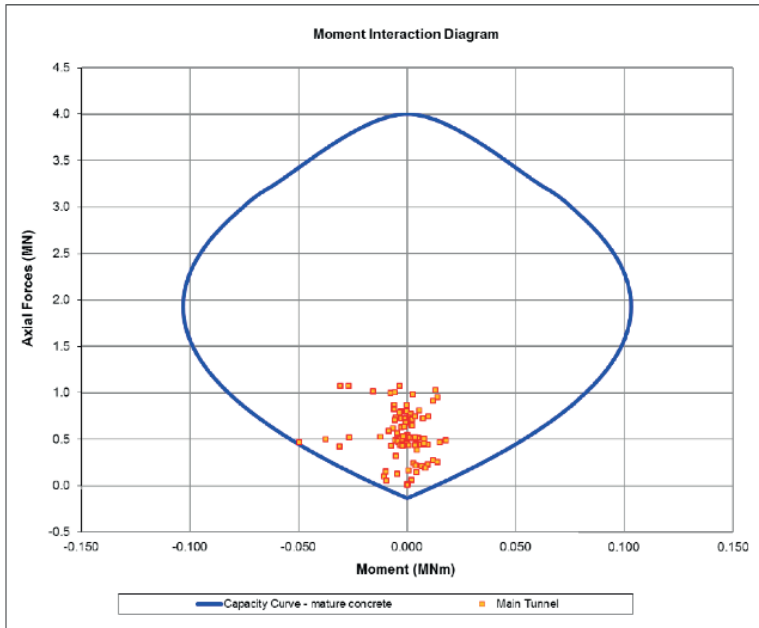
Designen på sprutbetongbågarna validerades genom analytiska metoder och genom att kontrollera att brottgränstillståndet inte överskreds för bultar och sprutbetong.

Den föreslagna tjockleken på den fiberarmerade sprutbetongen kontrollerades analytiskt för följande brottmoder:

- Vidhäftningsbrott p.g.a. löst berg/bergblock
- Böjbrott p.g.a. dålig vidhäftning
- Stansning av berg genom sprutbetong mellan bultar

För bultar plottades lasten för respektive bult längs tunneln och kontrollerades mot bultarnas dimensionerande kapacitet.

Designen av sprutbetongbågarna har verifierats genom normalkraft och böjmoment längs tunnelranden som erhöles från 2D-analyserna. Storleken på krafterna och böjmomentet som belastar sprutbetongbågarna transformerades tillbaka till krafter som verkade i sprutbetongen och sprutbetongbågarna. För att beräkna brottgränstillståndet multiplicerades lasten med en partialkoefficient på 1,35. För att verifiera bärigheten, d.v.s. förstärkningens förmåga att bära lasten, har diagram som redovisar böjmoment-normalkraft (M-N) skapats, se Figur 21. Resultatet visar att kapaciteten för den föreslagna förstärkningen inte överskrids.



Figur 21. M-N-diagram för sprutbetong t.v. och för sprutbetongbåge t.h., analys 1 (Radonic, 2016).

5.2.5 Utförande och uppföljning

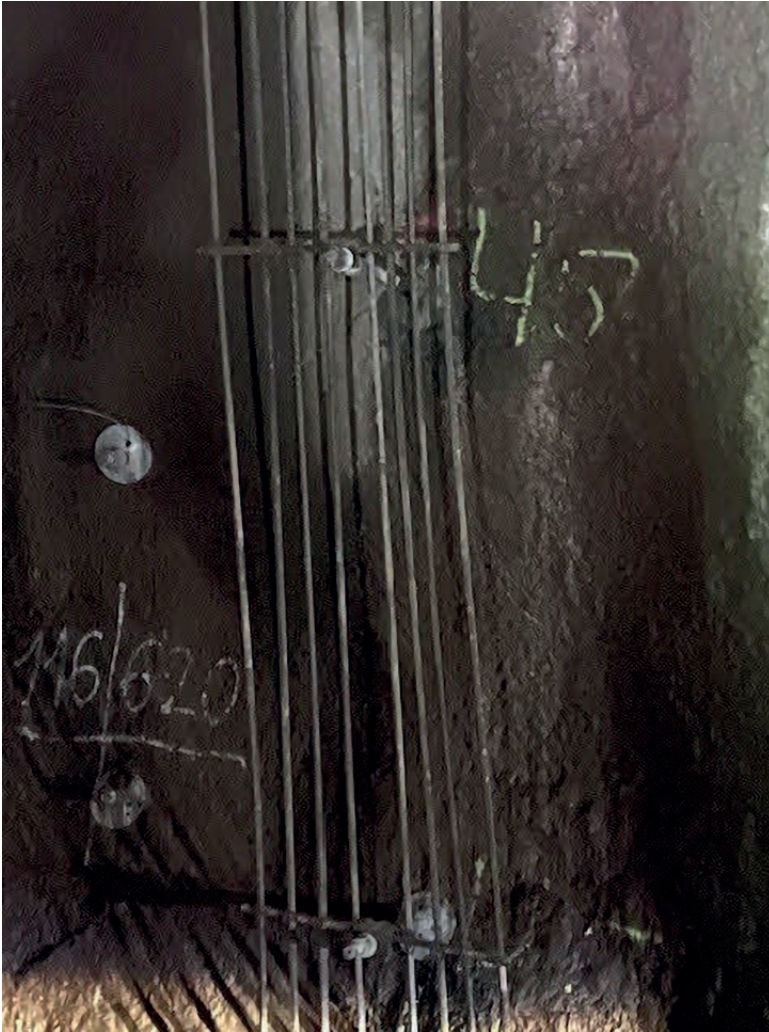
Sprutbetongbågar har installerats i den ena huvudtunneln längs två sträckor, en ca 40 m lång sträcka (km ca 116/550–116/590) och ytterligare en ca 30 m lång sträcka (km ca 116/655–116/685).

Bergkvaliteten (Q_{bas}) är bedömd att vara 0,05–0,09 i de områden sprutbetongbågar är installerade. Generellt består bergmassan av omvandlad granit och gnejs och det förekommer krosszoner med inslag av lera.

I Figur 22 och Figur 23 redovisas foton av installerad armering för sprutbetongbågar, innan fortsatt sprutning har utförts.



Figur 22. Serie av installerad armering för sprutbetongbågar (Dahlberg, 2024).



Figur 23. Närbild av installerad armering i vägg för en sprutbetongbåge (Dahlberg, 2024).

Under byggskedet har uppföljningen av sprutbetongbågarna utförts av ansvariga bygglidare. Kontroller har utförts på installerad armering för sprutbetongbågarna innan entreprenören har tillåtit att applicera sprutbetongen. Bygglidarna kontrollerade bland annat att armeringen inte var placerad för långt från utsprängd tunnelkontur och att överlappet mellan armeringsjärnen var tillräckligt. Vid ett för stort avstånd mellan tunnelkontur och armering ökar risken för sprutbetongskuggor och hålrum. Vid för stora avstånd justerade entreprenören armeringen för att anlägga den närmare tunnelkonturen eller så valde entreprenören att utföra sprutbetong från sidan av armeringen för att jämna ut och fylla igen större avstånd (ca 20–40 cm) mellan tunnelkontur och armering.

Provning av sprutbetong utfördes enligt krav ställda för den fortlöpande provningen av sprutbetong inom projektet. Inga speciella kontroller har utförts för sprutbetongen till bågarna. Det fanns inga krav ställda på att utjämnings-sprutning skulle utföras vid sprutbetongbågarna, därav var entreprenören motvillig till att utföra detta till en början. Men med erfarenhet av installationen lärde sig entreprenören att det var enklare att installera armeringen om utjämnings-sprutning utfördes.

Ingen tjockleksmätning har utförts på sprutbetongbågarna. Bygglidarna hade önskemål om att entreprenören skulle använda s.k. spioner (variant av markörer) för att säkerställa att kravställd sprutbetongtjocklek uppnåddes. Men entreprenören valde att använda bultändarna på förankringsstagen som indikator för att tillräcklig tjocklek med sprutbetong hade påförts på bågarna.

Kontroll efter att sprutbetongbågarna var färdiginstallerade har utförts okulärt och med konvergensmätning. Vid den okulära besiktningen har det kontrollerats att inga skador finns på sprutbetongbågarna, till exempel uppsprucken betong. Konvergensmätning har utförts mellan sprutbetongbågarna och konvergenssektionerna har installerats 6–8 m bakom stoff. Konvergensmätningarna har utförts under en längre period med syfte att kontrollera om det uppstår deformationer i bergmassan.

Erfarenheter från utförande av sprutbetongbågar inom projektet Förbifart Stockholm har erhållits efter samtal med ansvariga bygglidare. Bygglidarna upplever att den största utmaningen med sprutbetongbågarna var att installera armeringen korrekt. Det är viktigt att utjämnings-sprutning utförs innan armeringen för att bågen ska få en valvform samt att det är ordentligt rensat till fast berg i tunnelbotten för att erhålla de bästa möjliga förutsättningarna. Tillåtet maximalt avstånd mellan armering och tunnelkontur bör också kravställas i bygghandlingen.

