

Simon Hamre Anderssen

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Simon Hamre Anderssen

Sprøytebetong til bergsikring ved tunneldriving

Produksjonskapasitet

Januar 2022



Kunnskap for en bedre verden

Sprøytebetong til bergsikring ved tunneldriving

Produksjonskapasitet

Simon Hamre Anderssen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Januar 2022

Hovedveileder: Amund Bruland

Medveileder: Vegard Olsen

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Sammendrag

Helt siden år 2000 har produktiviteten i bygg- og anleggsvirksomheten falt.

Byggenæringen står ovenfor mange av fremtidens lokale og globale utfordringer, hvor en av dem er klimatilpasning. Det vil si at bedrifter må kunne imøtekomme det grønne skiftet, og samtidig opprettholde økonomisk vekst. Produksjonen av byggematerialer står for rundt 2/3 av klimagassutslippet i anleggsfasen for norske veianlegg. Betong er ett av dem, der det finnes et stort potensial for redusering av forbruket. Masteroppgaven har i hovedsak tatt i bruk forskningsmetoder som litteraturstudie, casestudie, tidsstudie og dokumentstudie. Dette for å undersøke dagens bruk av sprøytebetong ved tunneldriving og utviklingen innen temaet.

På bakgrunn av dette er derfor følgende forskningsspørsmål etablert:

1. Hvordan benyttes sprøytebetong ved tunneldriving i dag?
2. På hvilke måter kan en beregne produksjonskapasiteten?
3. På hvilke måter dokumenteres sprøyteprosessen?

Masteroppgaven er utarbeidet ved både kvalitative og kvantitative metoder for å undersøke temaet. Førstnevnte metode inkluderte en litteraturstudie på blant annet tunneldriving, sprøytebetong, produksjonskapasitet, robotisering og laserskanning. Det er foretatt casestudie hos det pågående tunnelprosjektet; E16 Bjørum – Skaret, som inkluderer 3 tidsstudier i Sollihøgdatunnelen. Det tilrettela for en dokumentstudie til beregninger av sprøytekapasiteter basert på 132 sprøyterapporter fra samme tunnel.

Avgrensningene i masteroppgaven begrenses av forskningsspørsmålene, den norske tunnelbransjen, konvensjonell tunneldriving og sprøytebetong ved bruk av våtmetoden til permanent bergsikring.

Resultatene viser at sprøytebetongen påføres ved bruk av en sprøyterobot ved konvensjonell tunneldriving. Mengdeberegningen i forkant av sprøyt, beregnes basert på areal, fjellfaktor, tykkelsesmålinger og andre spesielle forhold. Det oppfordres til et samarbeid ved bestilling av betong, mellom sprøyteoperatør og innkjøper av betongen.

Den norske tunnelarbeideren arbeider på akkord, og derfor er produktivitet et essensielt tema. Brutto sprøytekapasitet for tidsstudie I, II og III ender på 12.1 m³/t, 13.0 m³/t og 8.2 m³/t. Netto sprøytekapasitet påvirkes i større grad av sprøyteproblemer enn brutto sprøytekapasitet. Dette på grunn av at påføringen skjer bortimot kontinuerlig uten stans, under førstnevnte sprøytekapasitet.

Ved sammenligning av produksjonskapasiteten for salvesprøyt fra masteroppgaven og tidligere enhetstall fra NTNU, viser det seg at sistnevnte er utdatert. Det oppfordres til å ta i bruk en verdi på 0.1 h/m³ som gjeldende enhetstall. På denne måten viser det at produksjonskapasitet for påføring av sprøytebetong har hatt en økning. Denne endringen vil føre til en reduksjon av betongforbruk, som igjen leder til økt bærekraft i sprøyteprosessen.

Masteroppgaven antyder at laserskanning bør implementeres i sprøyteprosessen for å beregne tykkelse og volum til påført sprøytebetong. I tillegg vil sprøytingen muligens gå helt over til en automatisert påføring. Dersom disse endringene blir standard prosedyre, er det også grunn til å tro at dokumentering for sprøyting skjerpes.

Abstract

Since year 2000, productivity in the construction industry has fallen. The construction industry face many of the future's local and global challenges, where one of them is climate adaption. This means that companies must be able to adapt to the green transition, in addition to maintaining economic growth. The production of building materials accounts for roughly 2/3 of the greenhouse gas emmisions in the construction phase for Norwegian road construction. Concrete is one of them, which there is a great potential for reducing consumption. This master's thesis has mainly used research methods such as literature study, case study, time study and document study. This contributes to investegate the current use of shotcrete in tunnel excavation and development within the topic. Therefore, the following research questions have been established:

1. How is shotcrete used in tunnelling today?
2. In what ways can the production capacity be calculated?
3. In what ways is the spraying process documented?

This master's thesis has been prepared using both qualitative and quantitative methods to investigate the topic. The qualitative method contained the use of a literature study on, among other things, tunnel excavation, shotcrete, production capacity, robotics, and laser scanning. A case study was included which found place at the ongoing tunnel project; E16 Bjørum – Skaret, which includes three time-studies in Sollihøgdatunnelen. It facilitated a document study for calculations of spraying capacities based on 132 spraying reports from the same tunnel. The scope of the study is limited to the research questions, the Norwegian tunnel industry, excavation with drill and blast and shotcrete using the wet mix process for permanent rock stabilization.

Findings show that the shotcrete is applied using a shotcrete robot during excavation with drill and blast. Before the application of shotcrete, the quantity of concrete is calculated based on area, rock factor, roughness factor, thickness measurement and other special conditions. A collaboration between the operator and the purchaser of the concrete is encouraged when the ordering takes place.

The Norwegian tunnel worker gets piecework as payment, and therefore productivity is an essential subject. Gross spray capacity for time studies I, II and III ends at 12.1 m³/t, 13.0 m³/t and 8.2 m³/t. Net spraying capacity is more affected by spraying problems than gross spraying capacity. This is because the application is executed almost continuously without stopping, within the former spraying capacity.

When comparing the production capacity of spraying after a blast between the findings in this thesis and former values from NTNU, it turns out that the latter are outdated. It is encouraged to use a value of 0.1 h/m³ as the current unit time. This means that the production capacity for the application of shotcrete has increased. This change will lead to a reduction in concrete consumption, which in turn leads to increased sustainability in the spraying process.

The master's thesis suggests that laser scanning should be implemented in the spraying process, to calculate the thickness and volume of applied shotcrete. In addition, it is possible that the spraying process will become fully automated. If these changes become the standard procedure, there is also reason to believe that documentation for the spraying process will be strengthened.

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet av undertegnede, ved Institutt for bygg- og miljøteknikk i Trondheim. Den utgjør det avsluttende arbeidet ved masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Masteroppgaven hører til faget TBA4935 – Anleggsteknikk, masteroppgave og fører til graden sivilingeniør. Den er gjennomført høsten 2021 og utgjør 30 studiepoeng.

Valg av tema ble utført på bakgrunn av egen interesse innen tunnelbransjen, i tillegg til en ytring fra hovedveileder. Det innebar et potensiale for utvikling og kommende krav til dokumentering ved bruk av sprøytebetong. Dermed ble masteroppgaven produsert for å kunne tilegne kunnskap både til meg selv og tunnelbransjen.

Jeg vil utrette en stor takk til hovedveileder professor Amund Bruland ved NTNU for ypperlig veiledning underveis. Dette ved å ha blant annet gitt meg tips til aktuelle nøkkelpersoner innen valgt tema. Masteroppgaven ble skrevet hovedsakelig i Stavanger hvor det ble foretatt god tilrettelegging for møter både digitalt i Stavanger og fysisk i Trondheim. I tillegg ble det tildelt støtte til pågående feltstudier fra NFF via Amund og jeg vil av den grunn også rette en stor takk til NFF. I tillegg vil jeg rette en stor takk til medveileder Vegard Olsen fra Forciv Norway AS, som har vist interesse for min masteroppgave og bistått med verdifulle møter underveis.

En stor takk rettes ytterligere til industrikontakt AMV AS for å ha assistert med aktuell informasjon, spesielt rettet mot sprøyteroboten deres. Ettersom det ble foretatt feltstudier på et av tunnelprosjektene hos Skanska vil jeg også utrette en stor takk til dem, som ga oppgaven mer verdi og økt motivasjon. I tillegg rettes det en stor takk til både Entreprenørservice AS og Bever Control AS som har vært meget hjelpelige i form av kunnskap og innsikt i tema underveis.

Til slutt vil jeg utrette en stor takk til samboer, medstudenter og familie for å ha støttet meg gjennom studietiden.

Stavanger, 28. jan 2022

Simon Hamre Anderssen

Simon Hamre Anderssen

Innhold

Figurer	xii
Tabeller	xiii
1 Innledning	15
1.1 Bakgrunn for oppgaven	15
1.2 Formål	16
1.3 Forskningsspørsmål	16
1.4 Avgrensninger	16
1.5 Oppgavens struktur	17
1.6 Begreper og forkortelser	18
2 Metode	19
2.1 Introduksjon	19
2.2 Metoder for datainnsamling	21
2.3 Vurdering av metodene	26
3 Teoretisk rammeverk	29
3.1 Introduksjon	29
3.2 Tunneldriving i Norge	29
3.3 Sprøytebetong ved tunneldriving	33
3.4 Produktivitet	40
3.5 Bærekraft i byggebransjen	43
4 Beskrivelse av casestudie	45
4.1 E16 Bjørum - Skaret	45
4.2 Sollihøgdatunnelen	46
5 Resultater	48
5.1 Introduksjon	48
5.2 FS1: Bruk av sprøytebetong ved tunneldriving i dag	48
5.3 FS2: Produksjonskapasitet til en sprøyterobot ved tunneldriving	51
5.4 FS3: Dokumentering av sprøytebetong ved tunneldriving	63
6 Diskusjon	69
6.2 FS1: Bruk av sprøytebetong ved tunneldriving i dag	69
6.3 FS2: Beregning av produksjonskapasitet	70
6.4 FS3: Dokumentering av sprøyteprosessen	74
7 Konklusjon	79
8 Anbefalinger for videre arbeid	81
Referanser	83
Vedlegg	90

Figurer

Figur 2-1: Illustrasjon over nytte ved behandling av data (Riley, 2021).....	19
Figur 2-2: Validitet og reliabilitet (Varmdal, 2017).....	20
Figur 2-3: Metode for å finne aktuelle databaser (NTNU, 2021).	22
Figur 3-1: Tunnelstatistikk i Norge fra 2011 til 2021 (NFF, 2021).	29
Figur 3-2: Permanent sikring og anbefalinger basert på Q-verdier (NGI, 2015).	31
Figur 3-3: Oversikt over tunnelsyklus ved datainnsamling (Haugen Svendsen, 2020)....	32
Figur 3-4: Hovedkomponenter for en sprøyterobot (Putzmeister, 2015).	35
Figur 3-5: Operatørhytte og sprøytebom med sprøytemunnstykke (NFF, 2019).....	35
Figur 3-6: Eksempel på kontrollsekvenser for tykkelsesmålinger.	38
Figur 3-7: Plassering av skanneapparat på sprøyterobot (Bever Control, 2016).....	39
Figur 3-8: Sprøyteresultat for tykkelse vist med fargekoder (Bever Control, 2016).	39
Figur 3-9: Produktivitet bestemt av input og output (Reserve Bank of Australia, 2021).	41
Figur 4-1: Nordlige og sørlige tunnelløp til Sollihøgdatunnelen sett fra Skaret.	45
Figur 4-2: Oversiktsbilde over E16 Bjørum – Skaret (Statens vegvesen, 2020).	46
Figur 4-3: Normalprofil T9,5 til Sollihøgdatunnelen.	47
Figur 4-4: Sprengstein i form av rombeporfyr fra feltstudie.	47
Figur 5-1: Sprøyterobot på stoff klar til vask av fjell.	49
Figur 5-2: Operatør fra NorBetong kontrollerer lossing av basisbetong.	49
Figur 5-3: Fiberball som ble fjernet fra betongmottak.	50
Figur 5-4: Betongmottaket stappfullt av basisbetong til sprøyterobot.	56
Figur 5-5: Utklipp fra sprøyterapport som illustrerer sprøytetype salve i tunnelprofilet.	59
Figur 5-6: Enhetstall for sprøyting versus verdier fra masteroppgave (NTNU, 1999).	62
Figur 5-7: Tverrsnitt til tunnelstoff generert av punktskyer.	64
Figur 5-8: Bilde tatt av skanner på stoff i Nogvafjordtunnelen av Bever Control.	65
Figur 5-9: Visualisering av sprøyteresultat ved bruk av skanning fra Bever Control.	65
Figur 5-10: Stegene for automatisk påføring av sprøytebetong (Liu <i>et al.</i> , 2021).....	67

Tabeller

Tabell 1-1: Forskningsspørsmål for masteroppgaven.....	16
Tabell 1-2: Forkortelser med tilhørende forklaring.	18
Tabell 2-1: Oversikt over fremgangsmetode for databasene.....	22
Tabell 2-2: Anvendt TONE-prinsipp med innhold for inndelingene (Wiki, 2020).....	23
Tabell 2-3: Datainnsamlingsmetoder anvendt for forskningsspørsmål.....	26
Tabell 3-1: Hovedaktiviteter i en tunnelsyklus (Jernbaneverket, 2018).....	30
Tabell 5-1: Forskningsspørsmål for masteroppgaven.....	48
Tabell 5-2: Nøkkeltall for tidsstudiene I, II og III i Sollihøgdatunnelen.	52
Tabell 5-3: Aktivitetsinndeling for tidsstudiene med tilhørende informasjon.	53
Tabell 5-4: Betydning for fargene i cellene for tidsstudiene.	54
Tabell 5-5: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie I.	54
Tabell 5-6: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie II.	55
Tabell 5-7: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie III.	55
Tabell 5-8: Tidsoversikt for tidsstudier.	56
Tabell 5-9: Nøkkeltall for utførte tidsstudier.	57
Tabell 5-10: Utklipp av utfylt sprøyterapport med informasjon om sprøyting.....	58
Tabell 5-11: Utklipp fra følgeseddel i sprøyterapport med informasjon fra NorBetong....	58
Tabell 5-12: Sprøytekapasitet for sprøyterapporter.....	60
Tabell 5-13: Mengde betong analysert fra sprøyterapporter.	60
Tabell 5-14: Sprøytekapasitet for tidsstudier sett opp mot sprøyterapporter.	61
Tabell 5-15: Verdier som sammenlignes med eksisterende enhetstall.	62

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

SSB (2018) skriver at helt siden år 2000 har produktiviteten i bygge- og anleggsvirksomheten falt med 10 prosent. Sammenlignet med privat sektor har Fastlands-Norge økt med 30 prosent for den samme perioden. Byggutengrenser (2020) mener at på samtlige byggeplasser jobbes det kontinuerlig med å øke produktiviteten gjennom blant annet mer industrialiserte prosesser.

Dersom folk skal fortsette å bo og leve godt må flere ta en del av velstandsutviklingen, mener Byggenæringens Landsforening (2016). Byggenæringen på sin side skal bygge, vedlikeholde og drifte gode, hensiktsmessige, sunne og robuste bygg og anlegg i fremtiden. Derfor innebærer det grønne skiftet å øke verdiskapningen og samtidig føre til mindre miljøbelastninger. Som følge av endringer det grønne skiftet krever, vil det følgelig oppstå store markedsmuligheter for byggenæringen.

NHO-sjef, Kristin Skogen Lund, mener at klimamålene ikke vil bli nådd dersom politikerne fortsetter å implementere det grønne skiftet gjennom å øke avgifter og økonomiske byrder, ifølge Haugan (2016). Det menes derimot at en samkjøring av økonomisk vekst og tiltak mot å nå lavutslippssamfunnet, kan bidra til å nå klimamålene.

Byggenæringens Landsforening (2022) viser til at byggenæringen står ovenfor mange av framtidens lokale og globale utfordringer. En av utfordringene som de må løse er klimatilpasning. Det pekes på det grønne skiftet som innebærer klimanøytrale og miljøvennlige bygg- og anleggsplasser. Av samfunnets miljøpåvirkning og klimautslipp har byggenæringen historisk sett utgjort en betydelig del. De mener nå at dette blir det snart slutt på. Det i form av en stor transformasjon ved å blant annet begrense global oppvarming, redusere klimagassutslipp og effektivisere ressursbruken. I tillegg har det blitt skapt et marked som har startet en trend der løsninger og maskiner utvikles mot et mål om utslippsfrie byggeplasser.

SINTEF (2018) skriver at de arbeider med et forskningsprosjekt som skal gjøre sprøytebetong til et enda bedre alternativ som tunnelkledninger, også med tanke på klimagassutslipp. De viser til at rundt 2/3 av klimagassutslipp i anleggsfasen for norske veianlegg kommer på bakgrunn av produksjon av byggematerialer, hvorav betong er ett en av dem. På denne måten foreligger det er stort potensiale til å oppnå en god klimagevinst ved å redusere materialvolumet, og videreutvikle bruken og egenskapene. Følgelig må miljøbelastningen inn i regnestykket i vurderingen av hvilke metoder som skal anvendes. Umiddelbart ser de at materialutnyttelse og slankere konstruksjoner gir en klimagevinst, men det må samtidig ikke gå på bekostning av kapasiteten til konstruksjonen.

Ifølge Eriksen (2012) peker daglig leder Marius Hauki i Bever Control på at kravene til dokumentasjon stadig øker. Han mener Bever Control henger godt opp mot det som er teknisk mulig å dokumentere. Videre sier han at fordelen med høye krav fra byggherre er at det fører til utvikling av bedre tekniske løsninger hos teknologiselskaper, som i Bever Control.

1.2 Formål

Fordypningsprosjektet som ble utført høsten 2020 bidro til å skaffe oversikt over bruken av ulike anleggsmaskiner ved tunneldriving. Målsetningen med oppgaven baserte seg på å samle inn data som oppdaterer dagens bruk, produksjonskapasitet og dokumentering av sprøyteroboten. Dette innebærer også å utforske hvordan mulige fremtidige metoder knyttet til bruk av sprøytebetong kan anvendes i tunnelbransjen. Hensikten med oppgaven har vært å danne et kunnskapsgrunnlag som kan bistå bransjen med dagens, og potensielle fremtidige bruk. Det vil si at oppgaven kan komme til gode for entreprenører, byggherrer og leverandører.

Formålet inkluderer å kartlegge allerede kjent kunnskap og undersøke det eventuelle eksisterende kunnskapsgapet. Derfor er det valgt å samle inn kunnskap fra flere ulike prosjekter og aktører innen bransjen. På denne måten vil en kunne si noe om hva som bør undersøkes nærmere eller eventuelt endres. Følgelig vil det mer konkret også være mulig å bidra til en oppdatering av dagens enhetstall for produksjon av sprøytebetong ved tunneldriving.

Formålet med masteroppgaven innebærer også å fullføre en integrert 5-årig mastergrad innen Bygg- og miljøteknikk.

1.3 Forskningsspørsmål

I startfasen av masteroppgaven ble temaet endret i form av en tilspising. Det vil si at hensikten var tidligere å fokusere mer på den digitale delen for sprøyteroboten. Temaendringen innebar en endring mer mot den generelle bruken, produksjonskapasiteter og dokumentering av utført arbeid. Dette oppstod på bakgrunn av egen interesse og for å snevre inn temaet.

For å belyse problemstillingen må det settes opp noen forskningsspørsmål, ifølge Arntzen og Tolsby (2010). Disse bidrar til å operasjonalisere problemstillingen og på denne måten gjøre den forskbar. Av den grunn er forskningsspørsmålene konstruert og viser til hva som skal forskes på. Det er produsert tre forskningsspørsmål til masteroppgaven, som også fungerer som en avgrensning i tema ved å unngå et for stort omfang. Forskningsspørsmålene er dannet på bakgrunn av formålet og temaet. Derfor tar oppgaven utgangspunkt i disse som kan sees i Tabell 1-1.

Tabell 1-1: Forskningsspørsmål for masteroppgaven.

Nr.	Forskingsspørsmål
1.	Hvordan benyttes sprøytebetong ved tunneldriving i dag?
2.	På hvilke måter kan en beregne produksjonskapasiteten?
3.	På hvilke måter dokumenteres sprøyteprosessen?

1.4 Avgrensninger

1.4.1 Kontekstuelle avgrensninger

Masteroppgaven bygger videre på fordypningsprosjektet «Bruk av data fra digitale anleggsmaskiner for å måle produktivitet» som er skrevet av undertegnede i faget TBA4570 – Anleggsteknikk, fordypningsprosjekt. Faget består av 7,5 studiepoeng og er utarbeidet høsten 2020.

Masteroppgaven er skrevet for NTNU ved fakultet for ingeniørvitenskap og institutt for bygg- og miljøteknikk i Trondheim i faget TBA4935 – Anleggsteknikk, masteroppgave. Faget består av 30 studiepoeng og omfatter hele høstsemesteret 2021 til starten av vår 2022. Oppgaven er et individuelt arbeid skrevet i tidsperioden 30.09.21-28.01.22 og er skrevet i Stavanger.

1.4.2 Tematiske avgrensninger

De tematiske avgrensningene for masteroppgaven blir i hovedsak definert av de tre forskningsspørsmålene, nevnt i kapittel 1.3.

Masteroppgaven tar i hovedsak og fokuserer på tunneldrivingen som foregår i Norge. Derfor vil prinsippene som inkluderes basere seg på Norwegian Tunneling Method (NTM) fremfor eksempelvis New Austrian Tunneling Method (NATM).

Videre er det valgt å avgrense oppgaven til bruk av konvensjonell tunneldriving, altså med boring og sprengning. Det vil si oppgaven ikke tar for seg bruk av tunnelboremaskin (TBM) som drivemetode. Samtidig er det også valgt å legge frem hele tunnelsyklusen for å kunne forstå hvordan de ulike aktivitetene kan påvirke hverandre.