Ett specifikt kontrollprogram för utförandet av sprutbetongbågar hade också enligt bygglidningen varit hjälpsamt. Det har inte funnits inom denna entreprenad och därför har bygglidarna baserat sin produktionsuppföljning på erfarenheter från andra entreprenader. Bygglidarna ansåg att kontrollprogrammet bör motivera varför sprutbetongbågarna ska installeras samt även redovisa alla arbetsmoment som ska verkställas innan sprutbetong får påföras. Även krav på hur sprutbetongen ska utföras, till exempel att s.k. spioner ska användas för att säkerställa att korrekt tjocklek appliceras. Ett kontrollprogram kan öka förståelsen hos entreprenören om varför

bågarna installeras och bygglidarna erhåller ett bra hjälpmedel för att följa upp och eventuellt stoppa entreprenören om kontrollprogrammet inte följs. Det är även viktigt att alla arbetsmoment beskrivs utförligt i den tekniska beskrivningen. Där det saknas specifik kravställning är det svårt för bygglidarna att styra entreprenörerna att utföra arbetet för att installationen av sprutbetongbågarna ska bli så bra som möjligt.

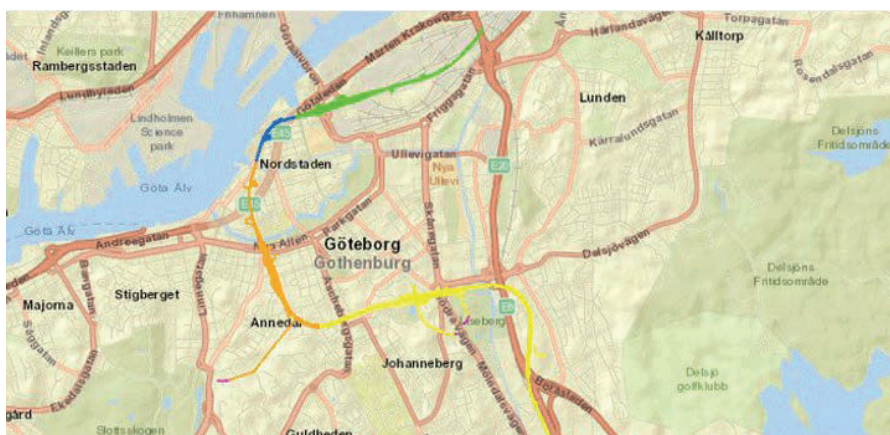
Det måste finnas en förståelse inom tunnelprojekt att det tar tid när sprutbetongbågar ska installeras och att andra faktorer i dessa områden försenar arbetet ytterligare. Till exempel har keminjektering krävts i vissa områden med sprutbetongbågar inom Förbifart Stockholm, på grund av stora inläckage av vatten. Keminjekteringen har utförts innan sprutbetongbågar har kunnat installeras, vilket har påverkat produktionstiden. Eftersom sprutbetongbågarna ofta installeras i områden med sämre bergkvalitet är det också stor sannolikhet för höga inläckage av vatten, vilket ytterligare försämrar drivningshastigheten.

5.3 Västlänken, delprojekt Korsvägen

5.3.1 Bakgrund

I vissa etapper av delprojekt Korsvägen i Västlänken har sprutbetongbågar applicerats som förstärkningsmetod. En djupare studie har gjorts av två av dessa områden, inkluderat dess förutsättningar, vald teknisk lösning och produktionsuppföljning.

Det ena området är beläget i Almedal. Sprutbetongbågarna utgör en tunnelförstärkning för en tunnel med låg bergtäckning under ett brostöd. Det andra området återfinns i Jakobsdal/Skår längre norrut i samma tunnel, belägna vid Västlänkens passage under den befintliga Gårdatunneln.



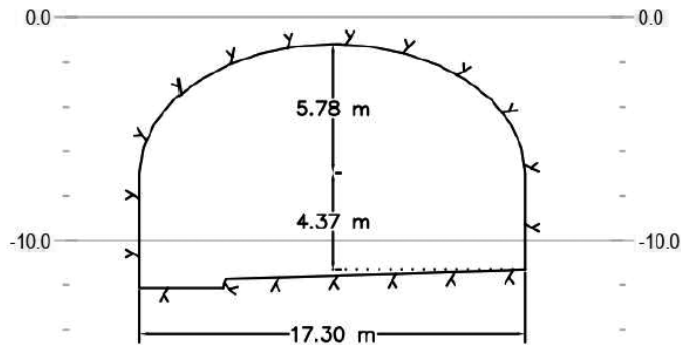
Figur 24. Översikt över Västlänksprojektet, deletapp Korsvägen markerat i gult (Trafikverket, 2024b).

5.3.2 Förutsättningar och förväntat beteende hos bergmassa

Almedal

Spårtunneln i Almedal är generellt 14,9 m bred och ungefär 9 m hög. Vid passage under brostödet i Almedal, km 462+510 – 462+520, har tunneln utökats ytterligare 1,2 m för att ge utrymme till en betonglining och sprutbetongbågar. Spännvidden under brostödet är därmed 17,3 m.

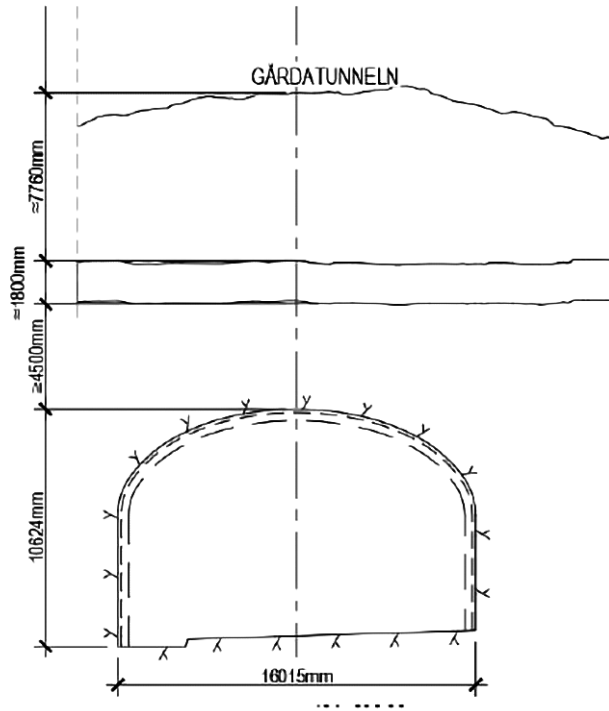
Enligt undersökningar utförda vid påslaget i Almedal påvisades bergkvaliteten vara generellt mycket bra ($Q_{bas} > 10$) eller bra ($4 < Q_{bas} \leq 10$) samt en del av acceptabel kvalitet ($1 < Q_{bas} \leq 4$). Bergtäckningen bedömdes vid sonderingar vara som lägst 2,8 m.



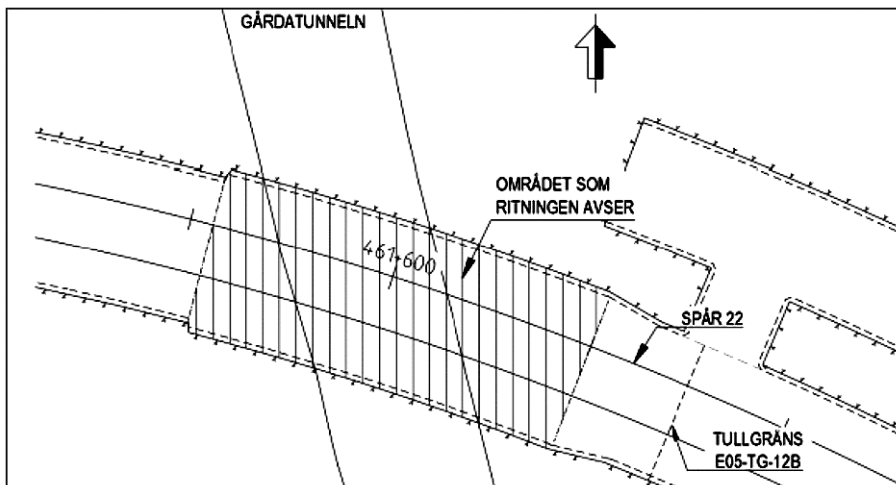
Figur 25. Tvärsnitt i spårtunnel Almedal under brostödet (Berglind-Eriksson, 2024b).

Passage under Gårdatunneln

Bergkvaliteten i området är karterad till $Q_{bas} = 4-10$ och vertikalt avstånd mellan Gårdatunneln och Västlänkens tunnlar uppskattades till som minst 4,5 m, se Figur 26. I figuren visas även en tvärsnitt av tunneln men ungefärlig bredd 16 m. Området för var sprutbetongbågar har projekterats kan ses i Figur 27.



Figur 26. Tvärsnitt vid passage med lägst antagen bergtäckning mellan Västlänken och Gårdatunneln (Petkov, 2022).



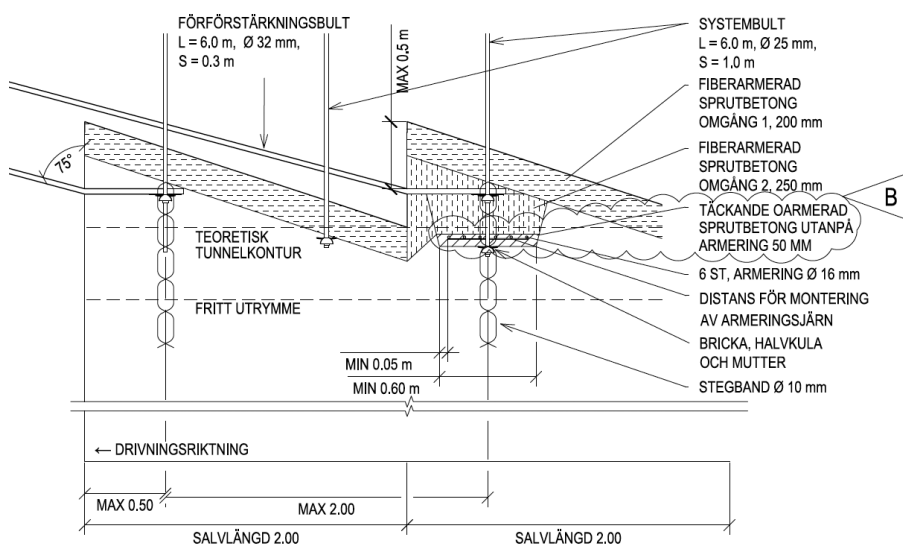
Figur 27. Sprutbetongbågar vid passage under Gårdatunneln (Johansson, 2023).

5.3.3 Teknisk lösning

Almedal

Anvisade sprutbetongbågar är enkelarmerade bågar med 6 armeringsjärn (diameter 16 mm) och totalt 500 mm sprutbetong, se Figur 28. Första 450 mm utgörs av fiberarmerad sprutbetong och yttersta 50 mm av oarmerad sprutbetong.

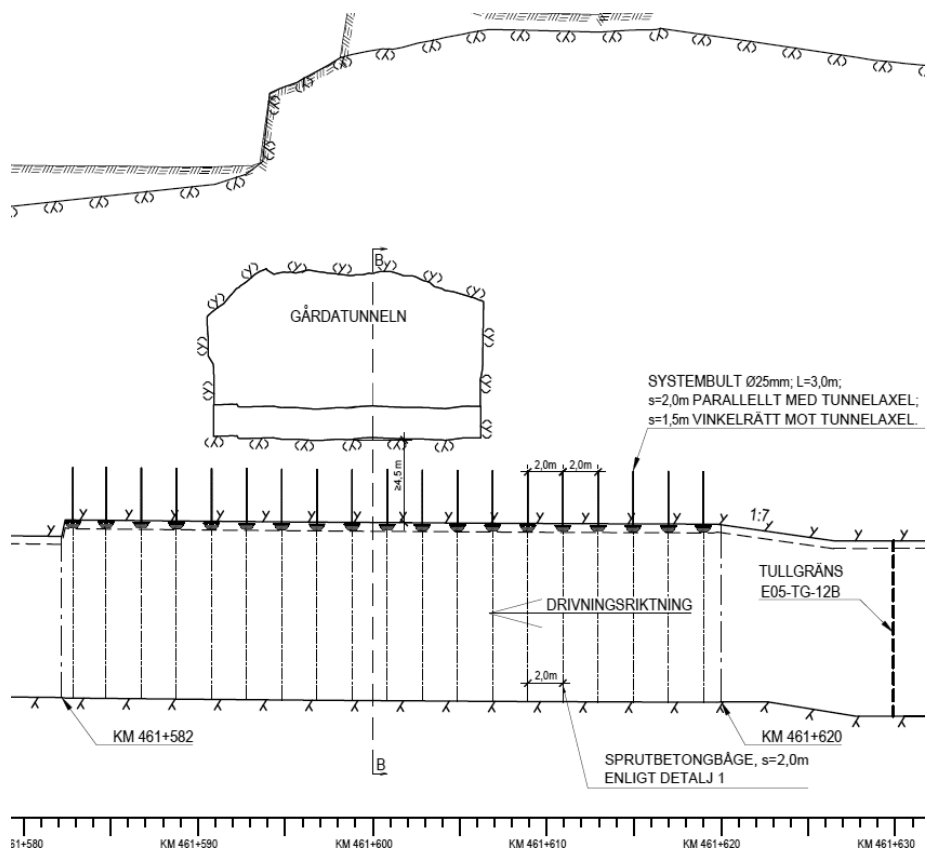
Utjämningsstrutning förordas vid lokala bergutfall och ett krav ställs på att bågar ska ha en jämn valvform. En maximal tolerans för armeringen sattes till ± 30 mm. Dock tilläts förflyttning av bågen med maximalt 0,5 m för att erhålla bättre möjligheter att uppfylla valvformen.



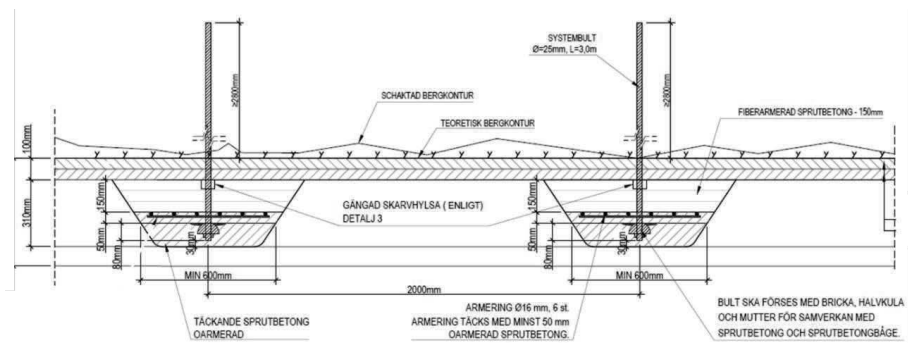
Figur 28. Utformning sprutbetongbågar vid Almedal (Hagberg, 2016).

Passage under Gårdatunneln

Vid passagen under Gårdatunneln bedömdes bergtäckningen vara mindre än 4,5 m. De aktuella sprutbetongbågarna applicerades vid den passagen samt ca 10 m åt vardera håll i tunnelriktningen, se Figur 29. Sprutbetongbågarna är enkelarmerade med sex armeringsjärn och har en total tjocklek på 410 mm, se Figur 29. Närmast tunnelkonturen har 100 mm sprutbetong anvisats längs med hela sträckan fortsatt av uppbyggnad av ytterligare 310 mm sprutbetong för bågar med cc-avstånd 2 m. En ritning över sprutbetongbågarna kan ses i Figur 30. Bågarna utgörs initialt av 250 mm fiberarmerad sprutbetong, ner till läget för armeringsjärnen. Fortsatt efter montering av järnen anvisades ytterligare 160 mm oarmerad sprutbetong.



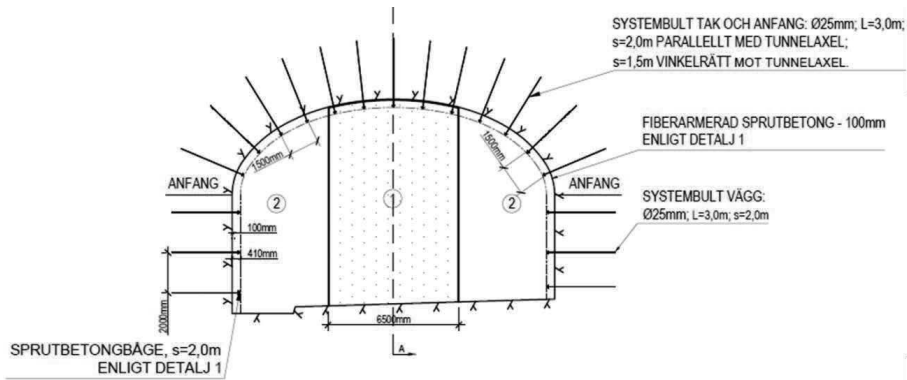
Figur 29. Läge sprutbetongbågar i Jakobsdal/Skår vid passage under Gårdatunneln (Hagberg, 2017).



Figur 30. Dimensioner och armeringsanvisningar för sprutbetongbågarna (Hagberg, 2017).