Casestudie begrenser seg til feltstudier utført hos en totalentreprenør. Denne innebærer også tidsstudier i samarbeid med totalentreprenør og underentreprenør, hvor sistnevnte utførte påføring av sprøytebetong.

Det er valgt å undersøke bruk av sprøytebetong som permanent sikring til bergsikring. Dette kommer delvis på bakgrunn av at sprøytebetong ble anvendt som en del av den permanente sikringen ved tunneldriving under feltstudiene. Dermed vil det ikke foretas undersøkelser av for eksempel vann- og frostsikring hvor sprøytebetong anvendes.

I tillegg er det valgt å ta for seg våtmetoden fremfor tørrmetoden for bergsikring. Dette kommer av at våtmetoden er den som tas mest i bruk ved norske tunnelprosjekter hvor det anvendes en sprøyterobot.

Til tross for de nevnte tematiske avgrensningene, kan en ikke se bort fra at temaene blir nevnt eller drøftet underveis. En kan ikke se bort fra at de temaene som ekskluderes, muligens også kan dra nytte av data anskaffet i denne oppgaven.

1.5 Oppgavens struktur

Masteroppgaven består av totalt 8 hovedkapitler. Hovedstrukturen i oppgaven baserer seg på det anbefalte IMRAD-formatet. Forkortelsen står for «Innledning, Metode, Resultater og Diskusjon», som ofte brukes som hovedstruktur i vitenskapelige rapporter (NTNU, 2013).

Det er også lagt inn et teorikapittel; teoretisk rammeverk som befinner seg mellom metode- og resultatkapittelet. Følgelig er rekkefølgen for kapitlene: 1 Innledning, 2 Metode, 3 Teoretisk rammeverk, 4 Beskrivelse av casestudie, 5 Resultater, 6 Diskusjon, 7 Konklusjon og til slutt kapittel 8 Videre arbeid.

Tekstbehandlingsprogrammet Word er tatt i bruk til utarbeiding av masteroppgaven. Det er tatt i bruk en mal fra NTNU (2022), som gjør at formateringen i masteroppgaven følger deres standard. Det vil si at det er skrifttypen Verdana som anvendes, skriftstørrelse 10 på normal tekst og en linjeavstand på 1,15.

Kildene har blitt behandlet i programvaren EndNote som her står for referansene i litteraturen, altså referanseadministrasjon. Referanselisten er plassert nest sist i oppgaven, rett før vedleggene. Ved å anvende EndNote har det ført til en mer oversiktlig og tidsbesparende prosess ved lagring og bruk av litteratur. Det er tatt i bruk en referansestil laget av NTNU (2017), som er på bokmål og av type Harvard.

Vedleggene er plassert i bunnen av dokumentet. Inndelingen av kapitlene er delt inn i tre underdelinger på formen a.b.c. I tillegg er det lagt til en 4. underdeling, men uten nummerering. Henvisning til figurer og tabeller er på formen a.b og tilhørende figur- og tabelltekst.

I hovedsak er masteroppgaven skrevet for personer som har interesse for anleggsteknikk og kjennskap til tunnelbransjen. Dersom leseren ikke har denne kunnskapen innen faget, vil oppgaven kunne forstås om en leser seg litt opp.

1.6 Begreper og forkortelser

For å skape en gjensidig forståelse av masteroppgaven, er det valgt å inkludere en liste med forklaringer for hovedbegrepene og forkortelser i oppgaven, se Tabell 1-2. Kapittel 3 Teoretisk rammeverk vil videre gjennomgå og illustrere hvordan teori og faguttrykk er knyttet opp mot temaet.

Tabell 1-2: Forkortelser med tilhørende forklaring.

Forkortelse	Forklaring
AMV	Andersen Mek. Verksted
Bakstuff	Arbeid som gjør at en unngår stillstand og heft i fremdriften.
Basisbetong	Sammensetning av betong ved levering til sprøyteutstyr.
Borsynk	Utboret lengde pr. tidsenhet
Drive	Måten en tunnel bygges på
FS	Forskningsspørsmål
Heng	Tak i tunnel
Inndrift	Lengde bergrom drevet. Målt i løpemeter pr. uke
IoT	Internet of Things
Kontur	Tunnelprofil
LiDAR	Light Detection and Ranging
NFF	Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk
NTM	Norwegian Tunneling Method
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
MWD	Measurement While Drilling
Salve	En sprengning ved bruk av sprengstoff.
Stuff	Arbeidsfront/endevegg ved driving av tunnel.
Sprøytebetong	Betong som påføres bergoverflate til bergsikring.
TBM	Tunnelboremaskin
Tidsstudie	Studie utført ved tidtaking for å finne ytelse.
TLS	Terrestrial Laser Scanners

2 Metode

2.1 Introduksjon

Arntzen og Tolsby (2010) skriver at et forskningsresultat ikke nødvendigvis kan betraktes som absolutt sant, men heller kan føre til veien mot en større forståelse. Av den grunn mener de at en forsker må være kritisk til kilder og prøve å planlegge forskningsprosessen opp mot dette.

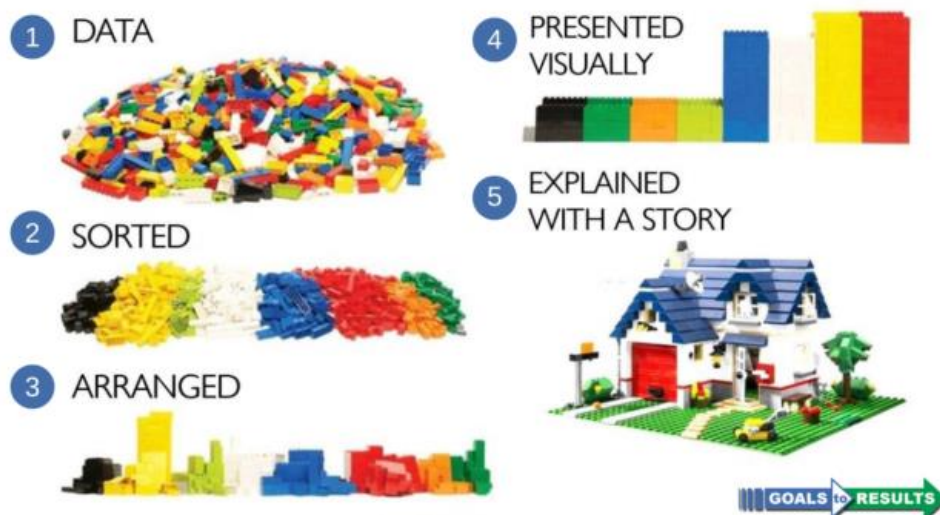
Ifølge Lackner (2021) er forskning å undersøke noe ved bruk av vitenskapelig metode til å bringe frem ny kunnskap. Metodekapittelet inneholder nettopp dette og legger frem hvordan strukturen på forskningen er lagt opp og på hvilke metoder som er tatt i bruk. I tillegg til er det satt opp en evaluering av disse og hvorfor de er valgt til ulik innsamling av data.

2.1.1 Vitenskapelig fremgangsmåte

Arntzen og Tolsby (2010) mener at det å prøve seg på forskning, er en god måte å forstå og anvende teoretisk kunnskap på. Dette ved å være kritisk til forskjellige kilder, bruk av metoder, teorier og forskningsresultat, gjør at en kan styrke egen vurderingsevne og refleksjon. De peker på at når en leser gjennomgår metodedelene til en fagtekst, er det essensielt at den oppleves som pålitelig og at den virker profesjonell. Av den grunn er det valgt å ta i bruk flere ulike kilder og fremgangsmåter for å utføre forskning i masteroppgaven.

Figur 2-1 illustrerer et eksempel på ulike stadier ved behandling av ustrukturert data. Følgelig kan dataene anvendes på ulike måter ettersom hvordan de behandles. Metoden innebærer følgende steg (Riley, 2021):

1. Ustrukturert data
2. Sortert data
3. Strukturert data
4. Presentert visuelt
5. Fortalt i en sammenheng



Figur 2-1: Illustrasjon over nytte ved behandling av data (Riley, 2021).

På samme måte som ovenfor, er data samlet inn og behandlet, strukturert og presentert på en måte slik at den er sammenlignbar med annen litteratur og forskning. Dette gjelder spesielt utføring av dokumentstudie med en analyse av sprøyterapporter, som vil forklares videre i kapittel 2.2.4.

2.1.2 Kvalitativ og kvantitativ metode

Ifølge Grønmo (2020a) brukes både kvalitative og kvantitative metoder til forskningsmetoder. Disse metodene kan kombineres og utfylle hverandre dersom en tar i bruk triangulering som vil beskrives videre i kapittel 2.2.6. Det vises til at kvalitativ metode anvendes ved analyse og innsamling av kvantitativ data. Disse forekommer oftest i form av tekst. Derimot er kvantitativ metode en forskningsmetode som brukes ved innsamling av tall eller andre datamengder (Grønmo, 2020b).

Grønmo (2020a) skriver at kvalitativ metode ofte omfatter et par enheter, mens i noen tilfeller bare én, som i casestudie. Formålet med kvalitative studier er å foreta en helhetlig forståelse og dybdekunnskap av utvalgte sammenhenger, eller å utvikle blant annet kategorier og begreper. Kvalitative studier kan også utføres for å danne en teoretisk generalisering.

Ifølge Grønmo (2020b), innebærer kvantitative metoder ofte mange enheter, hvor studiene baserer seg på et utvalgt datasett for hver enhet. Det vil si at analysen kan basere seg på hvor mange enheter som innebærer hver av verdiene for de forskjellige variablene.

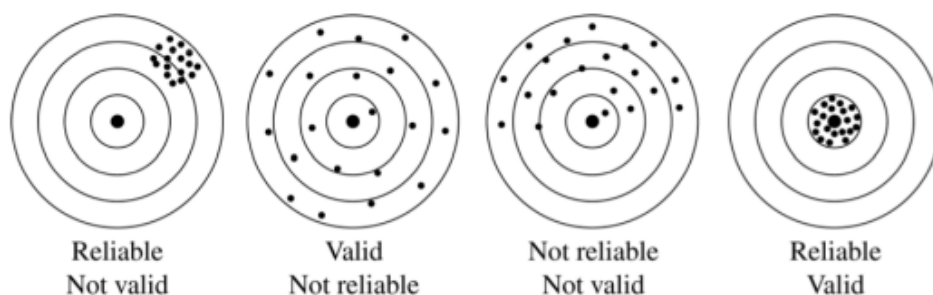
På bakgrunn av masteroppgavens problemstilling og forskningsspørsmål blir det valgt å ta i bruk både kvalitative og kvantitative metoder. Det vil si at en ønsker å foreta undersøkelse som fører til dybdekunnskap rettet mot sprøytebetong ved tunneldriving og tilhørende dokumentering som leder til bruk av kvalitative metoder. Dermed blir kvalitative metoder anvendt for forskningsspørsmål 1 og 3 som omhandler nettopp dette. Følgelig vil bruk av både kvantitative og kvalitative metoder tas i bruk for å dekke forskningsspørsmål 2. Her vil den kvantitative delen benytte mange enheter for å beregne produksjonskapasitet til sprøyteroboten, mens kvalitativ metode dras også til nytte ved undersøking av litteratur om temaet.

2.1.3 Validitet og reliabilitet

Det er tatt i bruk to kriterier for masteroppgaven sin kvalitet, som er validitet og reliabilitet. Grønmo (2021) mener at validitet vil si i hvilken grad en kan trekke gyldige slutninger mot det som er formålet å undersøke, basert på resultatene fra en studie. Derfor kan en også kalle validitet for gyldighet. Dermed vil en undersøkelse sin validitet bestemme hvorvidt det som forskes på, faktisk gir den korrekte informasjonen en søker. Videre er reliabilitet nødvendig, men ikke en tilstrekkelig forutsetning for å ta en gyldig slutning.

Reliabilitet i en undersøkelse vil si i hvilken grad et måleinstrument gir entydige svar, altså om gjentatte målinger gir samme svar uavhengig av hvem som måler (Arntzen og Tolsby, 2010). Svartdal (2020) viser til at reliabilitet anvendes om stabilitet i målinger eller konsistens. En måling vil alltid kunne innebære feil. Dersom en utfører samme måling flere ganger, vil feilen variere begge veier omkring et gjennomsnitt. Det nevnes at reliabilitet bør være til stede i alle målinger som har praktisk eller teoretisk interesse. Selv om en test har høy reliabilitet, er det ingen garanti for at testen måler den egenskapen den er ment å måle. I det tilfellet må validiteten undersøkes for å bekrefte påstanden.

For å illustrere hvordan validitet og reliabilitet kan påvirke innsamlet informasjon, er det vist i Figur 2-2 hvordan ulike kombinasjoner av dem kan se ut. Følgelig er det blinken helt til høyre som en prøver å strekke seg mot, der en oppnår både god reliabilitet og validitet.



Figur 2-2: Validitet og reliabilitet (Varmdal, 2017).

Av disse grunnene, er metodene for datainnsamling vurdert underveis med både validitet og reliabilitet som vurderingsgrunnlag for å avgjøre om hvorvidt metodene bør anvendes.

2.2 Metoder for datainnsamling

Arntzen og Tolsby (2010) viser i sine resultater, at innen vitenskapen finnes det flere forskjellige fremgangsmåter til å tilegne seg kunnskap via forskning. Dette innebærer å velge fremgangsmetoder for å finne ny kunnskap og en fremlegging av hva en ønsker å undersøke og hvorfor. Valg av metoder avhenger av problemstilling og forskningsspørsmål, i tillegg til en vurdering av fordeler og ulemper hvor en ser på hva som er gjennomførbart og etisk forsvarlig. Følgelig er metodene valgt på bakgrunn av dette og vil videre beskrives enkeltvis.

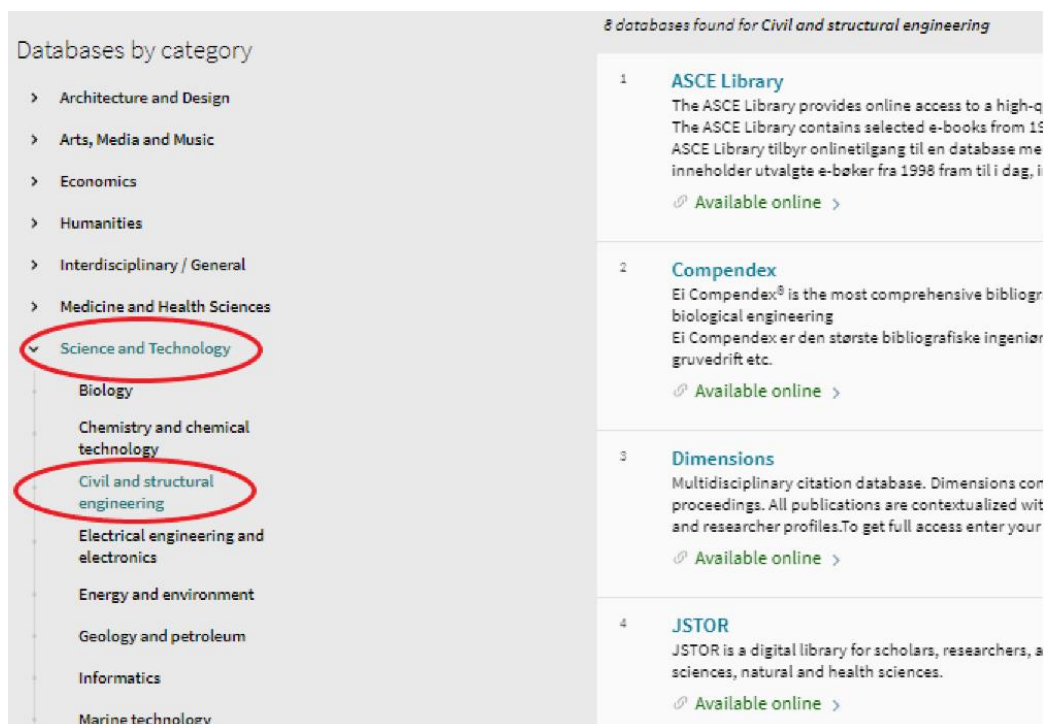
2.2.1 Litteraturstudie

Grønmo (1996) peker på at dersom et vurderende og konstaterende forskningsopplegg skal undersøke hvordan noe bør være eller hvordan noe oppfattes, er litteraturstudie gunstig å anvende i startfasen. Det gir et bilde på status av dagens kunnskap, finne kategorier til analytiske kategorier til behandling av data og til å formulere og operasjonalisere problemstillinger.

På samme måte mener Engebø (2020) at hensikten ved å anvende et litteraturstudie, er å skape en grunnleggende forståelse innen valgt tema. Følgelig vil en skape en oversikt over eksisterende forskning og deretter utføre en kritisk vurdering av innsamlet litteratur. Samtidig peker han på at en innsamling av litteratur på denne måten, vil kunne gi et innblikk i hvorvidt det eksisterer et kunnskapsgap. Dermed vil denne metoden for datainnsamling lede til hvilken kunnskap sin egen studie skal være på søken etter. Litteraturen som er anskaffet ved hjelp av litteraturstudie anvendes både i kapittel 3 Teoretisk rammeverk og 5 Resultater.

Wiki (2020) viste hvordan en kunne finne kilder ved bruk av ulike databaser. I tillegg ble det lagt frem tips til ulike søketeknikker og hvordan det kan brukes til å velge ut potensielle kilder for valgt formål.

Litteraturstudie er utført ved bruk av en strukturert søkeprosess i flere databaser. De aktuelle databasene ble oppdaget ved å ta i bruk Oria og velge aktuelle parametre passende for masteroppgaven. Disse var blant annet «Science and Technology» og «Civil and structural engineering» og er illustrert i Figur 2-3. Her er det illustrert med to røde ringer for de nevnte parametrene som er valgt som viser 8 resultater for databaser. I tillegg til at Oria ble valgt, ble også Compendex, Web of Science og JSTOR tatt i bruk.



Figur 2-3: Metode for å finne aktuelle databaser (NTNU, 2021).

Før søkeprosessen ble satt i gang ble det valgt å undersøke hvilke nøkkelord som er aktuelle for valgt tema. I tillegg ble valg av nøkkelord også basert på tilegnet kunnskap fra fordypningsarbeidet til undertegnede. Videre i prosessen ble det utført flere søk i de fire valgte databasene. Tabell 2-1 viser eksempler på søketekst, spesifisering, filter, antall treff og tilhørende database som er utført for hvert enkelt søk. Området som er markert med mørkegrønt viser de treffene som ble anvendt videre i prosessen. Det vil si at antallet er lite nok til at en kan gjennomgå kildene og vurderes for videre bruk. Det ble foretatt flere ulike søk som innebar ulike kombinasjoner av tekst, spesifisering og filter i søkeprosessen. Det er foretatt flere ulike søk for å oppnå heldekkende søk. Disse baserer seg på tema fra forskningsspørsmålene med søkeord som blant annet «shotcrete, tunnel, excavation, rock stabilization, robot, productivity, documentation, scanning og thickness, volume estimate».

Tabell 2-1: Oversikt over fremgangsmetode for databasene.

Søketekst	Spesifisering	Filter	Databaser			
			Oria	Compendex	Scopus	JSTOR
Shotcrete tunnel excavation		Alle felt	2 796	863	164	7
	Rock stabilization	Alle felt	403	147	3	1
	Shotcrete	Tittel, abstract eller nøkkelord	21	147		
	Shotcrete, tunnel	""		23		
Shotcrete tunnel excavation	Productivity		162	54	1	1
		Tittel, abstract eller nøkkelord	2	53		
		""		5		
Shotcrete tunnel excavation	Robot		70	10	0	0
			1			
Shotcrete tunnel excavation	Scanning		175	10	5	1
		Tittel, abstract eller nøkkelord	8			

Det viste seg at søkeord som «rock stabilization» og «productivity» var temaer som førte til mange treff. Derimot var «robot» og «scanning» søkeord som ga færre søketreff og på denne måten var tema

som viste deg å være litt mer utfordrende å undersøke. På denne måten ble det foretatt mer spesifikke søk for å komme frem til disse temaene.

For forskningsspørsmål 3 var det spesielt attraktivt å fokusere på nyere utgivelser av litteratur. Dette fordi at undertegnede visste i forkant at bruk av skanning som dokumentasjonsmetode var moderne teknologi. På denne måten kunne en sile ut de eldre kildene og oppnå funn av blant annet denne dokumenteringsmetoden. Derfor ble blant annet disse avgrensningene i litteratursøket anvendt: nøkkelord, relevans, publikasjonsår og fagfellevurdering.

Følgelig ble det opprettet et dokument som stadig ble oppdatert av aktuell informasjon, inndelt etter hvilken database som ble anvendt for å finne kilden. På denne måten kunne en opprettholde en oversiktlig søkeprosess, hvor mye litteratur ble tilgjengelig og kartlagt. Måten dette ble utført på, var ved å vurdere tittel og sammendrag til kildene. Dersom det viste seg at de kunne på en eller annen måte inkluderes i masteroppgaven, ble de tatt med videre i prosessen.

I løpet av litteratursøket ble det tatt i bruk metoder som «forward snowballing» og «backward snowballing». Det vil si at en henholdsvis tar i bruk artikler som har sitert en kilde og artikler som den selv har sitert (Engebø, 2020). Samtidig ble også kilder funnet ved å se på andre relaterte artikler hos databasene under søket.

Etter å ha anskaffet et akseptabelt nivå antall kilder for de ulike temaene innen sprøytebetong, ble en nøyere gjennomgang utført. Det vil si at kildene ble skimlet for en videre kvalitetssjekk før de ble betraktet som potensiell litteratur til masteroppgaven. Under hele søkeprosessen ble kildene også vurdert basert på TONE-prinsippet. Dette er en evalueringsmetode som dekker essensielle momenter for kilder og kan føre til utforskning av relevant kunnskap (Wiki, 2020). De fire inndelingene i TONE-prinsippet er troverdighet, objektivitet, nøyaktighet og egnethet. Disse kan sees i Tabell 2-2, hvor det også er lagt frem hva inndelingene inneholder.

Tabell 2-2: Anvendt TONE-prinsipp med innhold for inndelingene (Wiki, 2020).

TONE-prinsipp	
T-O-N-E	Innhold
Troverdighet	Bakgrunn og utdanning Publikasjonssted
Objektivitet	Sammenligning med tidligere forskning Flere perspektiv i saken
Nøyaktighet	Beskrive av forskningsmetodene Informasjon som er oppdatert
Egnethet	Relevans for studie

Kildekompasset (2022) viser til at en vitenskapelig artikkel skal være fagfellevurdert. Det vil si at den har blitt gjennomgått av andre forskere innen samme fagfelt, vurdert og godkjent artikkelen. Av den grunn ble det prioritert å ta i bruk kilder som er fagfellevurdert og styrker troverdigheten til innholdet.

I tillegg ble det rettet et stort fokus på publikasjonene og håndbøkene til Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF), som undertegnede var kjent med i forkant. Her får en tilgang på masse litteratur, spesielt om den norske tunneldringen, noe som passet ypperlig for denne masteroppgaven. NFF har som mål å forbedre utvikling av bergteknologi og anvende teknikker, bedre utnyttelsen av berggrunnen, forbedre sikkerhet og miljø skaffe impulser utenfra og gjøre den norske teknologien anerkjent internasjonalt (NFF, 2022). Disse strategiske målene til NFF, gjør at litteraturen de publiserer går under disse fagfeltene hvor mye av materialet er tatt i bruk i denne masteroppgaven. På samme måte er sprøyterobotene til AMV også satt i sentrum angående påføring av sprøytebetong ved tunneldring.

2.2.2 Casestudie

Som nevnt er det utført en casestudie til innsamling av data i masteroppgaven. Hanington og Martin (2019) viser til at en casestudie er en kvalitativ forskningsmetode som innebærer å ta et dypdykk innen en hendelse eller tilfeller ved en sammenheng. Dette inkluderer å ta i bruk flere ulike kilder som datamateriale. Casestudie kan være nyttige å gjennomføre for å forstå utvalgte hendelser, ved at en kan sammenligne det med andre casestudier og hente ut informasjon eller motivasjon. Ofte inkluderer casestudier blant annet innsamling av data fra flere kilder ved bruk av intervjuer, observasjoner eller dokumentstudier. På denne måten trianguleres innsamlede data, som forklares videre i 2.2.6 Triangulering. Av denne grunn var det derfor et sterkt ønske å kunne gjennomføre en casestudie i forbindelse med masteroppgaven ved et prosjekt for tunneldriving.

Etter å ha vært i kontakt med en god kamerat i Skanska, oppfordret han til å høre med en prosjektsjef hos totalentreprenøren. Forespørselen om casestudie ble tatt godt imot hos Skanska med god oppfølging tilrettelegging. Kriteriene for utførelse av casestudie var:

- Tunnelprosjekt hvor konvensjonell tunneldriving.
- Bruk av sprøytebetong som bergsikring ved påføring av sprøyterobot.

På bakgrunn av disse kriteriene og mulige prosjekter, ble undertegnede invitert til tunnelprosjektet på E16 Bjørum – Skaret ved Sollihøgdatunnelen.

Som nevnt blir dermed casestudie en form for avgrensning, hvor prosjektet blir undersøkt videre. Se kapittel 4 Beskrivelse av casestudie, for en utfyllende fremlegging av casestudie.

Casestudie inneholdt flere datainnsamlingsmetoder som; tidsstudie, feltobservasjoner, tidsstudie og uformelle samtaler.

Siden temaet omhandler bruk av sprøytebetong i dagens tunnelprosjekter, ble det aktuelt å anvende feltobservasjoner som bidro til resultater for alle forskningsspørsmålene. Det vil si at det som tilknyttet selve prosjektet i generell grad og sprøyteprosessen, var verdig å noteres. Dette ble loggført både digitalt og for hånd dersom undertegnede befant seg inne på stuff.

Arntzen og Tolsby (2010) viser til at observasjoner ofte kan variere stort når det kommer til gyldigheten og påliteligheten. Det vil si at en av forutsetningene for å oppnå god gyldighet og pålitelighet i kartleggingen, er å beskrives atferden på en måte som lett kan kategoriseres. I tillegg bør observatøren være kritisk til hvordan situasjonen tolkes. De nevner at en måte å redusere usikkerheten og øke verdien til observasjonsdataene er ved å anvende ulike metoder for å sjekke om dataene er sammenfallende. Dette er et tiltak som er utført, hvor casestudie innebærer tre tidsstudier utført Sollihøgdatunnelen. På denne måten blir data samlet inn fra feltobservasjoner og supplerer påliteligheten til tidsstudiet.

2.2.3 Tidsstudie

Det ble foretatt 3 tidsstudier under feltstudiet ved Sollihøgdatunnelen hos Skanska. Dette på bakgrunn av et behov om å anskaffe data fra et tunnelprosjekt sett i dagens lys. Tidsstudiene ble utført for å få et innblikk til hele syklusen ved påføring av sprøytebetong ved tunneldriving og samtidig ta tiden for alle aktivitetene. På denne måten kan en dele inn aktivitetene og kvantifisere produksjonskapasiteten til sprøyteroboten. Siden dette ble gjentatt 3 ganger ble det anskaffet et mer realistisk tallgrunnlag. På denne måten kunne nødvendige forbedringer utføres mellom tidsstudiene, dersom det skulle være nødvendig. I tillegg gir dette muligheten til å kunne sammenligne data med allerede publisert enhetstall for sprøytebetong. Hanington og Martin (2019) mener at en stor fordel ved å utføre tidsstudier er at det gjennomføres med arbeid som utføres i nåtid.

Ved oppstart av sprøytingen og tidsstudiet, ble det kommunisert kort med sprøyteoperatør for å oppnå formålet med tidsstudiet og dermed opprette kontakt med ham. Dette gjorde at det lettere kunne kommuniseres underveis i tidsstudiene når det var behov for oppklaring av ulike prosesser.

Hanington og Martin (2019) skriver at resultater anskaffet fra tidsstudier kan blant annet brukes til å lage statusrapporter for aktiviteten som er undersøkt. På samme måte er det gjennomført tidsstudier for å blant annet skape en oversikt over sprøyteprosessen og danne beregningsgrunnlag for sprøytekapasiteter.

Siden det kun ble foretatt tre tidsstudier, vil de i praksis fungere som stikkprøver for produksjonen. Av den grunn kan ikke resultatene anses som normal drift, men en kan heller ikke se bort fra det. Derfor trengs det flere tidsstudier for å eksempelvis kunne beregne en korrekt produksjonskapasitet ved bruk av tidsstudier. I løpet av tidsstudiene ble det tatt i bruk en digital klokke til å ta tiden og finne varigheten til aktivitetene for sprøyteroboten, som ble notert ned for hånd.

Det oppleves at denne type tidsstudie som undertegnede har utført, ikke er like utbredt som de andre metodene. Det kommer på bakgrunn av at det var utfordrende å finne faglitteratur angående tidsstudier i litteratursøket.

2.2.4 Dokumentstudie

Arntzen og Tolsby (2010) nevner dokumentanalyse som en kvantitativ metode som anvendes for å få frem data i form av tall og andre mengdetermer. På samme måte er det tatt i bruk for å undersøke ulik informasjon knyttet til sprøyt ved tunneldriving. Dette innebar en analyse av totale 132 sprøyterapporter for nordgående og sørgående tunneløp for Sollihøgdatunnelen. Her kunne en finne start- og stopptidspunktene og bestilt betong for alle sprøyt frem til feltstudiene tok sted. Dermed passer dokumentstudie godt for forskningsspørsmål 2, da sprøyterapportene inneholdt tall til beregning av sprøytekapasitet med tilhørende bestilt tykkelse. I tillegg ble også forskningsspørsmål 3 dekket, der sprøyterapportene fungerte som dokumentering for utført sprøyt.

Resultatene ble manuelt ført ned i et dokument i Excel hvor det ble foretatt nødvendige beregninger. Dette inkluderte blant annet tilrettelegging for å beregne produksjonskapasiteten til sprøytene med tilhørende aktuell informasjon. Dette var en tidkrevende prosess, men førte til relevante kapasitetstall som ble benyttet videre i oppgaven. Et utklipp av beregningene kan sees i vedlegg 2. Dersom det er ønskelig med hele dokumentet med beregningene, kan en ta kontakt med hovedveileder Amund Bruland.

Litt av hensikten ved å utføre et dokumentstudie av sprøyterapporter, er som nevnt å beregne nye verdier for enhetstall for sprøytekapasitet ved tunneldriving. Dermed er det valgt å benytte seg av mengde betong bestilt, og tilhørende tidsbruk for sprøyt for å kunne beregne produksjonskapasitet. Videre danner dette grunnlaget for enhetstallene for de ulike type sprøytene.

Sprøyterapportene ble tilsendt fra Skanska etter utført feltstudie. Dermed bør en kontakte Skanska dersom en ønsker tilgang til sprøyterapportene som er analysert i dokumentstudiet.

2.2.5 Uformelle samtaler og e-post

Det ble valgt å ta i bruk e-post som kommunikasjonsmiddel med flere ulike aktører til innsamling av materiale. Følgelig vil en oppnå en tidseffektiv måte å kommunisere på hvor motparten har god tid på å besvare, slik at svaret kan bli utfyllende. Dette kom også godt med siden samfunnet fortsatt var midt i en pandemi, og fysiske møter derfor ikke var å foretrekke.

De uformelle samtalene ble foretatt både på telefon og under feltstudiene på anleggsplassen. Disse samtalene utgjorde informasjon fra blant annet maskinleverandører, entreprenører og aktører som utvikler datastyrte kontrollsystemer for tunnelbransjen.

Siden en del av datainnsamlingen innebar metode for datainnsamling ved bruk av både uformelle samtaler per telefon og e-post til ulike bedrifter, henvises resultatene til dem. Derfor er det opprettet en oversikt for dette der bedriftsnavn, kommunikasjonsmiddel og tilhørende kontaktinfo er inkludert, se vedlegg 5.

2.2.6 Triangulering

Innen forskning vil det ikke alltid være nok å inneha et perspektiv, fremgangsmåte eller forståelse av en hendelse, ifølge Arntzen og Tolsby (2010). Det forklares at hensikten er å sannsynliggjøre den dataen som er hentet inn til forskningsdesignet som baserer seg på. På denne måten kan en kvalitetssikre dataene ved å øke påliteligheten, gyldigheten og troverdigheten.

Robson (1993) antyder at triangulering er en måte å skape mer troverdighet på ved å anvende ulike metoder for datainnsamling, bruke bevis fra forskjellige kilder eller søke vurderinger fra ulike forskere. Videre skriver han at det er fort gjort for en forsker å tro at en har funnet det korrekte svaret dersom bare en metode anvendes. Derfor vil en ved å bruke flere metoder finne ut om resultatene fra de ulike kildene er overensstemmende eller ikke. Spesielt for kvalitative data er påliteligheten til kilden alltid en bekymring, og derfor er det essensielt å gjennomgå resultatene opp mot andre kilder. På denne måten kan en kryss-validere kunnskap dersom en får samme resultat fra to forskjellige kilder.

Arntzen og Tolsby (2010) viser til at triangulering ofte anvendes som nevnt ved å kombinere kvalitative og kvantitative metoder. Det vil si at en eksempelvis først kan ta for seg et tema ved bruk av kvalitative metoder for å gå i dybden, og dermed utføre spørreundersøkelser i en kvantitativ undersøkelse. På samme måte kan en kvantitativ undersøkelse gjøre det motsatte, der den forsterkes ved å samle inn kvalitative data ved bruk av intervju, dokumentanalyse eller observasjoner.

Derfor er triangulering tatt i bruk i masteroppgaven for å kunne redusere usikkerheten til metodene for datainnsamling. Av den grunn tas det i bruk flere metoder for å besvare forskningsspørsmålene. Dette innebærer blant annet å lære nye kunnskaper gjennom deltakelse på seminar om betongbuer for sprøytebetong i regi av Tekna. Deltakelse på seminaret kom også av egen interesse for temaet. Samtidig fungerte det også som en kvalitetssjekk av allerede tilegnet kunnskap for temaet, et bidrag til ny kunnskap og inspirasjon til videre skrivning.

2.2.7 Bruk av metoder

Følgelig er de ulike metodene for datainnsamling anvendt for å samle inn data som tilrettelegger til å besvare forskningsspørsmålene. Tabell 2-3 viser hvilke metoder som er tatt i bruk for hver av forskningsspørsmålene. Her er det kun forskningsspørsmål 1 som skiller seg ut som ikke inkluderer dokumentstudie.

Tabell 2-3: Datainnsamlingsmetoder anvendt for forskningsspørsmål.

Nr.	Forskningsspørsmål	Bruk av metoder
1.	Hvordan benyttes sprøytebetong ved tunneldriving i dag?	Litteraturstudie, casestudie, tidsstudie
2.	På hvilke måter kan en beregne produksjonskapasiteten?	Litteraturstudie, casestudie, dokumentstudie, tidsstudie
3.	På hvilke måter dokumenteres sprøyteprosessen?	Litteraturstudie, casestudie, dokumentstudie tidsstudie

2.3 Vurdering av metodene

2.3.1 Introduksjon

I dette kapittelet blir det utført en samlet vurdering for metodene som er anvendt for datainnsamling. Dette for å skaffe en kritisk tilnærming til datainnsamling av andre sine forskningsresultat, på lik linje som Arntzen og Tolsby (2010) skriver.

2.3.2 Litteraturstudie

Litteraturstudie ga først et inntrykk av store temaer med lite spesifikk kunnskap om valgt tema for masteroppgaven. Deretter viste det seg at ved å snevre inn litteratursøket og finne de passende søkeordene, førte det til en større forståelse av tema. På denne måten ga det oppgaven en stødigere retning og en oppfatning av hvordan strukturen til oppgaven kunne se ut.

På samme måte som Grønmo (1996) forklarer, har det vært passende å ta i bruk litteraturstudie tidlig i datainnsamlingen. Ved å utføre et litteratursøk kunne en kartlegge kunnskap undertegnede selv hadde i forkant og det som måtte leses mer på. Det vil si det fungerte som en metode som ga oversikt for temaet og fungerte også som en kvalitetssjekk av forkunnskaper for undertegnede. I tillegg kunne innsamlede resultater sammenlignes med innsamlet litteratur. Samtidig ble undertegnede gjort oppmerksom på mengdene av litteratur om ulike fagfelt, noe som gjorde at litteratursøket måtte tilspisses godt for å finne ønsket materiale.

Materiale som er anskaffet om tema som ikke er like utbredt, vil ha mindre reliabilitet enn litteratur som det finnes mye av. Eksempler på tema med lite utbredelse er skanning av sprøytebetong og robotisering av sprøyterobot. Av den grunn ble det ekstra viktig å utføre triangulering, for å sjekke det fantes flere perspektiver og meninger om temaene. I tillegg ble TONE-prinsippet sterkt utnyttet ved anskaffelse av denne type materiale, hvor det var særdeles viktig at en var kritisk ovenfor kildene.

Det ble valgt å anvende mye litteratur i det teoretiske rammeverket fra NFF sine publikasjoner, da dette fører til at oppgaven retter seg mot den norske tunnelbransjen. På bakgrunn av at den norske tunneldrivingen anses som effektiv og anerkjent, vil litteraturen også kunne utnyttes internasjonalt for å styrke egen tunneldriving.

2.3.3 Casestudie

Casestudie ga stor innsikt i temaet om sprøytebetong ved tunneldriving. Dette er datainnsamlingsmetode som undertegnede ikke ville vært foruten. Besøket ute på anlegg ga et realistisk bilde av hvordan sprøytebetong anvendes ved tunneldriving i dag, og gir dermed oppgaven mer verdi. Dette i form av å samle inn dagens kunnskap om valgt tema i tillegg til å utføre samtaler personer i bransjen. I tillegg skapte det også stor motivasjon til å starte analyseringen av de innsamlede dataene.

2.3.4 Tidsstudie

Ved å anvende tidsstudie ga det muligheten til å produsere materiale som kan sammenlignes med annen litteratur. På denne måten ble det utført triangulering, som bistod til å øke validiteten til innsamlet data. Samtidig var det også utfordrende å finne litteratur som omhandlet tidsstudier. Det ble nesten bare funnet fremgangsmåter og inndeling av aktiviteter fra publikasjoner av NTNU. Av den grunn kan det være at tidsstudie ikke er en utbredt metode for datainnsamling, som muligens kommer av at det er tidskrevende fordi en bør følge flere sykluser.

Tidsstudiene utføres som nevnt ved tidtaking av ulike aktiviteter. Siden aktivitetene er delt inn i klare og tydelige inndelinger vil reliabiliteten styrkes. Dette kommer av at det skal mye til å misforstå inndelingen. Følgelig kommer dette godt med dersom andre personer skal gjenskape forskningen i masteroppgaven eller utføre lignende tidsstudier.

2.3.5 Uformelle samtaler og e-post

Siden uformelle samtaler og e-post ikke har noen klar struktur, er denne datainnsamlingsmetoden i utgangspunktet mindre troverdig ved første øyekast. Derimot ble det i disse tilfellene benyttet triangulering der det var mulig, for å gjøre tildelt materiale mer troverdig og pålitelig. Dette fungerte til en viss grad for informasjon som kunne trianguleres og dermed oppnå en sikkerhetssjekk. Eksempelvis fungerte ikke dette for nyutviklet teknologi som enda ikke implementert i det åpne markedet. Dermed bør dette materialet undersøkes videre, for å styrke validiteten til denne type data.

2.3.6 Dokumentstudie

En styrke ved å gjennomføre dokumentstudie, er at det kommer i form av tall og tekst. Det vil si at rådataene ikke blir påvirket av menneskelige faktorer. På denne måten vil reliabiliteten stå sterkt for dokumentstudie, fordi analysen gikk ut på å utføre mange, men enkle beregninger med tall.

Reliabiliteten til dokumentstudiet styrkes også ved at en sammenligner beregnede produksjonskapasiteter, med tidligere beregninger. Dermed kan en få inntrykk av hvorvidt en er på rett spor eller ikke. En annen styrke for reliabiliteten er at alle tilgjengelige sprøyterapporter ble gjennomgått. Dette innebar fra oppstart av tunneldrivingen, og til omtrent 100 meter inn i tunnelen. Dermed vil den eventuelle feilen variere i begge veier, omkring gjennomsnittet. Samtidig er det usikkert hvordan resultatene i dokumentene påvirkes når tunneldrivingen nærmer seg slutten. Dermed må dette undersøkes videre, dersom en ønsker et komplett datagrunnlag for samtlige av sprøyt i et tunnelprosjekt.

2.3.7 Samlet vurdering

Sett under ett har metodene for datainnsamling vært å skaffe et helhetsinntrykk for sprøyteprosessen ved tunneldriving, basert på forskningsspørsmålene. Dette innebærer hvordan sprøytebetongen anvendes i dag, hvordan en kan beregne produksjonskapasiteten og søke etter dokumentasjonsformer.

Det er tatt i bruk triangulering for litteratur som er lite utbredt som nyutviklet teknologi, tidsstudiene og for materiale anskaffet fra uformelle samtaler og per e-post. På denne måten har både validiteten og reliabiliteten økt for litteratur som samsvarer med annen data. Følgelig vil det være kunnskap lagt frem i masteroppgaven, som fremstår som mindre gyldig. Dette grunnet få lignende funn ved bruk av metodene for datainnsamling.

Det er i studien anvendt flere metoder for datainnsamling som gjør at litteratur kan understøttes fra flere ulike kilder. Følgelig styrkes reliabiliteten og validiteten til innsamlet data. Det er også anvendt en casestudie hos en av landets ledende tunnelentreprenører. Av den grunn vil dataene som innsamles her være til en viss grad generaliserbare for den norske tunnelbransjen. I tillegg har undertegnede hatt god kontakt med en av landets store maskinprodusenter ved tunneldriving. Dette har ført til lett tilgjengelig og oppdatert informasjon angående deres produksjon av sprøyteroboter. På denne måten har oppgaven mottatt kunnskap om nåtidens utvikling og fremtidens potensialer.

3 Teoretisk rammeverk

3.1 Introduksjon

Det vil være et behov for å danne et teoretisk rammeverk som grunnlag for oppgavens tema og forskningsspørsmål. Videre vil dette fremheve de empiriske undersøkelsene som er foretatt. Derfor vil det teoretiske rammeverket fremlegge teori, forskning og litteratur som er relevant for oppgavens tema.

Kapittelet er organisert etter de store temaene tunneldriving, produktivitet og til slutt bærekraft. På denne måten belyses tunnelbransjen og hvordan tunneldrivingen foregår i Norge. Videre presenteres teori mer rettet mot bruk av sprøytebetong ved tunneldriving. Det er også lagt inn et kapittel om produktivitet og hvordan det er koblet opp mot sprøytebetong. Mot slutten er det inkludert et kapittel om bærekraft ved tunneldriving.