Samtliga bågar har projekterats att anläggas mot en rensad bergbotten och ska fästas i berget med bergbult. Maximal salvlängd har satts till 2 m och bergschakt ska utföras med pilot och sidostrossar enligt Figur 31.

Beskriven design har bedömts giltig i området för $Q_{bas} > 4$, minst 4,5 m bergtäckning samt inga förekommande svaghetszoner med leromvandling eller krossat material i större utbredning än 0,1 m.



Figur 31. Övriga förstärkningsanvisningar och pilot- och strossningsanvisningar (Hagberg, 2017).

5.3.4 Metod för att verifiera teknisk lösning

Almedal

Den storskaliga stabiliteten verifierades genom numeriska analyser i *Plaxis* (Bentley, 2024a). Bergkvalité och sprickor i analyserna bedömdes utifrån utförda kärnborringar. Laster på området med låg bergtäckning utgjordes av en konservativt bedömd last från brostödet och två olika spänningsfall studerades.

Då modellen i fråga är en 2D-modell har en ekvivalent tjocklek av sprutbetongbågen bestämts för att ta hänsyn till att bågarna inte kan modelleras med visst cc-mått. Då planerat cc-avstånd var 2 m och tjocklek 0,55 m beräknades ekvivalent tjocklek enligt ekvation 16. Sprutbetongbågarna modellerades genom användande av elastiska beam-element i tunnelväggar och tak.

$$t_e = \frac{A_s}{s} = \frac{0,55}{2} = 0,275 \text{ m} \quad [16]$$

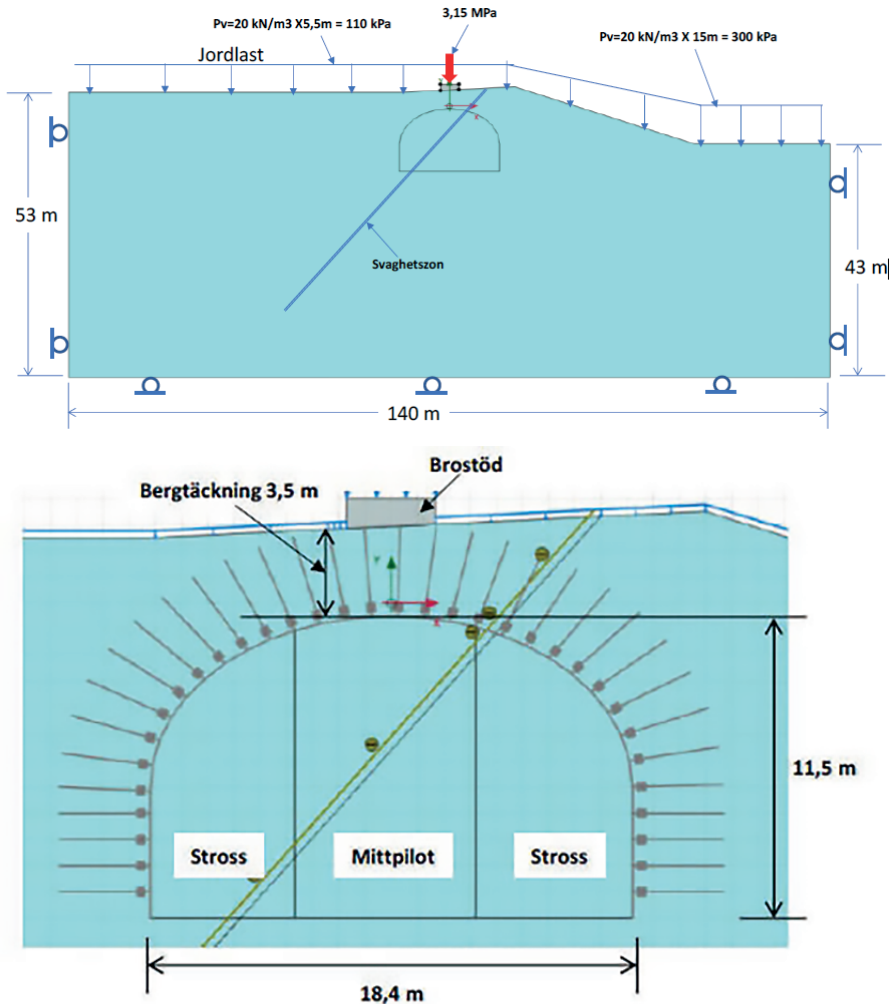
där

t_e = ekvivalent tjocklek,

A_s = bågtjocklek och

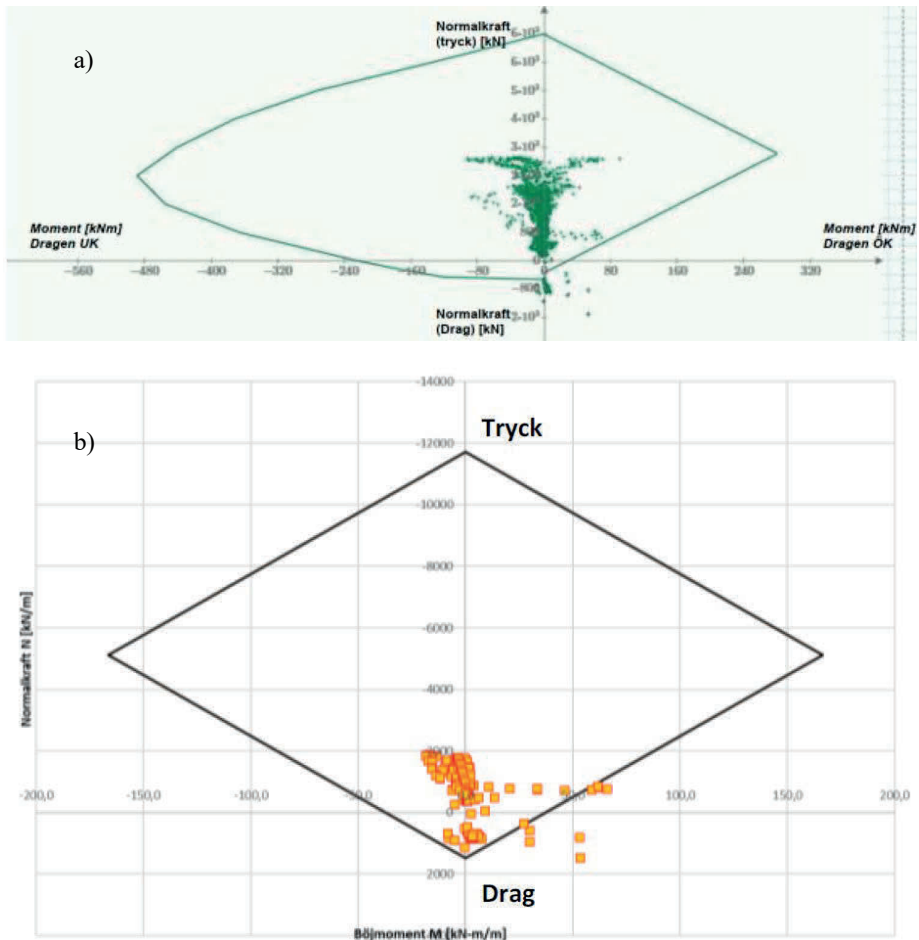
s = cc-avstånd.

För att modellera effekterna av krympsprickor avlägsnades sprutbetongelementen som har störst dragnormalkrafter eller ogynnsamma böjmoment. Det innebär i praktiken att sprutbetongbågen inte har någon bärförmåga vid de ställen där elementen är avlägsnade.



Figur 32. Uppbyggnad av numerisk modell (Berglind-Eriksson, 2024b).

Resultaten för modellen oförstärkt indikerade taktörelser omkring 8 mm, vilket minskades till 2,6 mm vid analys med förstärkning. Lasterna jämfördes mot M-N diagram motsvarande bågarnas hållfasthet med lösjärnsarmering respektive fiberarmerad sprutbetong. Figur 33 visar att relativt få punkter var utanför gränserna. En motsvarande beräkning gjordes i ytterligare ett tvärsnitt med liknande resultat.



Figur 33. M-N-diagram för a) lösjärnsarmerad sprutbetongbåge och b) sprutbetongbåge med fiberarmering (Berglind-Eriksson, 2024b).

Passage under Gårdatunneln

För kontroll av den storskaliga stabiliteten och deformationer i bergmassan mellan Gårdatunneln och Västlänken har 3D-numeriska beräkningar utförts med kontinuummodeller i *Plaxis* (Bentley, 2024a). I modellen modellerades dock enbart bultförstärkningen och inte sprutbetongbågarna.

Deformationerna som uppstod i modellen bedömdes vara acceptabla då de beräknade vertikala deformationerna i Gårdatunneln vid uttag av Västlänken förväntades bli ca 2 mm (utan sprutbetongbågarna). Då situationen enbart bedömdes förbättras med ytterligare förstärkning gjordes ingen ytterligare numerisk analys.