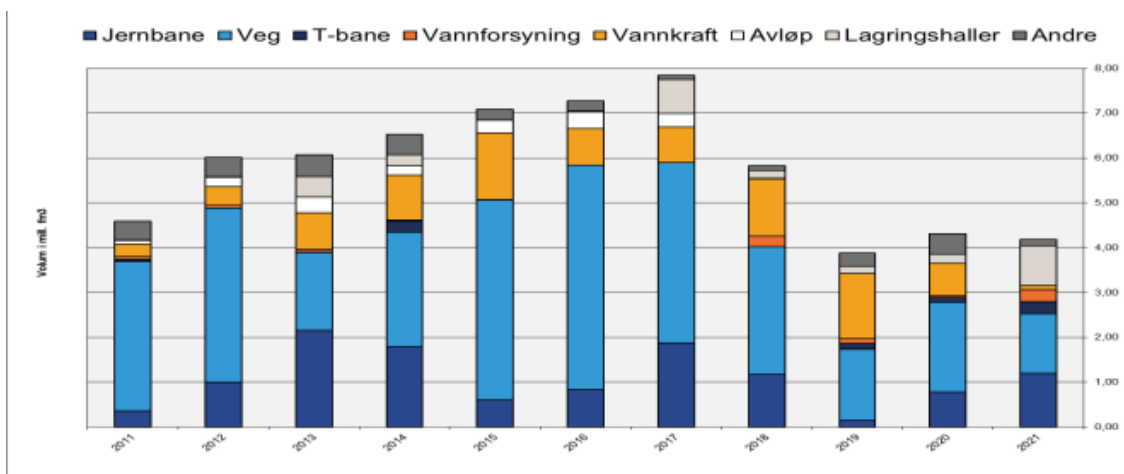
3.2 Tunneldriving i Norge

3.2.1 Introduksjon

Ifølge NFF (2014) har det i tunnelindustrien i Norge hovedsakelig blitt anvendt konvensjonell boring og sprengning fremfor bruk av TBM. Dette kommer av at en bortimot kan forvente store variasjoner av grunnforhold i norske tunnelprosjekter. På bakgrunn av dette har konvensjonell boring og sprengning en betydelig fordel ved håndtering av varierende grunnforhold sammenlignet driving med TBM.

Som nevnt i kapittel 1.4 Avgrensninger, blir det i denne oppgaven kun tatt for seg driving av tunnel ved bruk av konvensjonell boring og sprengning og den norske tilnærmingen for driving NTM.

Ifølge NFF (2017) er Norge i dag et av pionerlandene innen tunnelindustri og underjordiske anlegg, og har vært det i over 100 år. De mener at den kronglete geografien og de følgende utfordringene har ført til motivasjon for å løse de mest utfordrende oppgavene. Dette inkluderer grundige forundersøkelser, avanserte teknologiske metoder og lang erfaring med et stort fokus på trygge løsninger. Figur 3-1 viser volumuttak for ulike typer tunnelprosjekter, der vegtunneler har størst andel i bortimot alle år fra 2011 frem til og med 2021 (NFF, 2021).



Figur 3-1: Tunnelstatistikk i Norge fra 2011 til 2021 (NFF, 2021).

3.2.2 Tunnelsyklus

Dynamitten ble alminnelig tilgjengelig mot slutten av 1800-tallet, og mener Jernbaneverket (2018) at moderne fjellsprenning kom som en følge av dette. De deler opp hovedaktivitetene for en tunnelsyklus i fem deler, som forklart i Tabell 3-1. Det innebærer forinjeksjon, boring og lading, sprenning, utlasting og til slutt rensk og sikring. Det er i siste del; rensk og sikring, at sprøytebetong påføres og oppgaven avgrenses som nevnt i kapittel 1.4 Avgrensninger, til dette.

Tabell 3-1: Hovedaktiviteter i en tunnelsyklus (Jernbaneverket, 2018).

Hovedaktivitet	Kan inneholde
Forinjeksjon	<ul style="list-style-type: none">• Bores normalt hull på hele tunneltversnitt på 21-27 meter.• Sement pumpes med høyt trykk inn i hullene for å unngå at grunnvann lekker inn.
Boring og lading	<ul style="list-style-type: none">• Lading av ca. 5 meter lange borhull med sprengstoff.
Sprengning	<ul style="list-style-type: none">• Salvene deles opp i sekvenser for å minske rystelser på overflaten som totalt varer i 5-6 sekunder.
Utlasting	<ul style="list-style-type: none">• Lasting av dumpere eller lastebiler for utkjøring av utsprengt fjellmasse.• Massen transporteres til godkjente deponier hvor kjøreruten er forhåndsdefinert.
Rensk og sikring	<ul style="list-style-type: none">• En hydraulisk hammer pigger ned løst fjell før en manuell rensk utføres.• Det sikres med bolter og sprøytebetong, eventuelt armeringsbuer.• En geolog kontrollerer fjellforholdene for hver salve og vurderer behovet for sikring.

Etter hver syklus vil det drives ca. 5 meter av tunnelen, og i løpet av en uke blir dette 10-25 meter i gjennomsnitt per uke, noe som varierer basert på fjellforholdene (Jernbaneverket, 2018).

3.2.3 Bergsikring ved tunneldriving

Ifølge NFF (2017) er det for et hvilket som helst prosjekt under jord helt avgjørende at en utfører omfattende forarbeider. Dersom det viser seg at undersøkelsene er utilstrekkelige kan det i verste fall oppstå grunnforhold en ikke har oversikt eller kontroll over. Videre vil dette påvirke kvaliteten på arbeidet og medføre større kostnader for hele prosjektet. NFF (2014) peker på viktigheten av at en undersøker bergmassen i tunnelprosjekter for ulike bergarter, fjellformasjoner og svakhetssoner. Derfor kjennetegnes de ofte med store forarbeider før driving.

For å kunne klassifisere bergmasser sin stabilitet har NGI (2019) utviklet Q-systemet for bergrom og tunneler. Q-systemet brukes i stor grad verden over, inkludert i Norge. En gitt Q-verdi påvirkes av bergrommets geometri og bergkvalitet. I planleggings- og anleggsfasen vil det være behov for ulik stabilitetssikring basert på Q-verdier for tunneler og bergrom. Diagrammet er bygget opp på grunnlag av erfaringsdata fra over 2000 eksempler fra tunneler og bergrom. I vedlegg 1 kan en se hvordan

sammenhengen mellom bergmassekvaliteten og bergsikring har i Q-systemet og illustrerer hvordan Q-verdien avhenger av parameterne (NGI, 2015):

- RQD – Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)
- J_n – Tall for sprekkesett
- J_r – Sprekkruhetstall
- J_a – Tall for sprekkefylling
- J_w – Sprekkevanstall
- SRF – Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

Figur 3-2 viser hva Q-systemet anbefaler av permanent sikring, alt fra usikret eller spredt bolting til fiberforsterket sprøytebetong med tykkelse over 15 cm og forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting.

Sikringskategorier

- ① Usikret eller spredt bolting
- ② Spredt bolting, **SB**
- ③ Systematisk bolting, fiberforsterket sprøytebetong, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 12-15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E700)+RRS I+B**
- ⑦ Fiberforsterket sprøytebetong >15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Støpt betongforing, **CCA** eller **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Spesiell vurdering


Boltavstand er hovedsaklig basert på Ø20 mm


E = Energilabsorpsjon i fiberforsterket sprøytebetong


ESR = Utgravingens sikringsgrad

Områder med prikkede linjer har ingen empiriske data

RRS - avstand relatert til Q-verdi

 **SI30/6 Ø16 - Ø20 (spennvidde 10m)**
D40/6+2 Ø16-20 (spennvidde 20m)

 **SI35/6 Ø16-20 (spennvidde 5m)**
D45/6+2 Ø16-20 (spennvidde 10m)
D55/6+4 Ø20 (spennvidde 20m)

 **D40/6+4 Ø16-20 (spennvidde 5 m)**
D55/6+4 Ø20 (spennvidde 10 m)
Spesiell vurdering (spennvidde 20 m)

SI30/6 = Enkelt lag med 6 armeringsjern, 30 cm tykkelse med sprøytebetong

D = Dobbel lag med armeringsjern

Ø16 = Armering diameter er 16 mm

c/c = RRS avstand, senter - senter

Figur 3-2: Permanent sikring og anbefalinger basert på Q-verdier og spennvidde/ESR (NGI, 2015).

Q-systemet tar utgangspunkt i permanent sikring og oppgaven vil som nevnt i kapittel 1.4 Avgrensninger, fokusere på bruk av sprøytebetong som permanent bergsikring.

3.2.4 Big data og datainnsamling

Chawla og Khattar (2020) skriver at mengden data i vår verden har eksplodert. Selskaper lagrer informasjon om deres kunder, aktiviteter og leverandører. I tillegg er millioner av sammenkoblede sensorer innebygd i vanlige bruksgjenstander som i våre mobiler og biler og videresender denne informasjonen videre. Derfor er det nå helt vanlig at enhver bransje operer på denne måten hvor det er helt essensielt, for at den moderne verden skal drives fremover med økonomisk og innovativ vekst.

Big data er en analysemetodikk og teknologi i sammenheng med datamengder av ulike typer, som er ustrukturerte og for store til at en kan benytte tradisjonelle metoder for å hente ut informasjon (Dvergsdal og Elster, 2019). Chawla og Khattar (2020) viser til at den offentlige bruken av nettbaserte skyløsninger har sitt utspring innen dataanalyse. Dette innebærer blant annet komplekse systemer som IoT (Internet of Things), som er avanserte systemer for dataanalyse. Per dags dato er det ikke like utfordrende å utføre sammenlignet med tidligere tider.

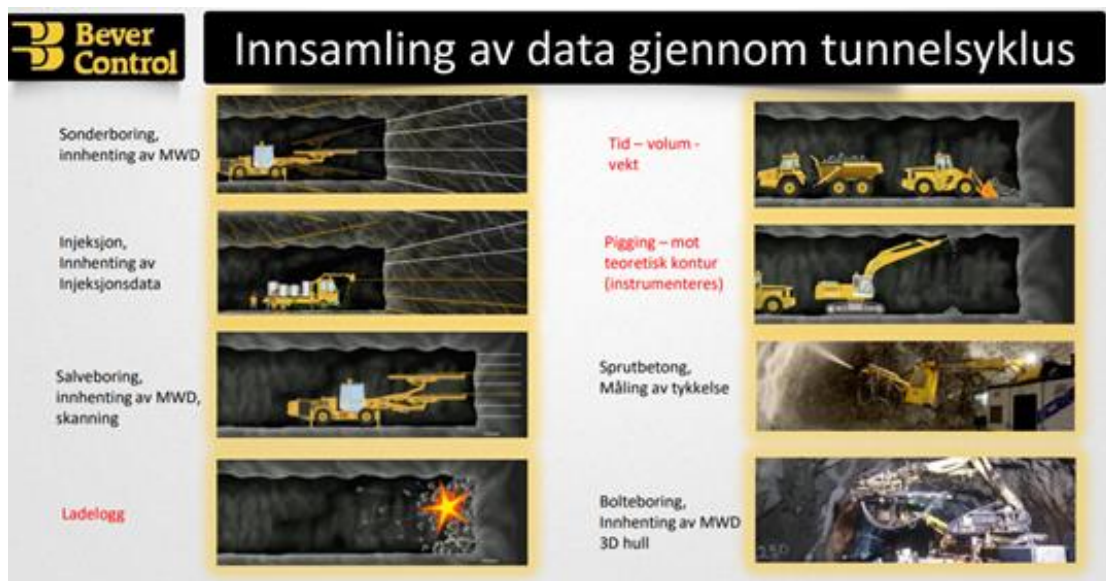
NTNU (2016) peker på at etter 2.verdenskrig har vært en voldsom utvikling av tunnelteknikken i landet. På bakgrunn av dette oppsto et behov for ajourførte og presise data som dannet et grunnlag for:

- Målsetting for penger og tid (kostnadsoverslag og fremdriftsplan) samt resultatvurdering.
- Type utstyr og drivemetode

- Utforming av prosjektene og dimensjonering økonomisk
- Akkordsetting

Videre skriver NTNU (2016) at data kunne bare innsamles på anlegg ved en systematisk teknisk-økonomisk kartlegging mens arbeidet pågikk. På denne måten rettet tunneldriften mulighetene for systematisk databehandling og dataregistrering.

Rundt år 2000 ble det ifølge NFF (2019) rettet et større fokus mot innsamling og bruk av data fra Measurement While Drilling (MWD). Bever Control initierte deres første prosjekt Bever Team som er en database som samlet data fra borerigger. Ettersom internett ble tilgjengelig i tunnelarbeid i 2010 ble derfor en milepæl oppnådd hvor det nå ble mulig med dataoverføring fra borerigg til database i sanntid. Videre fremgang i digitaliseringen av tunnelbransjen har hørt til automatisk posisjonsverktøy, sprøyteroboter med mulighet for skanning av tykkelsen til sprøytebetongen og dataassisterte arbeidsplattformer for injeksjon. I Figur 3-3 er det illustrert hvordan en kan innhente data fra ulike operasjoner i en tunnelsyklus, alt fra innhenting av MWD fra sonderboring til måling av tykkelse av påført sprøytebetong.



Figur 3-3: Oversikt over tunnelsyklus der data kan innsamles (Haugen Svendsen, 2020).

3.2.5 Avlønningsform

Tunnelarbeid kan oppleves som krevende, skriver NTNU (2016). Drivingen foregår i et arbeidsmiljø som påvirkes av støv, støy og giftige gasser der risikoen for skader er relativt stor. I tillegg er det vannsprut fra fjellet og ofte lav grad av belysning. Tjernshaugen (2020) mener at akkord er en type avtale for betaling som er prestasjonsbasert avhengig av produksjonsmengde, selv om arbeiderne ofte er sikret en minimums-timelønn.

Ifølge NTNU (2016) går tunnelarbeid i Norge på akkord som opererer med en meterpris som gjelder stufflaget sine oppgaver. Eventuelt benyttes en kombinasjon av meterpris og timebetaling, noe som gjør at inndriften har en mindre betydning for lønna til arbeiderne. Videre beregnes bakstiffen sin lønn med en varierende prosentandel avhengig av stuffens fortjeneste etter krav til belastning og dyktighet. Det kan oppfattes som en svakhet at arbeiderne sin fortjeneste bak stuff kun avhenger av stufflaget sine arbeidstimer og produksjonsstørrelsen. På denne måten vil det legge et press på uøkonomisk bemanning bak stuff slik at en ikke hindrer arbeidet på stuff.

3.3 Sprøytebetong ved tunneldriving

3.3.1 Introduksjon

Masteroppgaven tar for seg bruk av sprøytebetong i tunnel ved konvensjonell driving. Av den grunn vil det følgende bli presentert teori som er knyttet opp mot bruken av sprøytebetong i tunnel. Som nevnt i kapittel 1.4 Avgrensninger, vil oppgaven kun ta for seg bruk av våtsprøytebetong og bruk av sprøytebetong til permanent sikring.

3.3.2 Sprøytebetong

Sprøytebetong kan benyttes til ulike formål ved bygging av bergrom og tunneler ved bruk av våtmetoden til forsterkning av berg og for sikring, ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011). De viser også til at det kan innebære mange forskjellige metoder for sikring med et stort spekter av geometri og dimensjoner som kan anvendes både alene eller i kombinasjon med ulike sikringsmidler. I tillegg har bruk av sprøytebetong en fleksibilitet og tilpasningsevne til forskjellige bergmassekvaliteter som gjør den meget egnet til både arbeidssikring og til permanent sikring.

Sikringsbolter og sprøytebetong er de sikringsmetodene i tunnel som tas mest i bruk i Skandinavia for hardt fjell, ifølge NFF (2019). Både mengden og type sikring blir bestemt av Q-systemet, som nevnt tidligere i oppgaven. Sprøytebetongen fungerer som et sikkerhetsnett for mindre steiner, mens sikringsboltene sikrer større steiner.

3.3.3 Betongteknologi

Når sprøyteutstyret mottar fersk betong med den sammensetningen den har, blir den kalt betong basisblanding eller basisbetong, Grimstad og Norsk betongforening (2011). De viser til at det er leverandørens ansvar å levere en basisbetong som oppfyller de spesifiserte kravene som er spesifisert i NS-EN 14487-1 og NS-EN 206-1. De gjeldene kravene for basisbetongen bestemmes av byggherren (v/prosjekterende), sprøyteentreprenøren og hovedentreprenøren. Denne spesifikasjonen skal minst inneholde:

- Fashetsklasse; B30, B35 eller B45
- Utførelsesklasse
- Bestandighetsklasse; M40, M45 eller M60
- Tykkelse, eller annen mengde- og geometrianvisning
- Seighetsegenskaper; energiabsorpsjonsklasse E500, E700 eller E1000, eller uten fiber som påvirker seigheten.

Ifølge NFF (2008) er det flere vanlige tilsetningsstoffer for sprøytebetong:

- Intern tilsetning for herding
- Retarder
- Stabilisator
- Superplastiserende stoff og plastiserende
- Tilsetning som letter pumpingen
- Akselerator

NFF (2016) viser til at sprøytebetong tilsettes en akselerator i munnstykket av hovedgrunner:

- Oppnå heft mot underlag
- Herdigutvikling og hurtig avbinding
- Oppnå større tykkelse på lagene

NFF (2008) peker på at etter at akseleratoren har blandet seg i sprøytemunnstykket og truffet berget skal størkningen starte umiddelbart. Dersom det er en avstand på 3 meter fra sprøytemunnstykket til bergflate og en strålehastighet på 30 til 35 m/sek vil dette ta 0,1 sekund. Grimstad og Norsk betongforening (2011) legger frem at akseleratorens effekt for sprøytebetongen er avhengig av

temperatur, der en høyere temperatur på akseleratoren gir høyere viskositet og en bedret innblanding. Produsentene til akseleratoren legger frem hvor stor andel tørrstoff som er innblandet, gitt i prosentandel. Av det som ikke er tørrstoff er vann, der det baserer seg på % av vekten. Ved beregning av masseforhold for ferdig sprøytet betong skal vanninnholdet inkluderes.

Norges standardiseringsforbund (1999) skriver at delmaterialene som inkluderes i sprøytebetongen ikke skal inneholde mengder av skadelige bestanddeler slik at det kan korrodere armeringen eller minke holdbarheten til sprøytebetongen. I tillegg skal kun delmaterialer som er egnet for den bestemte anvendelsen tas i bruk i sprøytebetongen. Det henvises til at egnede delmaterialer, er de som samsvarer med europeisk standard.

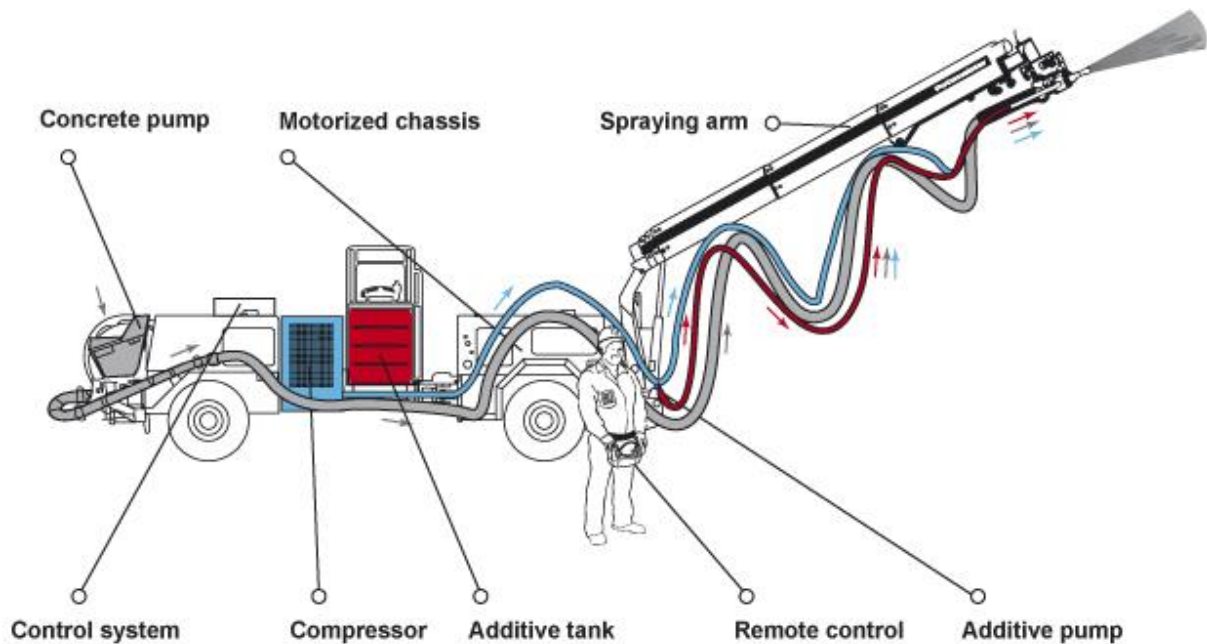
Ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011) er tilslaget i sprøytebetong like essensielt for egenskapene som i annen spesialbetong. Det vil si at korngraderingen og andre karakteristika har en lav grad av variasjoner. I dette tilfellet vil derfor slammengde, mineralogi, partikkelfasong og finstoffet til tilslaget ha stor påvirkning som ikke undersøkes i en sikeanalyse. Grove korn vil ved sprøyting prelle av dersom det er et hardt underlag, som ved oppstart av sprøyting direkte på berg. Det kan det oppstå kratere hvor grove korn slår som prosjektiler på tidligere påført sprøytebetong. I tillegg kan overkorn kile seg fast i sprøytemunnstykket og blokkere slanger, hvor fjerning av disse vil være tidkrevende.

Sprøytebetongen tilsettes også stålfiber slik at den kan ta opp strekk og nedbøyning (NFF, 2016). Grimstad og Norsk betongforening (2011) viser til at bruddseigheten til sprøytebetongen kommer fra å tilsette fiber, og at trykkfastheten og bøyestrekfastheten endres i liten grad for prøver i laboratorieskala dersom masseforholdet er uendret. Det finnes ulike fibertyper som gir ulike muligheter for bruddseigheten. Seigheten vil øke for en og samme fibertype med økende fiberdosering, helt opp til en optimal mengde. Dersom den overstiger denne mengden vil bruddseigheten reduseres på grunn av komprimeringsproblemer.

3.3.4 Sprøyterobot

NTNU (2016) skriver at utstyr og maskiner som anvendes i tunnel, er under arbeid utsatt for krevende betingelser. Kravet til utstyret kommer fra at arbeidet foregår på akkord hvor driftstempoet er høyt. I tillegg er det større svingninger i anleggsbransjen som fører til at en gjentatte ganger må arbeide i tunnel med folk som har mindre erfaring om prosessene. Av den grunn må utstyret være robust, simpelt og dimensjonert med god margin for å opprettholde en god driftssikkerhet. Følgelig unngår en å produsere utstyr med finesser som skaper en potensiell driftsstans. Videre legges det frem at helt siden andre verdenskrig har det vært et stort fokus på mekaniseringsgraden, med hovedvekt på effektivitet. I tillegg fokuseres det på å lage et bedre arbeidsmiljø for arbeid under jord, noe som gjør at en satser på betjening av maskiner med førerhytter som er avskjermet.

Det tas som regel i bruk en sprøyterobot til påføring av sprøytebetong, der utstyret ofte er montert på en lastebil, skriver NFF (2019). Denne består av en betongpumpe og et betongkar som er koblet sammen med en slange til en dyse der sprøytebetongen spruter ut. Denne styres av en operatør som enten styrer den fra en operatørhytte eller fra et fjernstyrt kontrollpanel, der sistnevnte er tilfellet i Figur 3-4. Her illustreres et oversiktsbilde av typiske komponenter for en sprøyterobot, som også viser blant annet en kompressor, en tank for tilsetningsstoffer og en sprøytebom.



Figur 3-4: Hovedkomponenter for en sprøyterobot (Putzmeister, 2015).

NFF (2019) peker på at sprøytemunnstykket for sprøyteroboter kan roteres for å komme til ulike vinkler i en tunnel, som styres av operatøren. Figur 3-5 viser et eksempel på hvordan en operatørhytte, sprøytebom og sprøytemunnstykke ser ut, her en sprøyterobot fra AMV.



Figur 3-5: Operatørhytte og sprøytebom med sprøytemunnstykke (NFF, 2019).

For å pumpe betongen i våtsprøytemetoden for sprøyteroboter tas det enten i bruk en monopumpe eller en stempelpumpe, viser Grimstad og Norsk betongforening (2011) til. Pumpene har normalt en kapasitet opp mot henholdsvis 12 m³/t og 20 m³/t. På denne måten må utstyret tilpasses den aktuelle sprøytekapasiteten. AMV er en bedrift som produserer utstyr for tunnel og gruvedrift som blant annet inkluderer sprøyteroboter, ifølge AMV (2008). AMV produserer tre forskjellige modeller av

sprøyteroboter som er designet for påføring av sprøytebetong på fjell til bergsikring og til vann- og frostbeskyttelse. Som vist i Figur 3-5 har sprøyterobotene robust utstyr som gjør dem meget egnet til arbeid ved tunneldriving. Alle de tre modellene til sprøyterobotene til AMV har en teoretisk pumpekapasitet på 25 m³/t.

3.3.5 Klargjøring og påføring av sprøytebetong

Etter en mekanisk og manuell rensk er utført på bergoverflaten hvor det skal sprøytes, skal en utføre en grundig rengjøring av det samme området, ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011). Dette gjelder spesielt i sprekker hvor det er leirbelegg, slik at sprøytebetongen og bergoverflaten får permanent samvirke. Det er vanligvis sprøyteroboten som utfører rengjøringen som en kraftfull spyling av vann og trykkluft. De peker også på at sprøyteroboter må ha et effektivt vaskeutstyr for renhold. I tillegg bør den også ha utstyr til å utføre rengjøring av fjellflater før sprøyting. En skal utføre rengjøringen ovenfra og nedover, og skal vente med å la vannet renne av bergoverflaten før ny sprøyting settes i gang. I tillegg skal en vente med å sprøyte på nytt til prellemasse og nedfall er fjernet fra hyller og utspring dersom det har samlet seg.

NFF (2019) nevner disse suksessfaktorene for påføring av god kvalitet:

- Et grundig arbeid enten ved bruk av hydraulisk pigghammer eller manuelt for å fjerne løse steiner.
- Bergoverflate er vasket for å minimere leire, støv eller andre partikler som kan påvirke sprøytebetongens heft.
- Operatøren går ut fra et påføringsmønster som fører til en jevn påføring sprøytebetong for alle overflater.
- Unngå å påføre sprøytebetongen for nærme neste salve, for å unngå påføring av løse steiner som egentlig hører til neste sprøyt. Dersom dette er tilfellet, vil det føre til unødvendig belastning på sprøytebetongen og en bør følgelig fjerne de påvirkede løse steinene og sprøytebetongen.

For å unngå innsprøyting av prellemasse, viser Grimstad og Norsk betongforening (2011) til at ved sprøyting av skrå eller vertikale overflater skal operatøren starte fra bunnen og fortsette oppover. I tillegg skal sprøytemunnstykket tilpasses blant annet overflaten som sprøytes på, kapasiteten til utstyret, trykkluft og dets kapasitet og akselerator. Sika (2020) viser til at ved enhver mulighet skal sprøytemunnstykket pekes vinkelrett mot sprøyteoverflaten for å oppnå lag med en optimal tykkelse og tetthet, og for å unngå mest mulig prelletap. Avstanden mellom bergoverflaten og sprøytemunnstykket baserer seg på arbeidsforholdene og muligheten til å oppnå komprimering av god kvalitet, lavest mulig grad av prelletap og full innhylling av armering som normalt er 1 til 2 meter. I tillegg kan den bestilte tykkelsen på sprøytebetongen gjøre at en må sprøyte flere lag for å unngå nedfall og siging.

Grimstad og Norsk betongforening (2011) skriver at sprøyting på sprengt bergoverflate skal utføres ved å påføre et avjevningsslag for å fylle sprekker og groper. Ved å peke sprøytemunnstykket mest mulig rett inn mot groper og sprekker unngår en skrens av strålen og skyggevirkninger i størst mulig grad, noe som er essensielt for å oppnå god heft. De viser også til at for å oppnå et godt sprøyteresultat må sprøyteoperatøren gjennomgå opplæring og trening slik at en kan bruke et godt mønster for påføring. Følgelig vil det bli lettere for sprøyteoperatøren å fordele sprøytebetongen jevnt og oppnå den tykkelsen som er bestilt. Dette gjelder både ved å påføre mer enn minimumskravet og å unngå sløsing ved å påføre for tykke lag.

3.3.6 Sprøytetyper

NFF (2020) nevner følgende typer sikringsmetoder, hvor sprøytebetong inngår:

- **Salve** – Sprøytebetong anvendes ofte i kombinasjon med bolter til å forsterke bergmassen etter sprengning og sprøytes direkte på bergoverflaten NFF (2020).

- **Spiling** – også kalt forbolting som brukes ved likte overdekning og i svakhetssoner med dårlig berg. Denne metoden tas ofte i bruk ved tunnelpåhugg. Poenget med spiling er å bevare profilet etter en salve og for å danne en «bru» som lastene kan fordele seg utover. Frem til det er etablert annen sikring som armerte sprøytebetongbuer, radielle bolter eller sprøytebetong sørger forboltene for å holde profilet inntil annen sikring (NFF, 2020).
- **Bue** – For å skape best mulig virkning til buene blir profilet påført jevne lag med sprøytebetong. På denne måten sikres det med armerte sprøytebetongbuer (NFF, 2008).

3.3.7 Mengdebestilling

For at sprøyteoperatør skal kunne utføre sprøytingen med gode forutsetninger, blir arealene som skal sprøytes på beskrevet med profilnummer og anvist hvor i profilet det skal sprøytes, ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011). Dermed beregnes mengden fersk betong som skal sprøytes på bakgrunn av areal, forutsatt gjennomsnittstykkelse, en faktor for prelletap og en ujevnhetsfaktor basert på bergoverflatens ujevnhet. Sistnevnte faktor baserer seg på tykkelseskontroller og skal evalueres kontinuerlig. På denne måten kan en oppnå den ønskede tykkelsen ved å multiplisere det teoretiske volumet med ujevnhetsfaktoren som normalt ligger mellom 1,3-1,8. Tykkere lag og forsiktig sprengning gir en lavere ujevnhetsfaktor, der hard sprengning fører til en økning.

Ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011) tas sprøytebetongen oftest i bruk som en del av den permanente sikringen der byggherre har muligheten til å bestille på to måter; bestille en gjennomsnittstykkelse eller ved å bestille volum til groper i tillegg til en minimumstykkelse. Dersom byggherre velger å ta i bruk førstnevnte av de to bestillingsmetodene vil det forekomme to krav:

- Av bestilt gjennomsnittstykkelse skal målingene minst være 50 av % denne.
- Den midlere tykkelsen skal minimum være lik den bestilte gjennomsnittstykkelse.

Maidl, Thewes og Maidl (2013) påpeker at dersom den sprøytede tykkelsen ikke dekker kravene for bestilt tykkelse vil det måtte sprøytes slik at en oppnår den bestilte tykkelsen hvor det er viktigst, som er i heng.

Grimstad og Norsk betongforening (2011) viser til at en nøyaktig måling av påført sprøytebetong er forbundet med en viss usikkerhet. Dette forekommer av blant annet på grunn av ved blandingen av basisbetongen blir det pisket inn en del luftporer. Denne inkluderes i massen, men luftporene kollapser ved påføring på bergoverflaten som dermed reduseres volumet. I tillegg tilsettes akselerator i blandingen der det dannes kompakteringsporer i sprøytet masse, som kommer på bakgrunn av ufullstendig kompaktering.

Som angitt av Norges standardiseringsforbund (1999) vil en beregne volum påført for sprøytebetong uten fratrekk for prelletap inntil 10 %. Statens vegvesen (1997) viser til at prelletapet ikke beregnes som sprøytet mengde og at «kakenedfall» ikke inkluderes i prelletapet.

For å oppnå et felles grunnlag for beregning for basisbetong og påført sprøytebetong, viser Grimstad og Norsk betongforening (2011) til en bestemt regel. Denne baserer seg på at volumet til basisbetongen og påført sprøytebetong beregnes til 1 m³ dersom fastvolumene sin sum for alle delmaterialer tilsatt i betongblanderen blir minst 960 liter. Fastvolumene vil si vekten av væsker og de faste materialer dividert med den faste densitet materialene. I dette tilfellet inkluderes ingen av de nevnte usikkerhetene; luftporer fra blandingen eller volumøkningen pga. tilsetting av akselerator.

3.3.8 Dokumentering

Ved tunneldrift skriver Jernbaneverket (2018) at anleggsbransjen er underlagt strenge retningslinjer. Her blir målet å ivareta omgivelsene slik at ikke bygninger, miljø eller natur skades på grunn av tunnelarbeidet.

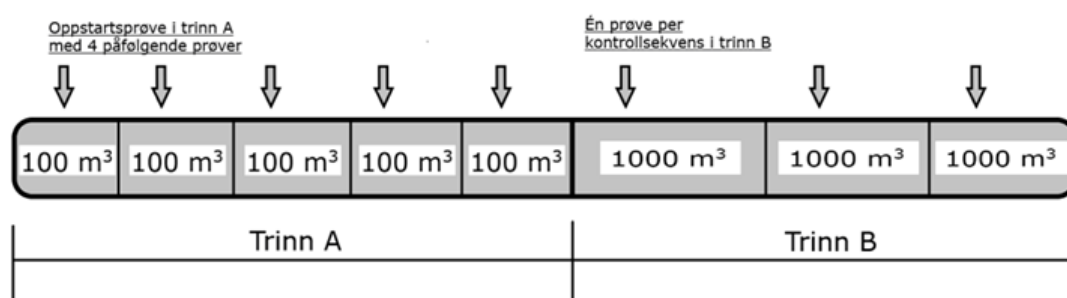
Kapittel 3.3.4 viser at tidligere måtte datainnsamling skaffes ved en systematisk teknisk-økonomisk kartlegging under arbeid, ifølge NTNU (2016). Denne inneholder kartlegging av følgende hovedmoment:

- Arbeidsstudier som viser kapasiteter og ytelser.
- Arbeidsrapporter som gir kartlegging av driftsforstyrrelser og fremdrift, statistikk for borutstyr og kvalitet for det utførte arbeidet (ruhet, tverrsnitt).
- Kostnadsregnskap som inneholder kostnader for de ulike arbeidsoperasjonene og timefordeling i tillegg til de essensielle maskinene og særregnskap for materialer.

Ifølge Grimstad og Norsk betongforening (2011) eksisterer det et krav om å fylle ut en sprøyterapporter for hvert sprøyteskift som arkiveres sammen med bestillingsskjema. NFF (2019) viser til at dokumentering av sprøytebetong i tunnel for mengde og tykkelse vanligvis har vært å levere kopi av bestillingsskjemaet fra betongfabrikken. Denne inneholder både type og mengde betong målt i kubikkmeter og boring i herdet sprøytebetong for å bestemme tykkelsen. Testene fra sistnevnte utføres vanligvis hver tredje sprøyt ved bruk av en linjal, hvor en måler tykkelsen i centimeter. Grimstad og Norsk betongforening (2011) peker på at dersom det blir aktuelt for en evaluering av kvalitetsspørsmål, skal en dele ut sprøyterapporter på forespørsel til alle parter om ønskelig.

NFF (2019) skriver at minimumskriteriet for tykkelsen blir satt til halvparten av tykkelsen som er bestilt. Dersom det er områder som er for tynne, vil det som regel legges på et nytt lag med sprøytebetong. Derimot vil det ikke gjøres noe med sprøytebetongen dersom det er for tykt, med mindre det motstrider planlagt kontur for tunnelen. I så fall vil det fjernes for å gi plass til tekniske installasjoner med en hydraulisk pigghammer eller ved sprengning.

For å kunne kontrollere tykkelsen som er sprøytet, viser Grimstad og Norsk betongforening (2011) til et eksempel for en metode som kan utføres på følgende måte: Dersom det tas i bruk en kontrollfrekvens på trinn A: 1/100 m³ for 500 m³ og trinn B: 1/1000 m³, betyr det at de første produserte 500 m³ deles inn i sekvenser på 100 m³. Den resterende produksjonen deles inn i sekvenser på 1000 m³. Det skal følgelig tas en prøve tilfeldig fordelt innen de bestemte kontrollsekvensene. På denne måten tas det 5 prøver innen de første sekvensene og deretter fortsettes det med en prøve for hver produserte 1000 m³. Dersom en prøve ikke tilfredsstillende angitte kravene må en gjenta prosessen og starte på trinn A. Eksempelet er illustrert i Figur 3-6, produsert av undertegnede med trinn A og B med 5 prøver for trinn A og en start på prøvetaking i trinn B.



Figur 3-6: Eksempel på kontrollsekvenser for tykkelsesmålinger.

3.3.9 Skanning

NFF (2019) viser til at skanning for å bestemme tykkelsen til påført sprøytebetong allerede ble innført av Bever Control i 2006 og i 2012 kom de med en ny metode for skanning der skanneren var plassert bak på sprøyteroboten, som vises i Figur 3-7. Det utføres en skanning før påføring av sprøytebetong, og en etterpå, der det dannes en oversikt av både tykkelse og plassering til sprøytebetong på bergoverflaten. Derimot er bruken av skanning per i dag begrenset, til tross for at den kan gi goder til sprøyteoperatør i form av tilbakemeldinger om påføringsmønsteret sitt og beregning av mengde

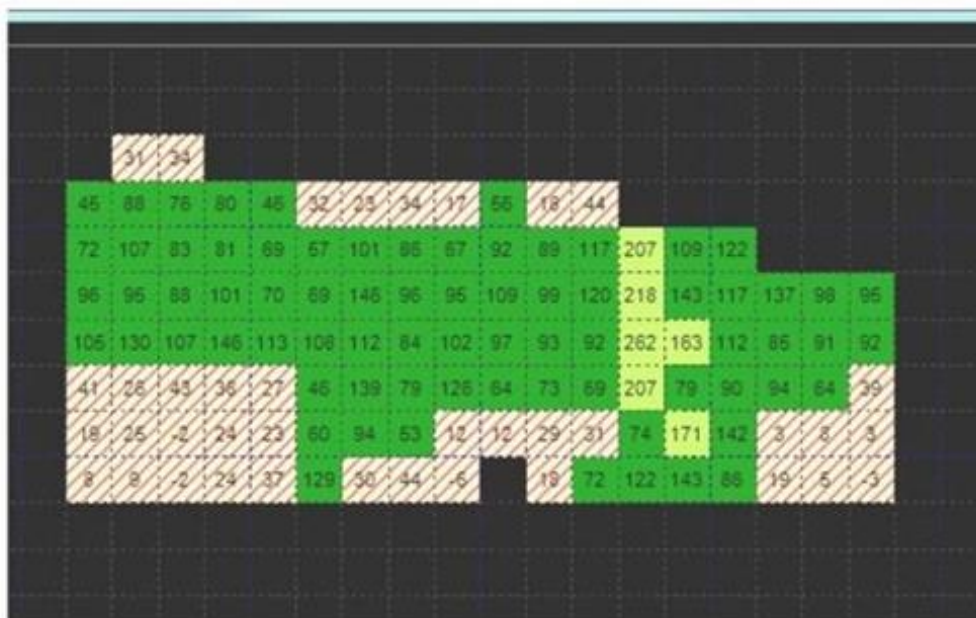
betong til kommende sprøyt. Rodriguez, Nabulsi og Rio (2009) peker på at det finnes svært få empiriske fremgangsmåter som har blitt studert for å beregne tykkelsen til sprøytebetong ved påføring. De viser til at statistiske eller parametriske modeller for å beregne påføringsmønsteret til sprøytebetongen.



Figur 3-7: Plassering av skanneapparat på baksiden av sprøyterobot (Bever Control, 2016).

Figur 3-8 er et eksempel på hvordan tykkelsen av sprøytebetongen kan illustreres, der fargene representerer i hvilken grad påføringen tilfredsstillter kravene som er satt for ulike tykkelser:

- **Lysegrønn:** Mer enn tilstrekkelig
- **Grønn:** Tilstrekkelig
- **Rød:** Utilstrekkelig



Figur 3-8: Resultat fra sprøyting med fargekoder for ulike tykkelser (Bever Control, 2016).

Bever Control (2016) viser til at de har utviklet en laserskanner er tilrettelagt for arbeid under tøffe forhold som ved tunneldriving. Skanningen kan dermed gi en resultater i form av kartlegging av tunnelflaten som dannes under sprøyting og kan gi en god dokumentasjon på utført arbeid.

Nøyaktigheten på tykkelsesmålingen per m² er bedre enn 10 mm, som er dokument med boreprøver. Nettopp på grunn av denne mer nøyaktige metoden for å måle tykkelse og opplæring av operatøren, mener de at firmaet LKAB Berg & Betong forbruker 20 % mindre volum på sprøytebetongen. Dette tilsvarer en årlig reduksjon i kostnader på omtrent 30 millioner amerikanske dollar.

3.3.10 Robotisering

Liu *et al.* (2021) peker på at operatører som styrer sprøyteroboter i anleggsprosjekter vil kunne oppleve utfordringer ved bruk som personskader, lav kvalitet ved påføring og fare ved påføring.

Ifølge Girmscheid og Moser (2001) har sprøyteroboten en høy grad av teknologisk utstyr i tunnel, og styres ved bruk av et elektronisk styresystem. De skriver at er det nødvendig å tilpasse påføringsmetoden til ethvert prosjekt. Per i dag utføres det for hånd eller ved bruk av digital styringskontroll. Ved å automatisere påføringen vil det kunne øke kapasiteten og kan føre til at mindre sprøytebetong preller av under påføring. Kurth, Gause og Rispin (2004) mener at i fremtiden vil sprøytebetong kunne påføres helt automatisk, men samtidig vil ikke dagens mer manuelle påføring være helt skjøvet bort.

3.4 Produktivitet

3.4.1 Introduksjon

Chan og Kaka (2004) skriver at byggebransjen fortsatt gjenstår som en av de mest arbeidsintense bransjene rundt om i verden. Av den grunn vil det være essensielt å forstå mulighetene ved måling av produktivitet av denne type arbeid. I byggebransjen er produktivitet utfordrende å måle, hvor det tas i bruk ulike analyser og programmer for datainnsamling, mener Goodrum, Haas og Glover (2002). Dette et tema som stadig forskes mer på den dag i dag.