5.3.5 Utförande och uppföljning

Almedal

Totalt sattes 22 sprutbetongbågar vid passagen i Almedal och arbetet tog ungefär 1 års tid. All drivning gjordes med pilot och stross med salvlängd 2 m vilket i kombination med båginstallationen saktade ner produktionen kraftigt. På grund av den korta salvlängden hamnade bågarna nära stuff, vilket försvårade arbetet. Utöver det installerades även 60 spilingbultar vid varje salva, vilket också var tidskrävande. Inledningsvis hade man även en del problem med luftfickor bakom armeringsjärnen, men när entreprenören hade erfarenhet av att bygga de första bågarna med tiden minskade den problematiken.

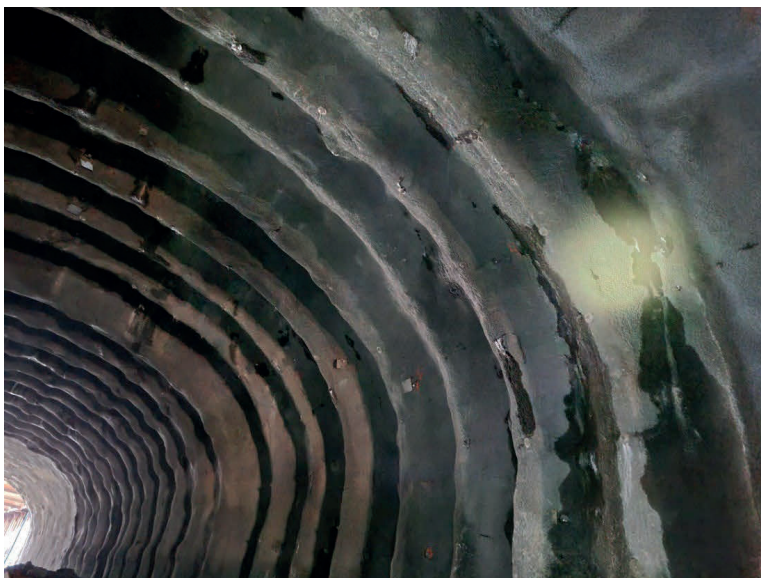
För passagen var även en kompletterande platsgjuten lining projekterad då sprutbetongbågarna initialt inte ansågs kunna utgöra permanent förstärkning. Dock justerades detta under byggtiden och sprutbetongbågarna räknades in i den permanenta förstärkningen, vilket gjorde att liningen togs bort ur handlingen.

I handlingarna (Hagberg, 2016) anvisades konvergensmätningar maximalt en salvlängd bakom stuff. Mätningarna gjordes varannan meter vid det främsta intresseområdet och sedan fortsatt var fjärde meter i anslutande områden. Resultaten från konvergensmätningarna visade på mycket små rörelser (< 2 mm). Applicerade extensometrar visade på en maximal sättning på 0,5 mm (Berglind-Eriksson, 2024a). Okulär kontroll av förstärkningen under byggtiden anvisades också. För sprutbetongbågarna gällde detta framför allt kontroll av synliga öppna sprickor.

Fotografier av de färdiga sprutbetongbågarna från ett studiebesök 2024-02-29 kan ses i Figur 34 och Figur 35.



Figur 34. Foto av sprutbetongbågar i Almedal, 2024-02-29.



Figur 35. Foto av sprutbetongbågar i Almedal, 2024-02-29.

Passage under Gårdatunneln

Vid samma tillfälle som besöket vid Almedal gjordes även en visit vid sprutbetongbågarna vid passagen vid Gårdatunneln. Sprutbetongbågarna vid passagen i Gårdatunneln har ett något annorlunda utseende än bågarna i Almedal vid jämförelse av Figur 35 (Almedal) och Figur 36 (Passage Gårdatunneln). Detta bedömdes av bygglidningen bero på att det var två olika entreprenörer som utförde arbetena. Bågarna vid Gårdatunneln hade överlag en mindre jämn bågform och var istället fyllda med större mängd sprutbetong mellan bågarna.

Antalet bågar vid passagen minskades ner något jämfört mot projekterad lösning då bergmassan längs hela passagen var i bergklass 1–2 ($Q_{bas} > 4$). Övrigt arbete har skett enligt handling.



Figur 36. Foto från platsbesök, 2024-02-29.

6 DISKUSSION KRING DIMENSIONERING

6.1 Nomenklatur och rådgivande dokument

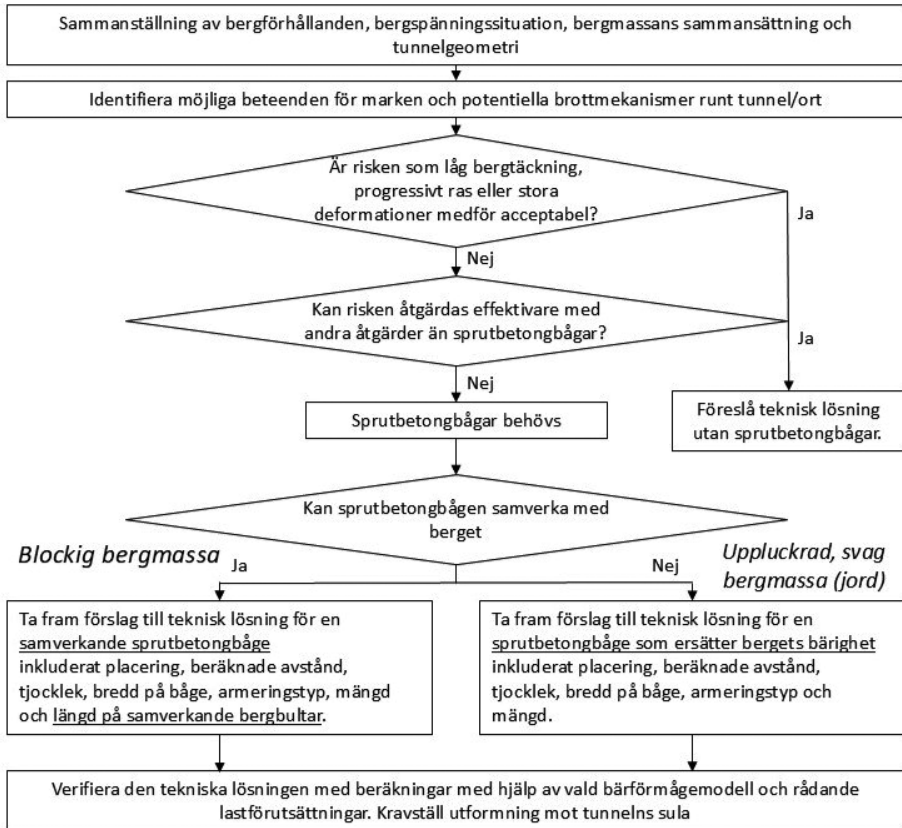
För begreppet sprutbetongbågar verkar branschen överlag vara överens om att det innebär ett förstärkningselement som är begränsat i tunnelns längdled samt utgörs av sprutbetong kombinerat med någon typ av armering. Varken litteraturstudien eller intervjuerna påvisade att man varierade vilken nomenklatur som används oavsett om bågen i fråga är fiberarmerad, lösjärnsarmerad eller nätarmerad. Däremot var det få bland de intervjuade personerna som ansåg att gitterbågar bör definieras inom begreppet sprutbetongbåge utan bör snarare vara en egen, separat typ av förstärkningselement.

I det nuvarande svenska rådgivande dokumentet Projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019) finns inga givna beräkningssätt eller rådgivning för hur man ska arbeta med dimensionering av sprutbetongbågar. Varken någon typ av stöd vid lastbestämning eller för kapacitetsberäkning för sprutbetongbågen anges i dagsläget i dokumentet. Vid diskussion med projektörer framgår att man inte utgår ifrån en gemensam strategi för dimensioneringsarbetet utan varje enskild bergkonstruktör jobbar enligt de sätt som den själv bedömer som mest lämpliga. Ett fåtal av de intervjuade personerna uppskattar den typen av frihet i sitt projekteringsarbete, men majoriteten önskar ett utökad stöd i form av någon typ av rådgivande dokument. I dokumentet bör grundprinciperna för lastbedömning och dimensionering av en sprutbetongbåge beskrivas, utan att bli en standard med fastställda riktlinjer och detaljerade steg.

6.2 Flödesschema för övergripande principer

I Projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019) presenteras ett principiellt flödesschema (Figur 5) vid dimensionering med sprutbetongbågar. Där beskrivs att sprutbetongbågar blir aktuellt när någon eller några av följande faktorer är aktuella, (i) liten bergtäckning, (ii) till större del lös/trasig bergmassa, och (iii) breda krosszoner. Några närmare detaljer av hur dessa faktorer definieras beskrivs dock inte, vilket leder till att bedömningen hos projektörer varierar. Något tydligt flödesschema för beslutsfattande kring installation av sprutbetongbågar är inte något som de intervjuade projektörerna känner till. Förslaget ligger initialt hos den enskilde projektören och fortsatt att beslutas och godkännas av beställaren.