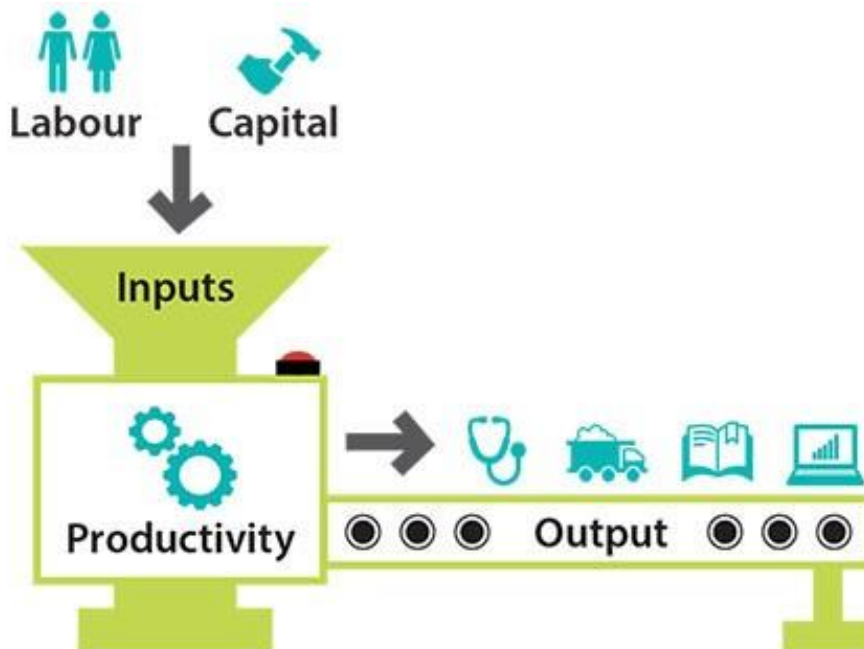
Ifølge Crawford og Vogl (2006) finnes det i dag ingen bred konsensus for hvilke metoder en bør ta i bruk for å måle produktivitet. O'Mahony og Timmer (2009) viser til at produktivitet kan utnyttes til å måle økonomisk effektivitet, fremdrift innen teknologi, produksjonsfremdrift og datagrunnlag til å ha kostnadskontroll.

3.4.2 Definisjoner

Østenstad (2017) definerer produktivitet som forholdet mellom produksjon og innsats. Det vil si hvor mange goder som blir produsert sett opp mot mengden produksjonsfaktorer som utnyttes for å produsere godene. Følgelig vil produktiviteten øke dersom mengden goder produsert øker og de utnyttede produksjonsfaktorene er konstante. Dermed kan en sette opp produktivitet som:

$$\text{Produktivitet} = \frac{\text{Mengde produsert}}{\text{Mengde produksjonsfaktorer utnyttet}}$$

I Figur 3-9 er det illustrert hvordan produktiviteten avgjør outputen basert på hvor mye input som er lagt inn. Inputen blir i dette tilfellet arbeidskraft og kapital som blir omgjort til resultater for ulike industrier.



Figur 3-9: Sammenhengen mellom input og output som avgjør produktiviteten (Reserve Bank of Australia, 2021).

Østenstad (2017) mener at som regel menes det faktorproduktiviteten når en snakker om produktivitet. Vanligvis uttrykkes produktivitet i per timeverk som vil si mengde produsert per enhet innsats. Basert på dette kan faktorproduktiviteten uttrykkes på denne måten:

$$\text{Faktorproduktiviteten} = \frac{\text{Mengde produsert}}{\text{Innsats av en enhet for en produksjonsfaktor}}$$

Både Ulstein *et al.* (2016) og Østenstad (2017) mener at total faktorproduktiviteten er produksjonen sin totale verdi sett opp mot den totale faktorinnsatsen. Dersom total faktorproduktiviteten skal øke må produksjonsfaktorene utnyttes mer effektivt. Derfor kan total faktorproduktiviteten uttrykkes slik:

$$\text{Total faktorproduktiviteten} = \frac{\text{Total verdi produsert}}{\text{Total faktorinnsats}} = \frac{\text{Total verdi produsert}}{\text{Materialer} + \text{Kapital} + \text{Arbeidskraft osv.}}$$

Crawford og Vogl (2006) peker på tre ulike metoder som ofte brukes for å måle produktivitet innen bygg og anlegg i dag, der sistnevnte allerede er lagt frem tidligere i oppgaven:

- **Prisingstudier** – eksperter legger frem informasjon knyttet til prestasjonsdrivere og innsatsfaktorbruk basert på allerede eksisterende plantegninger. En utfordring ved denne type studie er å bestemme validiteten til estimatene til ekspertene.
- **Makroøkonomiske studier** – produktivitet blir målt basert på aggregert data fra nasjonalregnskapet. De peker også på at denne metoden ved å aggregere data til næringsnivå gjør at en går glipp av nyttig heterogen informasjon innad i næringen.
- **Case studier** – en analyse som baserer seg på utvalgte caser som angår noen deler av et prosjekt eller selve anleggsprosjektet. Til tross for at denne type studie ikke analyserer en hel prosess for et bygg- og anleggsprosjekt vil det gi samlet informasjon om kvalitet basert på innsatsfaktorer og ledelse og detaljert informasjon. I tillegg resulterer det også i drivere til

produktivitet som for eksempel design, teknologi, metoder for anbud og forhold på byggeplassen.

3.4.3 Produktivitet ved tunneldriving

Som nevnt vil det oppstå utfordringer på grunn av de unike geologiske forholdene fra et arbeid til et annet. Derfor peker Kim *et al.* (2018) på det samme der ressursplanleggingen noen ganger ikke strekker helt opp til ledelsen sine forventninger. Derfor kan simuleringer tas i bruk som analytiske metoder for å undersøke usikkerhetene ved arbeidet. På denne måten kan en beregne produktivitet per enhet eller produktivitet per enhetskostnad for en type arbeidsverktøy. Følgelig vil en danne et godt grunnlag for fremdriftsplanlegging og redusere byggekostnader i et byggeprosjekt.

Construction Research Congress (2005) viser til et eksempel for hvordan det er gunstig å måle produktiveten til en gravemaskin. Dersom en har produksjonskapasiteten til gravemaskinen i form av hvor mye den kan grave, flytte eller laste per tidsenhet vil det åpne opp for flere muligheter. Denne informasjonen vil kunne innebære å gi et bilde på kapasiteten til gravemaskinen i større prosjekter. I tillegg vil dette komme til gode i en produksjonsprosess for å skape bedre oversikt over både produksjonsplanlegging og det økonomiske aspektet som følger. Samtidig vil det være nødvendig å analysere andre parametere som grunnforhold, drivstofforbruk, gravedybde osv., som også påvirker kapasiteten til gravemaskinen.

3.4.4 Arbeidsstudier

Som forklart i kapittel 3.4.7 var arbeidsstudier aktuelle i tunneldrift for å måle kapasiteter og ytelser. For å kunne analysere og systematisere ytelses- og kapasitetsinformasjon fra arbeidsstudier i tunneldrift viser NTNU (2016) til en videreutviklet prognose- og resultatmodell, som opprinnelig ble opprettet av Statskraftverkene Rasjonaliseringskontor.

Syklustiden vil si tiden det tar å endre noe fra en tilstand A til tilstand B (Drevland, 2016). Som et eksempel til syklustid i tunnel for utkjøring av TBM-masse i tunnel viser NTNU (2016) til at det vil si tiden fra et fullstet vaggsett har fraktet ut den inneholdte massen, og returnert tilbake som et tomt vaggsett. Salvesyklusen og hovedoperasjonene består av salvesyklusen som basisen for modellen, hvor «Rapport 2B-05» deler inn hovedoperasjonene i tre ulike deloperasjoner (NTNU, 2006):

1. Faste tapstider (riggetider)

Ifølge NTNU (2006) havner gjentakende aktiviteter fra en syklus til en annen i denne kategorien, og kalles uproduktive operasjoner. Eksempler på faste tapstider kan være innkjøring til stuff av sprøyterobot, påkobling av vann- og strømforsyning eller ettersyn av maskiner. Begrepet faste kommer av at tiden ikke påvirkes av ulike parametere i prosessen som sprøytemengde, salvelengde eller antall skiftarbeidere.

NTNU (2016) peker på at faste tapstider har blitt redusert betraktelig sett opp mot 50-tallet, som kommer av utstyr som er blitt mer mobilt og en forbedret organisasjon. Dette viser at utviklingen siden den gang ikke kun er på grunn av mer effektive maskiner.

2. Proporsjonale tider

Proporsjonale tider er det som defineres som produktiv tid som eksempelvis kan være boring og sikring (NTNU, 2006). Bakgrunnen for betegnelsen kommer av at operasjonene som utføres er proporsjonale med spesifikk bormeter eller mengde stein. På grunn av at maskinene nå har økt mekaniseringsgrad og effekt har proporsjonale tider blitt redusert siden 50-tallet NTNU (2016).

3. Tilfeldige tapstider

De tilfeldige tapstider inkluderer all tid i tunnelsyklusen som skyldes tilfeldige hendelser eksempelvis skiftbytter, personlig tid eller driftsteknisk tapstid (NTNU, 2006). NTNU (2016) viser til at de tilfeldige tapstider har blitt drastisk redusert siden 50-tallet. Reduksjonen av den personlige tiden kan forklares ved kortere arbeidsuker fra 48 til 45 i 1959 til 33,6 timer per uke i 1987, strengere krav og redusert bemanning. I tillegg har driftsavbrudd og maskinstopp som ligger under den driftstekniske tapstiden også sunket betraktelig på bakgrunn av forebyggende

vedlikehold, bedre planleggingen og bedre kvalitet på utstyret. Samtidig gir tilfeldige tapstider et inntrykk over kvaliteten til en drift, og har i dag også stor spredning.

Ved en god organisert tunneldriving vil de tilfeldige tapstidene utgjøre rundt 11,1 % av summen av de faste tapstidene og de proporsjonale tidene (NTNU, 2006).

Kapasitetene deles videre inn i netto og brutto kapasitet for lasting (NTNU, 2006):

Netto kapasitet

For netto kapasitet blir følgende tider inkludert (NTNU, 2006):

- Fylling av skuff
- Kjøring til transportenhet
- Tømming av skuff
- Kjøring til røys

Brutto kapasitet

For brutto kapasitet blir følgende tider inkludert (NTNU, 2006):

- Bytte av transportenhet
- Trimming av røys
- Utjevning av såle

Dette viser at brutto kapasitet ikke inkluderer det som har med selve lastingen å gjøre.

3.5 Bærekraft i byggebransjen

3.5.1 Generelt

Ifølge FN-sambandet (2019) blir Klimaendringer ofte omtalt som vår tids største utfordring, der konsensus er at klimaforskere rundt om i verden stort sett mener at klimaendringene er menneskeskapte. Følgelig vil det føre til store negative konsekvenser hvor noen av dem er smelting av isbreer, havstigning, variert nedbør og mer ekstremvær. Dette kommer av at menneskene slipper ut mer drivhusgasser i atmosfæren, som fører til at den naturlige mengden blir uvanlig høy og gjennomsnittstemperaturen øker. En av disse drivhusgassene som forsterker drivhuseffekten er karbondioksid, CO₂. Cho (2017) viser til at byggebransjen i dag står for omtrent 23 % av det nasjonale energiforbruket og regnes som en av bransjene som forbruker mest energi.

3.5.2 Bærekraft ved bruk av betong

SINTEF (2018) viser til at SINTEF Byggforsk har arbeidet mye med bruk av sprøytebetong som kledning i tunneler og viser til at sementen bidrar til 80-90 % av klimagassutslippet i betong. I tillegg er CO₂-fotavtrykket til sprøytebetong er betydelig større sammenlignet med konstruksjonsbetong.

Cho (2017) viser til flere ulike studier som tar for seg forskjellige måter byggebransjen kan redusere CO₂-utslippene gjennom diverse tiltak. Av disse finnes det tiltak hvor en kan endre på materialbruken i betong, som for eksempel ved å ta i bruk lavkarbonbetong, gjenbruke materialer, redusere forbruket av materialer og gjenbruke materialer.

Ifølge Aarhus (2019) ved utbygging av Bybanen i Bergen mellom Fløen og Kronstad, tas det i bruk miljøtilpasset sprøytebetong fra NorBetong som skal redusere CO₂-utslippet med 432 tonn. Det var selv avdelingen Bybanen utbygging som hadde et eget ønske om en grønnere Bybane, noe som ble tatt på alvor av Skanska. På denne måten arbeidet de på lag med betongleverandørene slik at de kunne anvende lavkarbon klasse A-betong til konstruksjon og klasse B til sprøytebetongen. NorBetong peker også på at dette prosjektet er viktig og henviser til at det er samarbeidet mellom Skanska og NorBetong som er essensielt for å lykkes. På prosjektet skal det leveres 8000-9000 kubikkmeter sprøytebetong hvor utslippet kuttes fra 310 kilo til 256 kilo per kubikkmeter ferdig sprøytebetong. Dette tilsvarer en total reduksjon på 432 tonn CO₂ sammenlignet ved bruk av vanlig sprøytebetong.

Kilde skriver at AF Gruppen og Betong Øst har lansert en ny type miljøvennlig sprøytebetong som anvender gjenvunnede masser i tilslaget. Det vil si at tilslaget blir produsert av gjenvunnede gravemasser og dermed anvender en masse som vanligvis ender på deponi. Følgelig vil det lede til en stor reduksjon av CO₂-avtrykket og derfor mener de at dette er gamechanger. Utviklerne mener selv at det er bransjens mest miljøvennlige sprøytebetong som ikke har forringede bruksegenskaper. De kommer med et eksempel der de mener at byggeplasser som skal være fossilfrie, ikke fungerer dersom betongbilen produserer byggematerialet på utsiden av anleggsplassen. På denne måten oppnår de et fossilfritt arbeidsområde, men i realiteten bare har flyttet CO₂-avtrykkene utenfor byggeplassen.

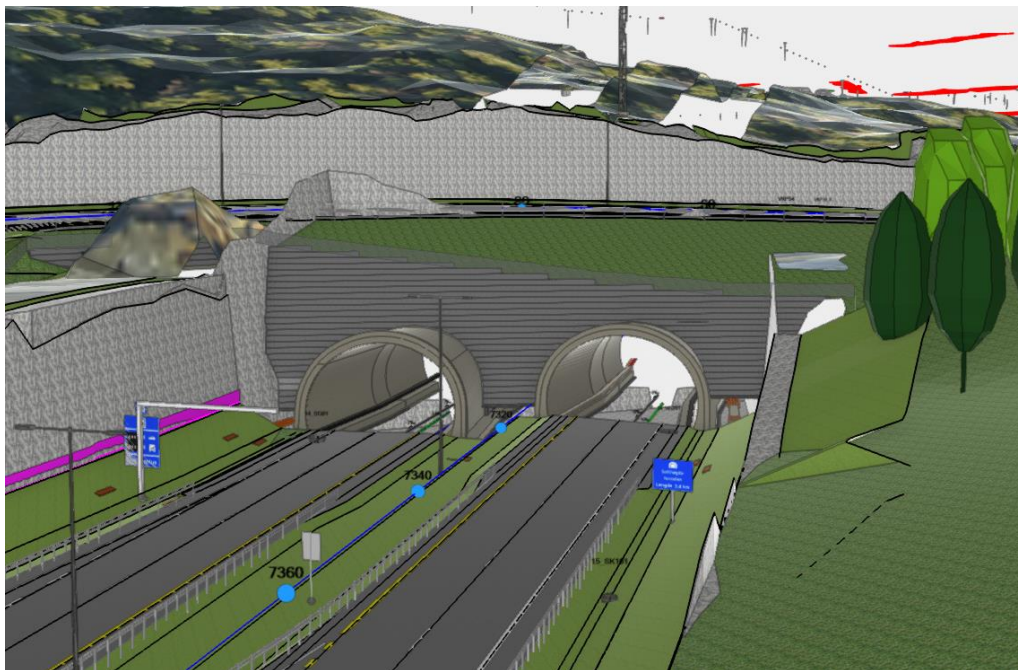
4 Beskrivelse av casestudie

4.1 E16 Bjørum - Skaret

Det ble foretatt feltstudier i Hole og Bærum kommune på den planlagte utbyggingen av parsellen E16 Bjørum – Skaret. Her er det planlagt en sammenhengende firefelts motorveg mellom Sandvika og Hønefoss (Statens vegvesen, 2018). Figur 4-1 illustrerer hvordan både det nordlige og sørlige tunnellopet for Sollihøgdatunnelen er tiltenkt å se ut ved ferdigstilling.

Prosjektet skal inneholde følgende hovedmomenter (Skanska, 2018):

- 2 tunneler, 3,4 km og 800 m
- 2 motorveikryss
- 5 bruer, totalt opp mot 220 meter
- 3 millioner m³ forflytning av masse
- Gamle E16 skal bygges om til en lokalvei med gang- og sykkelvei.



Figur 4-1: Nordlige og sørlige tunnellop til Sollihøgdatunnelen sett fra Skaret.

Statens vegvesen (2018) viser til at et av argumentene for utbyggingen mellom Sandvika og Hønefoss er å fjerne en stor flaskehals og å bedre en ulykkesbelastet del av strekningen. Motorveien er planlagt til å ha 100-110 km/t som fartsgrense og har en totalstrekning på 8,4 kilometer. Strekningen skal bestå av de to tunnelene Sollihøgdatunnelen som den tunnelen og Bukkestenshøgdatunnelen på henholdsvis 3400 meter og 800 meter. De to tunnelene er vist med stiplede linjer hvor Sollihøgdatunnelen er den nordligste illustrert i Figur 4-2.

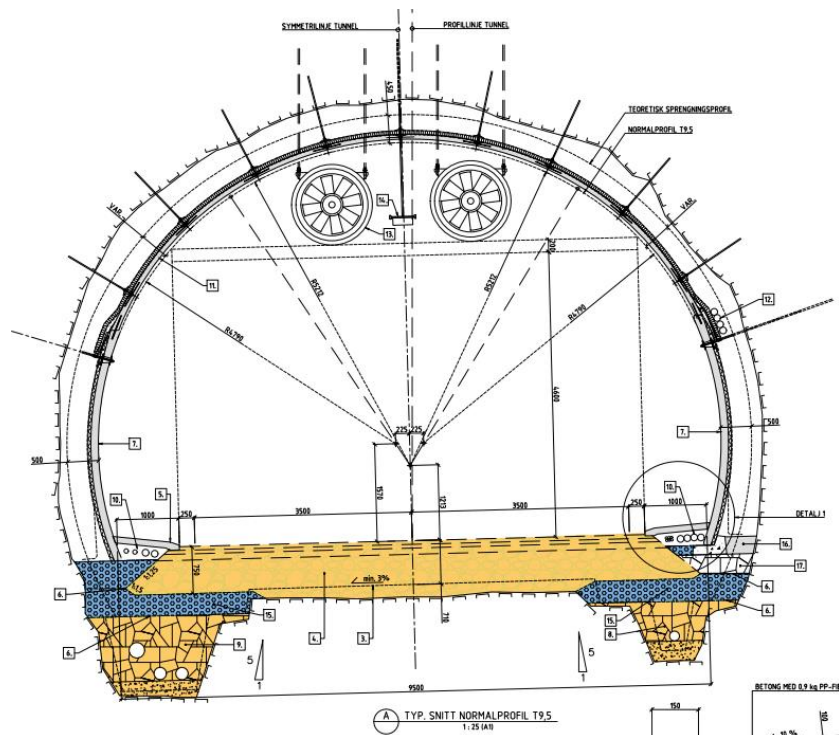


Figur 4-2: Oversiktsbilde over E16 Bjørum – Skaret (Statens vegvesen, 2020).

Prosjektet er en totalentreprise hvor Skanska er kontrahert som entreprenør og Statens vegvesen er byggherre. I konkurransen om totalentreprisen ble Skanska/ Aas-Jakobsen tildelt prosjektet med en tilbudssum på 3022 millioner kroner. Åpningen av strekningen skal skje i sommer 2025 (Statens vegvesen, 2020).

4.2 Sollihøgdatunnelen

Sollihøgdatunnelen skal bestå av 2 løp med en lengde på 3,4 kilometer som lengste tunnelen i prosjektet Bjørum – Skaret (Statens vegvesen, 2018). Feltstudiene som inkluderte tidsstudier, ble utført i både det nordlige og sørlige tunneløpet. Tunnelprofilet som drives på Skaret er med profil T9,5, se Figur 4-3.



Figur 4-3: Normalprofil T9,5 til Sollihøgdatunnelen.

Det ble observert i feltstudiene og fortalt at det jevnt over var rombeporfyr som var den dominerende bergarten ved driving av Sollihøgdatunnelen. Heimestøl (2022) viser til at noen permiske ganger av rombeporfyr kan ha stor utstrekning hvor det mellom Tyrifjorden og Valdres finnes en på 115 km. Feltstudiet som ble utført ved Sollihøgdatunnelen ligger rett ved siden av Tyrifjorden. Rade (2020) viser til at rombeporfyr er en lava- eller gangbergart som har lyse rombeformede feltspatkrystaller i en finkornet grunnmasse som er av en grålig rød til fiolett farge. Figur 4-4 viser et bilde tatt på Skaret av undertegnede der Rombeporfyr lå flere steder som sprengstein rundt om på anlegget.



Figur 4-4: Sprengstein i form av rombeporfyr fra feltstudie.

5 Resultater

5.1 Introduksjon

Dette kapitlet inneholder resultater anskaffet ved bruk av metoder for datainnsamling beskrevet i kapittel 2 Metode. Forskningsspørsmålene definerer strukturen til resultatene, se Tabell 5-1.

Tabell 5-1: Forskningsspørsmål for masteroppgaven.

Nr.	Forskingsspørsmål
1.	Hvordan benyttes sprøytebetong ved tunneldriving i dag?
2.	På hvilke måter kan en beregne produksjonskapasiteten?
3.	På hvilke måter dokumenteres sprøyteprosessen?

5.2 FS1: Bruk av sprøytebetong ved tunneldriving i dag

5.2.1 Sprøytebetong ved tunneldriving

Feltstudiene utført av undertegnede fant seg på E16 Bjørum – Skaret og inkluderte tidsstudier i Sollihøgdatunnelen. Disse foregikk både i nordgående og sørgående tunneløp omtrent 100 meter inn i tunnelen på Skaret. De bestod av tre ulike tidsstudier utført i et godt samarbeid med Skanska og Entreprenørservice. Entreprenørservice står for all fjellsikring på tunnelprosjektene til Skanska og er et heleid datterselskap av Skanska Norge AS. Følgelig ble det derfor opprettet en god forbindelse til sprøyteoperatøren som utførte påføringen av sprøytebetong for de aktuelle tidsstudiene. Entreprenørservice hadde en operatør til dagskift og en til nattskift, slik at de alltid var tilgjengelige for sprøyt når det var nødvendig. Det ble fortalt at mye av sprøytingen foregår på natten og vil derfor unngå tidskrasj med tunneldrivingen, noe som var tilfellet i alle tidsstudier.

I feltstudiet utførte Entreprenørservice sprøytingen ved bruk av våtmetoden til påføring av sprøytebetong etter sprengning, fjerning av røys og ventilering. Trussell og Jacobsen (2020) skriver at i våtmetoden blir ferdigblandet betong pumpet fra betongmottaket til sprøytemunnstykket hvor det blir tilsatt akselerator og trykkluft. På denne måten sprøytes den mot bergoverflaten slik at den størkner hurtig.

Videre i feltstudiene ble sprøyteroboter fra AMV anvendt. I første omgang rygget sprøyteroboten inn til stuff for å foreta vask av fjell før påføringen av sprøytebetong kunne starte. Av den grunn ble både vann- og strømtilførselen også påkoblet inne på stuff. Figur 5-1 viser oppstart av vask av fjell hvor sprøyteroboten er på plass klar til arbeid på stuff. En kan også se kablene for vann- og strømtilførselen til venstre i bildet.



Figur 5-1: Sprøyterobot på stuff klar til vask av fjell.

Entreprenørservice mottar basisbetong fra NorBetong i form av direkte tipp inn i et betongmottak som er avbildet i Figur 5-2. Prosessen innebærer at en operatør fra NorBetong styrer og kontrollerer betongtilførselen fra betongbilen og fjerner fiberballer, som er klumping av fiber, se Figur 5-3. Fiberballene kan tette systemet og må fjernes før den går inn i betongmottaket. I tillegg innebar det å fjerne uønskede grove partikler som legger seg på risten til betongmottaket samt notere ned klokkeslettet for start og slutt til lossingen av betongen.



Figur 5-2: Operatør fra NorBetong kontrollerer lossing av basisbetong.



Figur 5-3: Fiberball som ble fjernet fra betongmottak.

Før tidsstudiene tok sted, ble det i en uformell samtale med totalentreprenøren nevnt at en sprøyting omtrent tar 25 til 40 minutter, avhengig av hvor erfaren sprøyteoperatøren er. Etter å ha kontaktet formann på Skaret, ble det fortalt når sprøytingen skulle ta sted. På denne måten ble det utført nødvendige forberedelser til tidsstudier. Både hos totalentreprenøren og i det teoretiske rammeverket deles det inn i ulike typer sprøyt som var for salve, spiling og bue.

Det ble fortalt at tunneldriving i rombeporfyr var en fordel siden det i første omgang ikke er utfordrende å drive tunnel i. Vanligvis krever den ikke tung bergsikring og har god borsynk. Samtidig var det satt opp et par sprøytebetongbuer i noen svakhetssoner tidligere i tunnelene, men det fortelles at for det meste ble det brukt en lav sikkerhetsklasse for sikringen. Sprøytebetongen var en del av den permanente sikringen for begge tunnellopene i Sollihøgdatunnelen. Det ble kontinuerlig vurdert for hver salve om det var mulig å gjennomføre sikring for flere salver ved en sprøyt. Dette var avhengig av nødvendig sikringsmengde. Statens Vegvesen som byggherre hadde det endelige ansvaret for sikring av tunnelen.

SINTEF (2019) skriver at SINTEF, NTNU, NGI og flere ulike bedrifter startet opp et prosjekt i 2019 ved navn SUPERCON. Hensikten med prosjektet er å redusere klimautslipp ved å utvikle den norske metoden for tunneldriving. Dette innebar å ta i bruk sprøytebetong til bergsikring i tunneler i kombinasjon med berget sine egenskaper. På denne måten fokuseres det på infrastrukturprosjekter der våtsprøytemetoden videreutvikles for å gjøre den bærekraftig, dokumenterbar og konkurransedyktig. I tillegg forsøkes det å gjøre denne metoden til en mer attraktiv metode på kontinentet. I samme prosjekt skriver også Solberg (2020) at en full utstøpning er svært kostbar og lite tilpasset norske grunnforhold, sammenlignet med bruk sprøytebetong.

5.2.2 Mengdebestilling av betong

I anleggsprosjekter peker Martínez-Sánchez *et al.* (2016) på at entreprenører har incentiver om å vite tykkelse og volum av påført sprøytebetong av både tekniske og økonomiske grunner. Dette innebærer å få en kvalitetsdokumentering for styrken til sprøytebetongen i tillegg til å unngå overbestilling av betongmengder som ikke tas i bruk.

Fra feltstudiene påpeker Entreprenørservice at det er oppdragsgiver som beregner nødvendig volum for sikringen for hver gang det skal utføres sprøyting. Dette baseres på teoretisk volum, fjellfaktor, erfaring fra tykkelsesmålinger og andre spesielle forhold. Selmer *et al.* (2014) mener at metoden skjer på omtrent samme måte når volumet til sprøytebetongen beregnes i tunnel ved å gange det teoretiske

volumet i tunnelen med en ujevnhetsfaktor. Denne faktoren baserer seg på erfaring og tar utgangspunkt i fra forrige utførte sprengning i tunnelen.

Videre fortelles det i feltstudiene at det er sprøyteoperatøren som har ansvaret for å påføre den bestilte mengden så jevnt som mulig på bergoverflaten som skal sikres. Sprøyteoperatøren tar derfor hensyn til geologien i fjellet, som for eksempel ved utfall og sprekker. I feltstudiene ble det fortalt at det utføres på samme måte som Entreprenørservice beskriver, og at i dette tilfellet var det totalentreprenør Skanska som bestilte betongen.

I en e-post mottatt av Entreprenørservice, skriver de at tykkelsen til sprøytebetongen blir målt av drivere fra Skanska. Dette gjøres ved å måle boltehullene og dermed kvalitetssjekker resultatet til påføringen. Videre mener de at tykkelsen kan være avhengig av flere faktorer enn bare sprøyteoperatøren. Siden oppdragsgiver bestiller betongen, kan det bestilles for liten mengde som vil føre til at det ikke er nok til å dekke kravet om bestilt tykkelse på den bestemte overflaten. En erfaren sprøyteoperatør vil ofte kunne være i stand til å si om det er bestilt for lite eller for mye betong for en sprøyt med gitt tykkelse. Dette kommer av at operatøren gjennomgår hundrevis av sykluser med sprøyting og kan bekrefte antagelsene sine om påført tykkelse ved å sjekke påfølgende tykkelsesmåling.

5.3 FS2: Produksjonskapasitet til en sprøyterobot ved tunneldriving

Produktivitet

Den typiske norske tunnelarbeideren arbeider på akkord og blir betalt pr. meter inndrift og utført sikring (Nilsen, 2017). I byggebransjen er lønnsomhet et av de mest essensielle temaene for et byggeprosjekt, ifølge Construction Industri Institute (2022). I tillegg er det også en av de mest brukte suksesskriteriene når det kommer til byggeprosjektet, der det er den mest kritiske faktoren. På denne måten er viktigheten til produktivitet svært stor for blant annet industrien, entrepriser eller økonomien. Derfor har byggeprosjekter et overordnet mål om å oppnå størst mulig inntjening i løpet av hele prosessen ved gjennomføring. Videre skriver de at begrepet produktivitet sees på som sammenhengen mellom output og tilhørende input som en får ut fra produksjonsprosessen. Derfor kan en sette opp produktivitet som forholdet mellom output og input i byggebransjen og kan uttrykkes på denne måten:

$$\text{Produktivitet} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

Grimstad og Norsk betongforening (2011) viser til at ved utføring av sprøyting må sprøyteutstyret rettes i alle mulige ulike vinkler; ovenfra, nedenfra, forfra og bakfra. Følgelig fører dette til en total utnyttelse av bevegeligheten til sprøyteroboten. Av den grunn kan den maksimale pumpekapasiteten til sprøyteutstyret sjeldent utnyttes for fullt. De viser og til at produksjonskapasitet til sprøyteroboter angis med enhetene kubikkmeter per time. Derfor vil en typisk norsk sprøyterobot ha gjennomsnittlig produksjonskapasitet på 10-20 m³/time. Kurth, Gause og Rispin (2004) mener på lik linje, at en sprøyterobot kan oppnå en produksjonskapasitet opp mot 20 m³/time.

Yang *et al.* (2014) peker på at en anvender avansert teknologi ved bruk sprøytebetong som sikringsmetode. Ved å øke produktiviteten ved bergsikring innen ulike felt, kan det øke fremdriften og kvaliteten på sikringen. Følgelig vil en kunne redusere sikringsmengden og dermed kostnadene som også vil være av stor verdi ved tunneldriving.

5.3.1 Tidsstudier

Tidsstudiene består av totalt tre utførte studier som er inndelt etter tunnellop for Sollihøgdatunnelen. Samtlige av tidsstudiene inkluderer flere sprøyt og var allerede sikret med sikringsbolter i planlagt område for sprøyting. Tidsstudie I, II og III inneholdt henholdsvis 2, 4 og 2 sprøyt som kan sees i

Tabell 5-2. Her vises nøkkelinformasjon om de ulike tidsstudiene som er utført. Blant annet har både tidsstudie I og III totalt bestilt 14 m³ betong, mens tidsstudie II har bestilt 28 m³. I alle tre tidsstudiene ble det sprøytet for type salve og anvendt en sprøyterobot av typen AMV 7450 med stempelpumpe for betongen. Som nevnt i kapittel 3 Teoretisk rammeverk har denne modellen en teoretisk pumpekapasitet på 25 m³/time (AMV, 2008).

Tabell 5-2: Nøkkeltall for tidsstudiene I, II og III i Sollihøgdatunnelen.

Nøkkeltall for tidsstudier i Sollihøgdatunnelen			
Tidsstudie	I	II	III
Dato	02.nov	02.nov	03.nov
Tunnel	Sørgående	Nordgående	Nordgående
Sprøyterobot	AMV 7450	AMV 7450	AMV 7450
Kallenavn	Solan II	Solan II	Elgen
Bestilt volum	14 m ³	28 m ³	14 m ³
Volum per lass	7 m ³	7 m ³	7 m ³
Antall lass	2	4	2
Bestilt tykkelse	8 cm	8 cm	8 cm
Type sprøyt	Salve	Salve	Salve

Basert på «Rapport 2B-05» er sprøytesyklusen for tidsstudiet delt inn i følgende hovedoperasjoner for de tre ulike tidene (NTNU, 2006):

1. Faste tapstider (riggetider)

Innkjøring til stuff
 + Klargjøring
 + Vask av berg
 + Nedrigging
 + Utkjøring fra stuff
 = sum faste tapstider

2. Proporsjonale tider

Sprøyting
 = sum proporsjonale tider

3. Tilfeldige tapstider

Driftstekniske tapstider, personlig tid, annen heft

Som nevnt i det teoretiske rammeverket legger NTNU (2006) frem hvilke aktiviteter som netto og brutto kapasitet inkluderer for lastning ved tunneldriving. Tilsvarende kan følgende aktiviteter settes opp for tidsstudiet for observasjon av en sprøyterobot i aksjon:

Netto kapasitet

For netto kapasitet blir følgende tider inkludert (NTNU, 2006):

- Sprøyting

Brutto kapasitet

Brutto kapasitet inneholder tider som ikke er direkte forbundet med sprøyting. Av den grunn blir følgende tider inkludert for brutto kapasitet (NTNU, 2006):

- Innkjøring til stuff
- Klargjøring
- Vask av berg
- Nedrigging
- Utkjøring fra stuff

Aktiviteter

De ulike aktivitetene er inndelt etter hva de innebærer og starter med innkjøring til stuff og avsluttes med utkjøring fra stuff. Følgelig vises det i Tabell 5-3 hva de ulike aktivitetene kan innebære.

Tabell 5-3: Aktivitetsinndeling for tidsstudiene med tilhørende informasjon.

Aktiviteter for tidsstudier		
Aktivitet	Kan inneholde	Type tid
Innkjøring	Rygge inn til stuff	Fast tapstid
Klargjøring	Betongrenne rettes i posisjon, start av betongpumpe, gå til hytte, flytt av sprøyterobot mellom sprøyt	Fast tapstid
Vask av berg	Starte vannpumpe, spyle heng og vegg	Fast tapstid
Nedrigging	Vaske utstyr, sette operatørhytte på plass, koble av vann- og strømforsyning	Fast tapstid
Utkjøring	Kjøre ut fra stuff	Fast tapstid
Sprøyting	Starte betongpumpe, påføre sprøytebetong	Proporsjonal tid
Driftsteknisk tapstid	Maskinfeil, personlig tid, annen heft	Tilfeldig tapstid

Siden det ikke sprøytes samme antall sprøyt i tidsstudiene, vil dette påvirke rekkefølgen for aktivitetene avhengig av antall sprøyt. I forkant av feltstudiene ble det tipset om å notere ned alle usikkerhetsmomenter og parametre underveis i tidsstudiene. Dette for å skaffe mest mulig informasjon om forholdene i feltarbeid.

Til tross for nøye planlegging for aktivitetene i forkant av tidsstudiene, ble inndelingen delvis endret underveis. Dette oppstod i tidsstudie I hvor undertegnede ble usikker på inndeling til to av aktivitetene. Følgelig ble inndelingene av de to aktivitetene undersøkt nærmere før neste tidsstudie tok sted. Ved bruk av en digital tidtaker ble varigheten for hver aktivitet notert for hånd, samt annen informasjon verdt å loggføre. På samme måte viser Aasland (2015) til at det faktiske svaret finner en i praksis og henviser til uttrykket; «The proof of the pudding is in the eating».

Aktiviteter og tidsbruk for tidsstudie I, II og III

I forbindelse med tidsstudiene ble det satt opp komplette forløp for de inndelte aktivitetene med tilhørende tidsvarighet. Tabell 5-4 illustrerer hva de ulike fargene i cellene representerer for Tabell 5-5, Tabell 5-6, og Tabell 5-7. De gule cellene inneholder faste tapstider (riggtider), de grønne proporsjonale operasjonstider og de lyserøde tilfeldige tapstider.

Tabell 5-4: Betydning for fargene i cellene for tidsstudiene.

Faste tapstider ("Riggtider")	Proporsjonale operasjonstider	Tilfeldige tapstider
--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------

I tidsstudie I ble alle aktivitetene utført kontinuerlig i rekkefølgen vist i Tabell 5-5. Følgelig ble det gjennomført to sprøyt med kun 2 minutter mellom sprøytene. Dette innebærer å flytte den tomme betongbilen og vente på innkjøring av neste betongbil. Ved aktivitet nummer 4 sprøyting ble det observert et større kakednedfall fra vegg omtrent midtveis i sprøytingen.

For tidsstudie I kom syklustiden på 1 time, 9 minutter og 44 sekunder.

Tabell 5-5: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie I.

		Tidsstudie I							
Aktivitet		Innkjøring	Klargjøring	Vask av berg	Sprøyting	Klargjøring	Sprøyting	Nedrigging	Utkjøring
Tidsbruk [t:min:sek]		00:00:30	00:04:15	00:09:48	00:22:13	00:02:03	00:23:28	00:05:56	00:01:31
Rekkefølge		1	2	3	4	5	6	7	8

Under tidsstudie II ble syklusen stoppet to ganger på grunn av venting på betonglass mellom sprøytene. Dette skjedde først før sprøyt 1 med 10 minutters ventetid og 38 minutter mellom sprøyt 2 og 3. Disse aktivitetene er ikke ført inn i tidsstudiet, siden de ikke går under som noen av tidsinndelingen. I både aktivitet nummer 4 og 6 under sprøytene ble det observert et større kakednedfall fra henholdsvis vegg og heng, se Tabell 5-6. Kakednedfallet i aktivitet nummer 4 tok sted omtrent midtveis i sprøytingen, mens kakednedfall i aktivitet nummer 6 skjedde mot slutten av sprøytingen.

For tidsstudie II endte syklustiden på 2 timer, 8 minutter og 41 sekunder.

Tabell 5-6: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie II.

Tidsstudie II						
Aktivitet	Innkjøring	Klargjøring	Vask av berg	Sprøyting	Klargjøring	Sprøyting
Tidsbruk [t:min:sek]	00:00:32	00:04:11	00:09:22	00:21:35	00:02:11	00:28:05
Rekkefølge	1	2	3	4	5	6
<hr/>						
Aktivitet	Klargjøring	Sprøyting	Klargjøring	Sprøyting	Nedrigging	Utkjøring
Tidsbruk [t:min:sek]	00:01:51	00:26:09	00:01:13	00:24:39	00:08:28	00:00:25
Rekkefølge	7	8	9	10	11	12

Aktivitetene for sprøyting i Tidsstudie III ble begge påvirket som følger av problemer med sprøyterobot, se Tabell 5-7. Dette kommer av at det oppstod problemer med kompressoren i sprøyteroboten slik at betongpumpen ikke fungerte. Derfor oppstod det driftstans over lengre tid som det ble valgt å ekskludere i dette tidsstudiet, siden det ikke inngår som noen av de inndelte tidene. Problemet vedvarte en god stund og tok totalt 1 time og 7 minutter å fikse. I tillegg påvirket det begge sprøytene og nedriggingen i negativ forstand med henholdsvis aktivitetsnummer 4, 6 og 7.

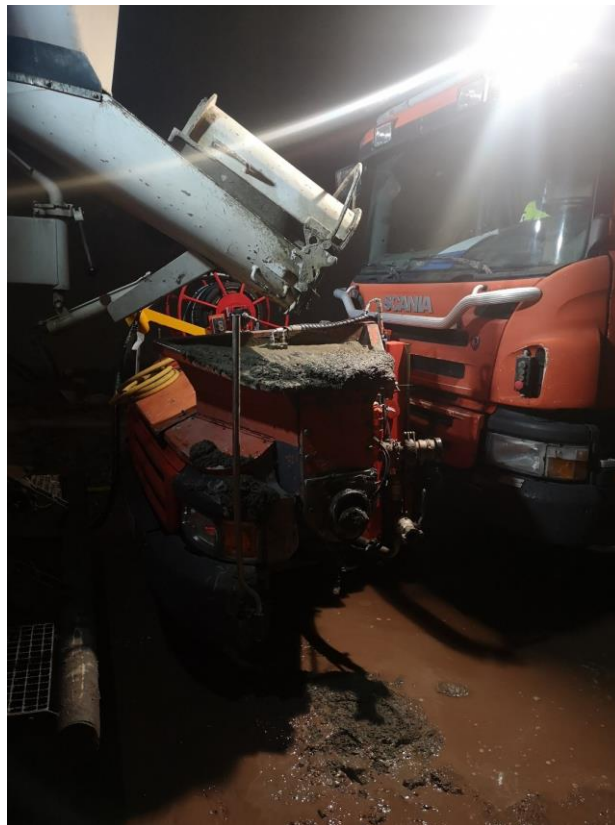
Tidsstudie III sin syklustid endte på 1 time, 41 minutter og 55 sekunder.

Tabell 5-7: Rekkefølge for aktiviteter med tilhørende varighet for tidsstudie III.

Tidsstudie III								
Aktivitet	Innkjøring	Klargjøring	Vask av berg	Sprøyting	Klargjøring	Sprøyting	Nedrigging	Utkjøring
Tidsbruk [t:m]	00:00:32	00:03:27	00:09:22	00:32:56	00:02:13	00:39:31	00:14:07	00:02:00
Rekkefølge	1	2	3	4	5	6	7	8

I Figur 5-4 kan en se hvordan driftstansen påvirket betongmottaket på grunn av at betongpumpen ikke fungerte. Følgelig ble det forsøkt å sjekke for andre grunner til stopp, blant annet ved å fjerne betongslangen som også er avbildet på bunnen av Figur 5-4. Mot slutten av sprøytingen i aktivitet 6, ble det oppdaget at årsaken til problemet var i form av trøbbel med kompressoren.

Under tidsstudiene ble det også lagt merke til at ved sprøyteaktiviteten ble det sprøytet bortimot kontinuerlig. Derfor var det få perioder med stans av sprøyting, fordi sprøytebommen og munnstykket endret plassering og vinkel ved hurtige bevegelser. I tillegg ble det foretatt uformelle samtaler med sprøyteoperatøren under tidsstudiene. Det var samme sprøyteoperatør som utførte alle sprøytene. Det kom frem at han var en erfaren sprøyteoperatør. Han uttalte at selve sprøytingen ofte ikke er tidskrevende, men at andre forhold som venting på betong påvirket i negativ forstand.



Figur 5-4: Betongmottaket stappfullt av basisbetong på grunn av trøbbel med sprøyterobot.

Under sprøyt 3 oppstod det som nevnt problemer med sprøyteroboten som skapte tapstid i form av stans som ga en negativ påvirkning for de to påfølgende sprøytene. I Tabell 5-8 er det lagt frem en tidsoversikt for tidsstudiene I, II og III. Det viser seg at ingen av tidsstudiene inneholder tilfeldige tapstider. På denne måten vil de sett under ett ikke kunne gi ut et forholdstall mellom de tilfeldige tapstidene og summen av faste tapstider, samt de proporsjonale operasjonstidene.

Derimot bidrar samtlige av tidsstudiene for de faste tapstider og de proporsjonale operasjonstider.

Tabell 5-8: Tidsoversikt for tidsstudier.