Den utförda genomgången i detta arbete visar att det finns några övergripande principer som bör användas vid dimensionering av sprutbetongbågar på liknande sätt som föreslagits för spiling (Edelbro m.fl., 2023). De övergripande principerna illustreras i Figur 37 och parallellt med principerna utförs en riskbedömning för alla steg. Principerna har bland annat beskrivits av Palmström och Stille (2007) och Stille och Palmström (2008).



Figur 37. Förslag övergripande principer vid dimensionering av sprutbetongbågar i projekteringskedje.

Vid all bergmekanisk dimensionering krävs en förståelse kring vilket beteende som bergmassan kan förväntas uppvisa vid drivningen av tunneln. Detta beteende beror på en kombination av bergmassans sammansättning, förhållanden i bergmassan och tunnels egenskaper. Förhållanden i bergmassan som måste beaktas är bl.a. grundvattenförhållanden, bergtäckning, spänningsförhållanden och orientering av sprickgrupper i förhållande till tunnelns orientering. Egenskaper hos tunneln som måste beaktas är bl.a. dess storlek och utformning.

I realiteten måste valet av förstärkningsinsats baseras på riskbedömning för utfall eller ras i tunneln. Riskbedömningen ser olika ut beroende på vad man bedömer blir konsekvenserna av ett utfall eller ras. Till exempel i kritiska tunnelpassager i infrastrukturbranschen eller inom viktig infrastruktur i gruvbranschen kan man få mycket stora konsekvenser vid ett ras. I det fall som risken för ras bedöms vara oacceptabel behöver en mer robust förstärkning sättas in för att minska risken, där bland

annat sprutbetongbågar kan ingå i kombination med annan förstärkning. Detta beslut, huruvida sprutbetongbågar tillsammans med annan förstärkning behövs eller inte, baseras på förväntat beteende hos bergmassan, tidigare erfarenheter och en ingenjörsmässig bedömning.

Fortsatt när beslut om installation av sprutbetongbågar har tagits behöver utformningen av bågarna beslutas. För utformningen behöver följande kriterier ses över:

- Placering, omfattning och avstånd mellan sprutbetongbågarna. Den totala sträckan för var behovet av sprutbetongbågar ska placeras behöver bedömas, därefter antal bågar som ska installeras med ett visst centrummått.
- Tjocklek och bredd på sprutbetongbågen. Bågens dimensioner är avgörande för dess lastkapacitet.
- Armeringstyp (fiberarmering, lösjärnsarmering, nätarmering). Olika typer av armering ger olika lastkapacitet hos sprutbetongbågen.

Den föreslagna tekniska lösningen bör sedan fortsatt verifieras genom beräkningar innefattande lämpliga antaganden om lastförutsättningar och sprutbetongbågens kapacitet, vilket behandlas närmare i kapitel 6.3. En annan viktig faktor att se över är kravet på valvform för den tekniska lösningen som föreslås. Beroende på tunnelns utformning kommer sprutbetongbågen bli mer eller mindre effektiv. En tydlig valvform är mer fördelaktigt för att öka lastkapaciteten medan ett platt tunneltak kan innebära att stora mängder sprutbetong och armering behövs för att sprutbetongbågsstrukturen både ska kunna hålla upp sig själv samt ta lasten från berget.

En annan viktig faktor som påverkar sprutbetongbågens funktion gäller sprutbetongbågens utformning mot tunnelns sula. Vissa projektörer kravställer i sina handlingar att last måste föras ner till sula medan andra hanterar lasten genom bultning genom sprutbetongbågen in i bergmassan. Hur pass viktigt detta är och hur det påverkar dimensioneringen verkar dock vara något som bedömts som oklart vid utförda intervjuer samt vid litteraturstudien.

När ett slutligt beslut sedan tagits kring sprutbetongbågarnas utformning behöver fortsatt tunnelns dimensioner och planerad uttagningssekvens anpassas så installation av bågarna möjliggörs. Marginalerna i utrymme vid drivning av infrastrukturtunnlar och i vissa fall även orter i gruvbranschen kan vara små och vid installation av sprutbetongbågar kan det finnas ett behov av en utökning. Detta är något som vissa projektörer belyser som en av de stora nackdelarna med bågar som förstärkningsval då förhållandena i tunnlar där behovet finns försämras vid en utökad tunnelprofil.

6.3 Beräkningsmetoder

I projektet har en sammanställning över applicerade beräkningsmetoder gjorts från litteraturstudien, de utförda intervjuerna med projektörer samt med hjälp av studier av

praktikfall där sprutbetongbågar förekommer. Överlag visade studien på en stor bredd bland de metoder som används i branschen för att dimensionera sprutbetongbågar.

Synen hos projektörer gällande val av beräkningsmetoder kan delas upp i två olika grupper, (i) projektörer som förespråkar att arbeta med empiriska och enkla analytiska lösningar vid sin dimensionering, samt (ii) projektörer som förespråkar användandet av numeriska verktyg vid sin dimensionering, i många fall med kompletterande analytiska beräkningar också.

För gruppen som främst arbetar med empiriska och enklare analytiska beräkningar nämns framför allt Q -systemet som det stöd man har i sin dimensionering. Äsikten är att om tunneln i fråga som ska förstärkas omfattas av de rekommendationer som anges i Q -systemet så är det ett tillräckligt underlag för val av förstärkning. Däremot berättar också vissa projektörer att man i brist på bättre underlag ibland tar till med lite extra förstärkning för att kompensera för bristen på beräkningar och ytterligare verifiering av sina lösningar. Enkla analytiska beräkningar är ett exempel på det då man ofta dimensionerar bågar utifrån en väldigt omfattande ovanliggande last, vilket oftast är mycket konservativt antaget.

Bland de som arbetar med numeriska metoder varierar nivån hur pass avancerade analyser man gör. Det kombineras både två- och tredimensionella analyser med olika syften. Vissa projektörer använder de numeriska metoder för att göra en lastbedömning på sprutbetongbågarna, vissa andra för att bedöma en löskärna i bergmassan. Slutligen är det också vissa projektörer som använder det för att direkt dimensionera sprutbetongbågar och optimera en framtagen empirisk lösning. En svårighet som samtliga står inför är bedömningen av kontakten mellan berget och sprutbetongbågen. Hur kontakten ska modelleras och vilka parametrar som ska appliceras är inte uppenbart, men påverkar hur bågen belastas. Många projektörer kombinerar även sina numeriska beräkningar med analytiska kapacitetsberäkningar.

Frågan om vilken dimensioneringsmetodik som är mest lämplig att applicera är en fråga som kräver mer utredning för att bedöma. Mest lämplig metodik bör utvärderas med hänsyn till hur dess resultat påverkar stabilitet, hållbarhet, produktionseffektivitet, arbetsmiljö osv. Ett angreppssätt för att studera detta är att välja ut några praktikfall där man gör beräkningar med några utvalda lämpliga beräkningsmetoder för att bedöma potentiella skillnader i resultaten. I studien bör både lastbedömning och kapacitetsberäkning hos sprutbetongbågarna analyseras. En jämförelse mot empiriska lösningar för val av sprutbetongbågsutformning bör också inkluderas för att studera skillnaderna. En diskussion för vilka fall 3D-beräkningar är ett måste och i vilka fall man kan acceptera 2D-beräkningar bör också hållas. Frågan kring vem som ska arbeta med dimensioneringen, bergkonstruktörer eller betongkonstruktörer, bör också behandlas i utredningen, samt om dimensioneringen hör till betong eller berg och om det är en fristående båge eller en samverkande konstruktion.

6.4 Aspekter vid val av teknisk lösning och utförande

Den initiala frågan som behöver besvaras vid dimensioneringsarbetet är frågan gällande när behovet av sprutbetongbågar faktiskt finns. Den utförda studien har visat att behovsbedömningen varierar kraftigt mellan olika projektörer, vilket till viss del beror på de förutsättningar och krav man har för tunneln som projekteras, men också av projektörens personliga åsikter och erfarenheter av sprutbetongbågar. Åsikterna i branschen kring konceptet med sprutbetongbågar varierar och därmed också beslut i projekt gällande när installationer av dem görs.

I de fall ett beslut gällande dimensionering av bågar tagits behöver man som projektör besluta kring bågens uppbyggnad. Vilken typ av armering som ska användas och bågens dimensioner behöver bestämmas, vilket beror på förväntade laster men ofta också av andra faktorer kopplade till den praktiska genomförbarheten och arbetsmiljön vid installationsarbetet. Olika typer av armering kan vara enklare eller svårare att arbeta med i praktiken och därmed kräva olika utrustning. Tung armering kan också innebära problem ur arbetsmiljöperspektiv.

En annan arbetsmiljöfråga man som projektör behöver beakta vid framtagande av sin lösning är närhet till stuff vid installation. Applicering av lösarmering innebär att människor behöver arbeta i direkt anslutning till områden med dåliga bergförhållanden, både i taket ovanför som ofta enbart är förstärkt med bult och sprutbetong i det skedet samt potentiellt i närhet till den oförstärkta stuffen. Vid val av sin tekniska lösning och uttag- och förstärkningssekvensering bör detta vara en faktor man som projektör tar hänsyn till vid beslut.

Kopplat till vald uttagssekvens och krav gällande installationen av sprutbetongbågar visade studien på att det ofta förekommer problem med utrymme för maskiner om sprutbetongbågen installeras enbart någon enstaka meter bakom stuffen. Då färdiga sprutbetongbågars tjocklek uppgår till flera decimeter kan det försvåra borrhingen av nästkommande salva om de ligger för nära stuffen. Som projektör kan man därför exempelvis sätta krav på olika steg för installationen på bågen som möjliggör fortsatt framdrift innan bågen är helt färdigställd.

Framdriften överlag påverkas kraftigt av att välja sprutbetongbågar som förstärkningsmetod. Då installationen av bågar innefattar många moment så som (i) utfyllnads-sprutning för att nå önskad valvform, (ii) installation av armering, och (iii) succesiv påsprutning av sprutbetong i tunna lager, innebär det en tidskrävande process för entreprenörerna. Detta medför en stor kostnad, vilket bör beakta. I vissa alternativ kan möjligen andra förstärkningslösningar fungera lika bra tekniskt men innebära en mindre kostnad för projektet.

Från de studerade praktikfallen kunde man också konstatera att entreprenörens erfarenhet av installation av sprutbetongbågar hade en tydlig inverkan på resultatet. Kvaliteten på insprutning och bågens utformning samt framdriften förbättrades efter

entreprenörerna färdigställt några bågar. Då bågar inte installeras löpande i alla tunnelprojekt är dock erfarenhetsfrågan hos entreprenörerna något som är svårt att påverka.

För att i slutändan erhålla en sprutbetongbåge av god kvalitet bör även projektören beakta vilka kvalitetskontroller samt övervakning vid utförandet som ska krävas av entreprenören vid utförandet. I branschen finns i dagsläget ingen rutin för hur arbetet med utförandekontroller ska genomföras. Därför kan ett sätt att säkerställa kvalitet vid utförandet vara att ta fram ett tydligt kontrollprogram som stöd i produktionen. Då exempelvis insprutningskvaliteten inte kan inspekteras i efterhand är detta speciellt viktigt för att säkerställa den tekniska livslängden.

6.5 Branschens syn gällande användandet av sprutbetongbågar

Vid de utförda intervjuerna har personerna frågats kring sina generella åsikter gällande användandet av sprutbetongbågar och synen på sprutbetongbågar som förstärkning varierar om man jämför svaren från gruvbranschen och infrastrukturbranschen. Inom vissa gruvor används sprutbetongbågar generellt i mindre omfattning nu än förr, de intervjuade personerna menar på att det finns bättre förstärkningslösningar. Större brytningsdjup och andra spänningsförhållanden innebär att man delvis övergått till andra förstärkningslösningar, som till exempel nätning. Det uppges att installation av sprutbetongbågar historiskt har varit onödigt på vissa ställen, men att bågarna har sin funktion under de rätta förhållandena och att de kan vara bra som nödlösningar vid svåra bergförhållanden. En av de intervjuade personerna tror att en förutsättning man måste ta större hänsyn till för att lyckas med installationen av bågarna är att anpassa designen efter huvudspänningsriktningen, vilket tidigare inte gjorts. Personen upplever att när sprutbetongbågarna har installerats i ortar orienterade i linje med den största huvudspänningen, har bågarna spruckit sönder i anfanget, men att de har hållit bättre i ortar i områden som går parallellt med största huvudspänningen.

Erfarenhet av hur väl sprutbetongbågarna fungerar varierar emellertid mellan olika gruvor. I en annan gruva anses det att sprutbetongbågar är en bra lösning, eftersom en direkt förstärkningseffekt erhålls där sprutbetongbågen installerats. Dock anser de att sprutbetongbågar fungerar upp till en viss gräns, om det uppstår för stora deformationer på för många platser, då tror den intervjuade personen att man behöver överväga att byta till nät och dynamisk förstärkning för att hantera deformationerna. Detta är en lösning på problemet som applicerats i kanadensiska och australiensiska gruvor enligt den intervjuade personen. Personen ansåg att de börjar närma sig den gränsen med deras aktuella brytningsdjup, och det blir alltmer aktuellt att överväga sådana åtgärder.

Bland personer som arbetar inom infrastruktur är man generellt mer positivt inställd till sprutbetongbågar. En beställare på infrastruktursidan tycker att sprutbetongbågar är ett bra alternativ trots att det tar mer tid i produktion och att det kan bli omständligt eftersom bågarna oftast ska installeras tätt bakom tunnelfronten. Om man planerar väl kan en entreprenör ändå ha en bra framdrift.

Projektörer inom infrastruktur tycker att sprutbetongbågar är en bra lösning när man står inför ett berg där man känner osäkerhet och svårigheter med att beräkna om bultar och sprutbetong kommer att vara tillräckligt för att stabilisera berget. Då blir bågen en kompletterande robust lösning. Trots att det kan vara frustrerande för de som utför arbetet och ibland även för beställare och bygglidare på grund av ökade kostnaderna, ger det en trygghet att veta att det är något som kommer att hålla och säkerställa stabilitet i tunneln.

Entreprenörer tycker att sprutbetongbågar är nödvändiga i vissa fall, särskilt när man arbetar under riktigt dåliga förhållanden med mycket låga Q -värden, som till exempel vid projekt Hallandsåsen. Det finns även exempel från Citybanan där sprutbetongbågar har installerats för att bära upp all last ovanför tunneln, vilket också angetts som ett exempel från entreprenörsidan där bågar ansågs nödvändigt. Entreprenören anser att det bör finnas tydliga motiv till varför sprutbetongbågar ska installeras. Det är inte ett arbetsmoment som entreprenörer föredrar att utföra.

En av de intervjuade entreprenörerna tycker att sprutbetongbågar är en ganska bra lösning, även om personen är tveksam till behovet av armering i bågarna och hade gärna sett ett användande av enbart fiberarmerad sprutbetong. Entreprenören i fråga har erfarenhet av att sprutbetongbågar oftast är en temporär förstärkning, innan till exempel en betonglining eller en annan typ av permanent förstärkning anläggs.

7 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Sammanställning av de viktigaste slutsatserna:

- I dagsläget saknas tydliga rådgivande dokument för dimensionering av sprutbetongbågar. Några tydliga flödesscheman för beslut kring om och när sprutbetongbågar ska installeras finns inte. Några riktlinjer om hur själva dimensioneringsarbetet sedan ska utföras framgår inte heller i något rådgivande dokument. Avsaknaden av råd och stöd samt resultatet från de utförda intervjuerna indikerar på att det finns ett behov i branschen av någon typ av rådgivande dokument.
- Baserat på förstudien har ett principiellt flödesschema som bör användas vid dimensionering av sprutbetongbågar tagits fram. Det principiella flödesschemat kan nyttjas som underlag i framtida rådgivande dokument.
- De största utmaningarna vid dimensioneringsarbetet av sprutbetongbågar är (i) bedömning av behovet av sprutbetongbågar som förstärkning, (ii) bedömning av laster och dess verkan på bågarna, (iii) applicering av lämpliga beräkningsmetoder, (iv) kapacitetsbestämning för sprutbetongbågen, och (v) säkerställande av teknisk livslängd.
- För det praktiska utförandet vid anläggande av sprutbetongbågar bedöms de största utmaningarna vara (i) erhållande av god valvform i dåligt berg för att möjliggöra installationen av sprutbetongbågarna, (ii) oförutsedd händelse som medför försämrad framdrift med potentiell ekonomisk påverkan för entreprenören, (iii) upprätthållande av god kvalitet på utförandet i tidspressade projekt, (iv) sprutbetongskuggor vid insprutning, samt (v) arbetsmiljön vid arbete direkt under berg av låg kvalitet.
- Studien påvisade att antaganden projektörer gör i sin projektering av sprutbetongbågar skiljer sig kraftigt, även om bergförhållandena är liknande. Detta gäller exempelvis antaganden om last, beräkningsmetoder och det faktiska behovet av sprutbetongbågar som förstärkningslösning.
- Användandet av empiriska lösningar för dimensionering av sprutbetongbågar förekommer i delar av branschen. Detta trots att nuvarande rådgivande dokument, Projektering av bergkonstruktioner (Trafikverket, 2019), rekommenderar att dimensionering av sprutbetongbågar ska göras numeriskt och analytiskt.
- Användandet av sprutbetongbågar skiljer sig mellan gruvorna och infrastrukturbranschen. I gruvorna går man generellt mot en minskad användning av bågar medan de blir vanligare i infrastrukturbranschen.

Rekommendationer:

- Innan nationella riktlinjer kan tas fram behöver följande analyser göras:
 - Analys av lastbedömning. I dagsläget används många olika metoder för att göra lastbedömningar på sprutbetongbågar. En studie och värdering av skillnaderna mellan de olika lastbedömningsmetoderna rekommenderas.
 - Kapacitetsbedömning hos sprutbetongbågen. Efter en lastbedömning har gjorts behöver fortsatt ett antagande om belastningsfall och kapacitet hos sprutbetongbågen utvärderas. För att göra detta behöver möjliga, realistiska lastfall ses över som kopplas relativt bergets troliga beteende och mekanismer.
 - Analys av faktorer med störst påverkan på sprutbetongbågarnas kvalitet och tekniska livslängd. Kännedom om dessa faktorer resulterar i ett stöd för projektörer att ta fram relevanta kontrollprogram för utförandet.
 - Beräkningsmetoder, vilken nivå på analyserna som rekommenderas för att utföra dimensioneringsarbetet. En jämförelse mellan empiriska, analytiska och numeriska beräkningar bör göras och valda tekniska lösningar och kostnader bör studeras för att bedöma skillnaderna i resultat.
- Det rekommenderas också att ett färdigställt flödesschema tas fram för beslutttagandet kring sprutbetongbågar för att ge en samsyn av användandet och dimensioneringen av sprutbetongbågar i Sverige. Fortsatt arbete medför naturligt revidering och modifiering av de övergripande principerna vid dimensionering som finns presenterade i denna förstudie.
- I de riktlinjer som tas fram bör stöd för framtagande av kontrollprogram vid utförande inkluderas.
- För en bättre förståelse för hur och vilken last som bågarna bär och sprutbetongbågarnas lastbärande förmåga, både direkt och över tid, rekommenderas mätning genom installerade sensorer. Som exempel kan nämnas den väletablerade fiberoptiska instrumenteringen som utförts under lång tid i Sveriges vattenkraft- och dammanläggningar och som likväl kan användas för bågar i tunnlar och orter.

8 REFERENSER

- Bentley. 2024a. *Plaxis, 3D geotechnical engineer software*. Pennsylvania, Bentley Systems inc.
- Bentley. 2024b. *STAAD, 3D Structural Analysis and Design Software*. Pennsylvania, Bentley Systems inc.
- Berglind-Eriksson, M. 2024a. *BBP04-17-025-0700-0094 Tekniskt PM Bergteknik Bilaga 94, Betonglining Brostöd O1020, Kallebäckbron*. Rapport Tyréns/Trafikverket, version .1, 2024-01-29
- Berglind-Eriksson, M. 2024b. *BBP04-17-025-0900-0064 Tekniskt PM bergteknik bilaga 65: Påslag Almedal: Kompletterande beräkningar sprutbetongbågar*. Rapport Sweco/Tyréns/Trafikverket, version -, 2024-02-02.
- Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B. & Hoek, E. 1983. *Ground response curves for rock tunnels*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division **109 (1)**, 15–39.
- Carranza-Torres, C. & Diederichs, M. 2009. *Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets*. Tunneling and Underground Space Technology **24**, p 506 – 532.
- Dahlberg, K. 2024. Personlig kommunikation.
- Edelbro, C., Perman, F. & Johansson, F. 2023. *Spiling i tunnlar – en förstudie*. BeFo rapport 241.
https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/5799/Rapport_241_BeFo.pdf
- Einstein, H.H. & Schwartz, C.W. 1979. *Simplified analysis for tunnel supports*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division **104 (4)**, 499–518.
- Fisher, M. & Hofmann, M. 2015. *Reinforced Shotcrete with Bar Diameters up to 32mm*. ICE Publishing.
- Grimstad, E. & Bhasin, R. 2002. *Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption*. NGI report, January 2002.
- Grimstad, E., Tunbridge, L., Bhasin, R. & Aarset, A. 2008. *Measurements of forces in reinforced ribs of sprayed concrete. Why do we use cast concrete lining when ribs of sprayed concrete have a large margin? Fjellsprengningsteknikk— bergmekanikk— geoteknikk, Oslo, November 20–21, 2008*
- Günther, D., Edelbro, C., Oisalu, O. & Hortberg, S. 2024. Aktiv designprocess vid drivning av bergrum för en vattenreningsanläggning. *Bergdagarna 2024 (Stockholm, 19-20 mars, 2024)*. Stockholm, Svenska Bergteknikföreningen.
- Hagberg, A. 2016. *Ritning E00-17-300-0000-005*. Trafikverket/Tyréns, Version B, 2022-04-20.
- Hagberg, A. 2017. *Ritning E05-17-300-0800-040*. Trafikverket/Tyréns, Version B,

- 2022-09-15.
- Hanafy, E. A. & Emery, J. J. (1980). Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement. Ground Movements and Structures. *Proceedings of the 2nd International Conference on ground movement*.
- Hewett, B.H.M. & Johannesson, S. 1922. *Shield and Compressed Air Tunnelling*. McGraw-Hill, New York.
- Itasca, 2024a. **FLAC 9.2 Fast Lagrangian Analysis of Continua**. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
- Itasca, 2024b. **UDEC 7.0 Distinct-Element Modeling of Jointed and Blocky Materials in 2D**. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
- Itasca, 2024c. **3DEC 9.2 Distinct-Element Modeling of Jointed and Blocky Materials in 3D**. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
- Johansson, F. 2023. *Tekniskt PM Bergteknik Bilaga 76, Passage under Gårdatunneln*. Trafikverket/Tyréns, BBP04-17-025-0800-0076, Version A, 2023-10-10.
- Kaiser, P.K. & Barlow, J.P. 1985. *Rational assessment of tunnel liner capacity*. Department of Civil Engineering, University of Alberta.
- Komselis, C., Blayney, N. & Hindle, D. 2005. *The use of lattice girders in the construction of tunnels*. London, UK: London mining and Mineral Consultants LTD.
- Lundman, P. 2022. *Ritning 300B2476*. Trafikverket/ÅF, Version 1, 2022-05-18.
- Marklund, S. 2022. *Design of reinforced shotcrete arches in rock tunnelling projects*. MSc Thesis in Infrastructure and Environmental Engineering. Department of Architecture and Civil Engineering. Chalmers University of Technology.
- NGI (Norwegian Geotechnical Institute). 2015. **Using the q-system: Rock mass classification and support design**. Handbok.
- Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. 2008. **Tung bergsikring i undergrunnsanlegg**. Håndbok Nr 05, Januari 2008. ISBN 978-82-92641-09-5.
- Olsson, R. 2021. *Reinforced Ribs of Shotcrete (RRS) as Permanent Rock Support – Development and Recent Experience*. Presentation material, NGI.
- Palmström, A. & Stille, H. 2007. Ground Behaviour and Rock Engineering Tools for Underground Excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 363-376. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.006>.
- Petkov, M. 2022. *Tekniskt PM Bergteknik Bilaga 76.1 – Numerisk beräkning passage under Gårdatunneln*. Trafikverket/Tyréns, Version -, BBP04-17-025-0800-0077, 2022-09-15.
- Radoncic, N. 2016. *FSE209 Bergtunnlar Skärholmen: PM Bilaga 17 Weakness zone, HT incl. ELDU 26X och 26G*. Rapport Amberg Engineering, Version -, 2016-03-

17.

- RocScience, 2024. **RS2. 2D finite element software**. Toronto: Rocscience Inc.
- Saiang, D. & Nyström, A. 2020. **FLAC3D modelling of rock support arches**. Applied Numerical modelling in Geomechanics 2020, paper: 16-02, Itasca International, ISBN 978-0-9767577-5-7
- Singh, B. & Goel, R.K. 2011 *Engineering Rock Mass Classification*. Elsevier Inc. Publication, Amsterdam, 364 p
- Schulze, H. & Duddeck, H. 1964. *Statische Berechnung Schieldvorgetriebener Tunnel (Structural Analysis of Tunnels Excavated With Shield Support)*. Beton und Monierbau AG, pp. 87–114.
- Stille, H. & Palmström, A. 2008. Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, pp. 46–64.
- Terzaghi, K. 1946. *Rock defects and loads on tunnel supports*. In: Proctor, R.V., White, T.L. (Eds.), *Rock Tunneling With Steel Supports*. Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, OH, pp. 17–99.
- Trafikverket. 2019. **Projektering av bergkonstruktioner**, publikation 2019:062.
- Trafikverket. 2024a. *Våra projekt: E4 Förbifart Stockholm*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-stockholms-lan/e4-forbifart-stockholm/>
- Trafikverket. 2024b. *Våra projekt: Västlänken*. Hämtad från <https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/vastlanken/>



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773