Tidsoversikt for tidsstudier i Sollihøgdatunnelen			
Tidsstudie	I	II	III
Faste tapstider [min]	24,1	28,2	29,5
Proporsjonale operasjonstider [min]	45,7	100,5	72,5
Tilfeldige tapstider [min]	0	0	0
Tilfeldige tapstider / (Faste tapstider + Proporsjonale operasjonstider) [%]	-	-	-

Sprøytekapasiteter for tidsstudie I, II og III

Aune og Lima (1992) skriver at brutto tidsforbruk tilsvarer effektiv tid der en inkluderer all arbeidstid som er nødvendig for å drifte normalt. På bakgrunn av dette blir de to tidene i tidsstudiet II som inneholder venting på betonglass valgt å ekskluderes fra brutto tidsforbruk, og inkluderes derfor heller ikke i brutto kapasitet. Dette ble gjort på grunn av at det ikke har noe å gjøre med noen av aktivitetene, men må eventuelt ordnes uavhengig av sprøyteprosessen.

Som i tidsstudie II forekommer det også tapstid i tidsstudie III, der det var problemer med kompressoren til sprøyteroboten. Siden dette er en aktivitet som er tidkrevende og sjeldent vil oppstå, er det valgt å ekskludere denne i brutto tidsforbruk. Dette baserer seg også på det Aune og Lima (1992) skriver om at brutto tidsforbruk er det samme som effektiv tid, og vil i dette tilfellet ikke anses som tilfeldig tapstid. Dersom dette tilfellet forekommer regelmessig vil det heller være naturlig å inkludere, noe som ikke realistisk å anta.

Dermed kan nøkkeltall basert på tidsstudie I, II og III beregnes, se Tabell 5-9. Mengde sprøytebetong er lagt frem i kubikkmeter, netto og brutto tidsforbruk er i minutter, og sprøytekapasiteten i kubikkmeter per time. Tidsstudie II skiller seg ut ved å ha bestilt 28 m³ betong, altså dobbelt så mye som tidsstudie I og III som har 14 m³ betong. Følgelig blir både netto og brutto tidsforbruk betydelig større for tidsstudie II enn for tidsstudie I og III. Tidsstudie III får en del høyere verdier for netto brutto tidsforbruk enn for tidsstudie I med samme mengde betong. Dette kommer på bakgrunn av det nevnte problemet med sprøyteroboten som forlenget tidsbruken.

For tidsstudie I og II skiller det ikke store verdier mellom netto og brutto sprøytekapasitet, selv om mengden betong er doblet i sistnevnte tidsstudie. Følgelig ligger netto og brutto sprøytekapasitet henholdsvis på 18,4 m³/t og 16,7 m³/t og 12,1 m³/t og 13,1 m³/t for tidsstudie I og II. Også her skiller studie III seg ut ved å både ha betraktelig mindre netto og brutto sprøytekapasitet på henholdsvis 11,6 m³/t og 8,2 m³/t, som igjen påvirkes av den problemet med sprøyteroboten.

Tabell 5-9: Nøkkeltall for utførte tidsstudier.

Nøkkeltall for tidsstudiene			
Type resultat	Tidsstudie I	Tidsstudie II	Tidsstudie III
Mengde betong [m ³]	14	28	14
Netto tidsforbruk [min]	45,7	100,5	72,5
Brutto tidsforbruk [min]	69,7	128,7	101,9
Netto sprøytekapasitet [m ³ /t]	18,4	16,7	11,6
Brutto sprøytekapasitet [m ³ /t]	12,1	13,1	8,2

5.3.2 Sprøyterapporter

For hver sprøyt som Entreprenørservice gjennomfører, blir det opprettet dokumentering i form av en sprøyterapport. Denne inkluderer det meste av informasjon knyttet til sprøytingen som innebærer en følgeseddel fra NorBetong, utfylt informasjon av Entreprenørservice, i tillegg til en skisse av type sprøyt i tunnelprofilet. Tabell 5-10 viser et eksempel på første side til en sprøyterapport, hvor viktige parametere er inkludert. Dette er blant annet tidspunkt for start og stopp av sprøyting og vask av fjell som noteres ned av Entreprenørservice som ble tatt i bruk til dokumentstudiet.

Tabell 5-10: Utklipp av utfylt sprøyterapport med informasjon om sprøyting

SPRØYTEBETONG

Prosjektnavn	E16 Bjørum - Skaret - tunnel	Dato	27.10.2021
Prosjektnr.	245653	Ukenr	43
Tunnel	Sollihøgdatunnelen	Skift	Dagskift
Stuff	Skaret nordgående		
Profil	7213 – 7207		
Bak stuff:	Nei		
Fiber:	Ja		
Bestilt tykkelse [cm]	10		
Betong bestilt til	27.10.2021 16:15		
Start sprøyt kl.:	27.10.2021 16:15		
Slutt sprøyt kl.:	27.10.2021 17:15		
Start vask av fjell kl.	27.10.2021 16:00		
Avsluttet vask av fjell kl.	27.10.2021 16:15		
Fjelloverflate [m2]			
LASS			
Følgeseddelnr	Mengde [m3]	Total mengde [m3] på følgeseddelen	
#188120	8 m3	8 m3	

Følgeseddelen fra NorBetong inneholder blant annet bestilt volum av betong, egenskaper til betongen som leveres og tidspunktene for lossetid av betong og ankomst byggeplass, se Tabell 5-11. Her vises det at det ble bestilt en mengde på 4 m³ og at alt ble losset av betongbilen. I tillegg følger noen av betongegenskapene med som i dette tilfellet er fasthetsklasse B35, en bestandighetsklasse M-45 og en maks diameter på tilslaget på 8 mm.

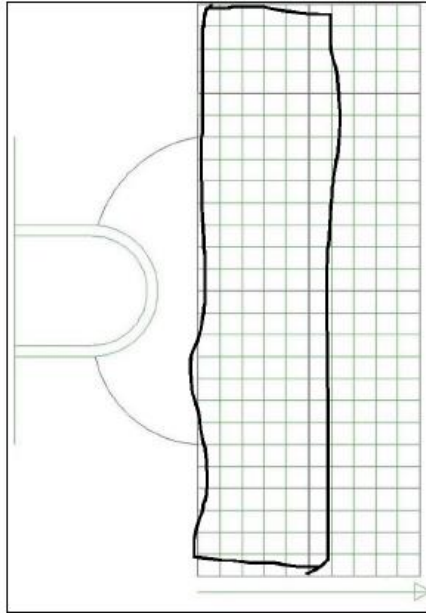
Tabell 5-11: Utklipp fra følgeseddel i sprøyterapport som viser informasjon fra NorBetong.

Følgeseddelvolum	4.0m ³	Bestilt volum	4.0m ³	Rest. volum	0.0m ³
-------------------------	-------------------	----------------------	-------------------	--------------------	-------------------

Spesifisering av varen	B35 M45 D8 SPRØYTEBETONG STD(FA)/SIL CL 0,1
Synk/utbredelse	220
Betongtemperatur	°C

Blandingstidspunkt	03:12	Ankomst byggeplass	03:45	Lossetid start	03:59	Lossetid slutt	04:16
Bestilt lossetid	30 min						
Kjørelengde	20 km						
Lossemåte	Direkte tipp						

Fra skissen som legges inn som en del av sprøyterapportene, kan en lese av hvor i tunnelprofilen og hvilken type sprøyt som er utført, se Figur 5-5. På denne måten kan en raskt lese av informasjon om sprøytingen. Rutenettet har en bredde på 10 meter slik at i dette tilfellet er det rundt 5 meter som ble sprøytet for. I tillegg til å lese av fra skissen var det ofte lagt igjen en kommentar på hvilken type sprøyt det var. Sammen med skissen har det på denne måten vært mulig å dele inn de ulike type sprøytene sprøytet for salve, spiling og bue. I dette tilfellet er det en sprøyting som utføres for bergsikring på 5 meter etter en salve i det nordlige tunneløpet av Sollihøgdatunnelen.



Figur 5-5: Utklipp fra sprøyterapport som illustrerer sprøytetype salve i tunnelprofilet.

Det ble tildelt sprøyterapporter for all sprøyt som var utført på Sollihøgdatunnelen for både det nordlige og sørlige tunnellopet fra Skaret. Dette inkluderte totalt 69 sprøyterapporter for nordgående tunnellop og 63 sprøyterapporter for sørgående tunnellop. Derfor er alle disse sprøyterapportene gjennomgått hvor sprøytekapasiteten er beregnet for hver enkelt sprøyt og kategorisert etter type sprøyt.

Som nevnt viser vedlegg 2 et utklipp av loggføringen av de enkelte sprøyterapportene. Dette er for det sørgående tunnellopet og illustrer hvilken informasjon som er hentet ut. Sprøytene ble inndelt kronologisk etter hvilken uke de ble utført i med informasjon som blant annet dato, type skift, bestilt tykkelse, varighet for vask av fjell, total sprøytetid, bestilt mengde og sprøytetid per sprøyt.

Ifølge sprøyterapportene ble det utført vasking av fjell sjeldnere i starten av drivingen fra uke 36, men dette ble mer vanlig etter hvert. Et fåtall av sprøyterapportene inneholdt informasjon som dannet mistanke om feil loggføring, men flesteparten disse ble inkludert i analysen dersom tilhørende kommentar ikke nevnte spesielle grunner.

I Tabell 5-12 vises en oversikt over beregnet netto sprøytekapasitet for sprøytetypene salve, spiling og bue fra sprøyterapportene. Videre omtales nordgående tunnellop for NG og sørgående for SG. Det viser seg at netto sprøytekapasitet for både NG og SG ligger mellom $12,7 \text{ m}^3/\text{t}$ og $15,0 \text{ m}^3/\text{t}$ for alle sprøytetypene, der ingen skiller seg klart ut. Netto sprøytekapasitet for NG og SG for spiling ender på $14,1 \text{ m}^3/\text{t}$ hvor en sammenligning med salvesprøyt ender på $0,8 \text{ m}^3/\text{t}$. Netto sprøytekapasitet for NG og SG i siste rad er vektet ut fra antall sprøyt da de inneholder ulikt antall sprøyt.

Tabell 5-12: Sprøytekapasitet for sprøyterapporter.

Sprøytekapasitet Sollihøgdatunnelen			
Type sprøyt	Salve	Spiling	Bue
Netto sprøytekapasitet NG [m³/t]	13,9	13,1	14,6
Netto sprøytekapasitet SG [m³/t]	12,7	15,0	12,9
Netto sprøytekapasitet NG og SG[m³/t]	13,3	14,1	13,8

Mengdene som er tatt for seg i sprøyterapportene som gir sprøytekapasitetene ovenfor i Tabell 5-12, baserer seg på mengdene som kan sees i Tabell 5-13. Mengde betong fra salve, spiling og bue ender på henholdsvis 730 m³, 196 m³ og 223 m³ der det er analysert en total mengde på 1149 m³. På denne måten er det mengdene for salvesprøyt som dominerer, mens spiling og bue ligger omtrent på lik linje. Ingen av sprøytetypene skiller seg ut når en sammenligner mengdene for NG og SG.

Tabell 5-13: Mengde betong analysert fra sprøyterapporter.

Mengder Betong Sollihøgdatunnelen			
Type sprøyt	Salve	Spiling	Bue
Mengde betong NG [m³]	391	92	121
Mengde betong SG [m³]	339	104	102
Mengde betong NG og SG [m³]	730	196	223

5.3.3 Tidsstudier vs. Sprøyterapporter

For å kunne sette opp en best mulig sammenligning av utført tidsstudie og tildelte sprøyterapporter, er det valgt å se på netto sprøytekapasitet til hver av sprøytene. I dette tilfellet er de kalt sprøyt 1, 2 og 3. Netto sprøytekapasitet fra tidsstudie I, II og III er tidligere kjent fra kapittel 5.3.1, mens netto sprøytekapasitet er hentet ut fra de enkelte sprøyterapportene. Det vil si at det er hentet ut tilsvarende sprøyt som for tidsstudiene.

Tabell 5-14 viser hvordan forskjellen på netto sprøytekapasitet mellom tidsstudiene og sprøyterapportene er forholdsvis små, der sprøyt 1 skiller seg mest ut med 2,2 m³/t i favør tidsstudiet. Sprøyt 2 viser seg å kun skille 0,1 m³/t hvor målingene nesten samsvarer. Til slutt ender sprøyt 3 på 11,6 fra tidsstudiet og 9,7 fra sprøyterapporten. Følgelig vitnes det om at samtlige av tidsstudiene ender på en høyere sprøytekapasitet enn for sprøyterapportene. Sprøytekapasiteten fra tidsstudiene og sprøyterapportene har i stor grad blitt påvirket av trøbbelet i sprøyt 3. Dermed utgjør det en differanse mellom sprøyt 2 og 3 på henholdsvis på 5,1 m³/t og 6,9 m³/t.

Tabell 5-14: Sprøytekapasitet for tidsstudier sett opp mot sprøyterapporter.

Sprøytekapasitet Tidsstudie vs. Sprøyterapporter			
	Sprøyt 1	Sprøyt 2	Sprøyt 3
Tidsstudier:	18,4	16,7	11,6
Netto sprøytekapasitet [m³/t]			
Sprøyterapporter:	16,2	16,6	9,7
Netto sprøytekapasitet [m³/t]			

5.3.4 Sammenligning med enhetstidsystem

Det er valgt å sammenligne innsamlede data og beregnede sprøytekapasiteter med «Rapport 2F-99» som er et enhetstidsystem for driving, sikring og innredning fra NTNU (1999). Rapporten er ment som et verktøy til blant annet fremdriftsplanlegging mot bygging og forutsetter at fjellforholdene er middels til gode. I tillegg forutsettes det at utstyrsbruken blir optimalisert. Dette er også tilfellet i masteroppgaven. De opererer med bruk av totaltid for sprøyting, noe som tilsvarer det samme som brutto tidsforbruk i masteroppgaven. Av den grunn vil det være mulig å sammenligne brutto sprøytekapasitet for tidsstudie II mens for netto tidsforbruk fra sprøyterapportene må riggtider legges til. I tillegg må tidsstudie I og III justeres opp til 10 meter. Ved sammenligning er alle sprøyt for salve på 10 m hvor prelltap er inkludert.

Alle tidsstudiene er av tykkelse 8 cm, sprøytet for salve og vil derfor kunne tas i bruk ved sammenligningen. Derimot er tidsstudie I og III sprøytet for 5 meter og tidsstudie II for 10 meter. På grunn av at dette må en legge til 2 aktiviteter med klargjøring og 2 sprøyt, se vedlegg 4 for beregningsgrunnlaget. I tillegg legges aktiviteter for tidsstudie I og III og med en dobling i mengde betong, altså 28 m³, mens brutto sprøytekapasitet for tidsstudie II forblir den samme.

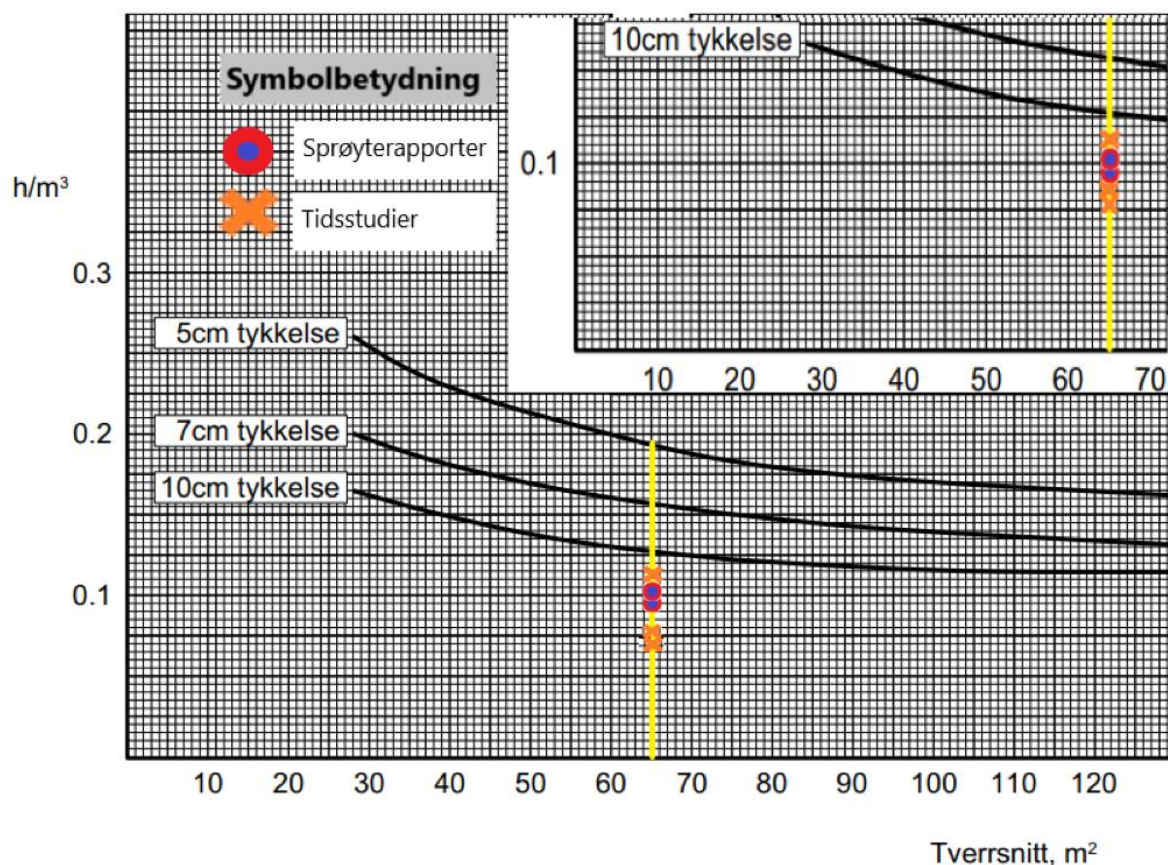
Siden ingen av tidsstudiene inneholder driftsteknisk tapstid, kan en beregne forholdet mellom netto tidsforbruk og brutto tidsforbruk og deretter justere tidsbruken. På denne måten kan en beregne gjennomsnittlige riggtider og legge til slik at netto sprøytekapasitet blir til brutto sprøytekapasitet.

Forholdet mellom netto og brutto sprøytekapasitet for tidsstudiene ender på 78,6 %. Dermed beregnes brutto sprøytekapasitet for salve basert på tilhørende netto sprøytekapasitet fra sprøyterapportene, se Tabell 5-15. Til slutt gjøres de om til inverser slik at de kan sammenlignes. Tykkelsen til sprøytene fra sprøyterapportene, er ikke entydig og varierer siden de baserer seg på alle salvesprøyt etter omtrent 8 uker med driving.

Tabell 5-15: Verdier som sammenlignes med eksisterende enhetstall.

Verdier til sammenligning		
Kilde	Brutto sprøytekapasitet	Invers
	[m ³ /t]	[t /m ³]
Tidsstudie I	14,1	0,071
Tidsstudie II	13,1	0,077
Tidsstudie III	9,4	0,11
Sprøyterapport NG	10,9	0,092
Sprøyterapport SG	10,0	0,1

Videre er inversene av brutto sprøytekapasitet fra Tabell 5-15, plottet inn i Figur 5-6 for å sammenligne med tidligere tidsestimater for sprøyting fra 1999. Sollihøgdatunnelen har et tunnelprofil på T9,5 og basert på verdier fra Kim og Bruland (2009) antas det et tverrsnitt på 65 m². Det er derfor tegnet opp en gul linje for å tydeliggjøre at alle verdiene er på samme linje og for samme tunneltverrsnitt. Det er også lagt inn en forstørrelse av plottene øverst til høyre i Figur 5-6. Det viser seg at alle resultatene fra masteroppgaven havner på et lavere tidsforbruk per kubikkmeter sprøytebetong enn det NTNU (1999) tidligere har beregnet.



Figur 5-6: Brutto sprøytetid med kapasitet fra sprøyterapporter og tidsstudier markert (NTNU, 1999).

5.3.5 Bærekraft i en produksjon

Behera *et al.* (2014) peker på at en av hovedutfordringene innen bærekraft er mengden av råvarer som må til for å produsere materialer, eksempelvis betong. Samtidig viser nyere trender at byggebransjen er i ferd med å omstille seg ved å ta i bruk alternativ bruk av materialer, som kan

erstatte bruken av råvarene til å lage produktene. På denne måten kan en redusere miljøbelastningen når det gjelder forurensning, avfallshåndtering, global oppvarming og energiforbruk.

Trussell og Jacobsen (2020) peker på at sammenhengen mellom bærekraft og sprøytebetong som bergsikring hovedsakelig avhenger av forbruket av betongen, betongsammensetningen og holdbarheten til betongen.

Som nevnt av SINTEF (2019) vil prosjektet SUPERCON forsøke å forbedre og fremme den norske tilnærmingen for bergsikring som er godt tilpasset til de fleste geologiske forhold. Tilnærmingen inkluderer påføring av sprøytebetong som et essensielt tema hvor formålet går ut på å anvende metoden som en tids- og kostnadseffektiv metode der det settes søkelys på viktige områder som bruk av bærekraftige råvarer, produksjonsprosesser og reduksjon av materialforbruk.

Solberg (2020) legger frem sprøytebetong som et godt alternativ til bergsikring på innsiden av tunnelene fremfor bruk av full utstøpning. Dette kommer av at bruken av sprøytebetong ofte er betraktelig tynnere på 8 cm til 20 cm fremfor helstøpte betonghvelv som kan være opp mot flere desimeter tykke. Følgelig vil en reduksjon av betongforbruket føre til mindre kostnader til materialforbruket. Redusert materialforbruk vil også kunne føre til ytterligere konsekvenser, som å minke byggetiden og redusere CO₂-avtrykket på grunn av blant annet mindre behov for transport av materialer. SUPERCON er delt opp i flere arbeidspakker, hvor FNs bærekraftsmål 9, 11, 12 og 13 skal inngå i prosjektet (Sustainable development, 2021).

5.4 FS3: Dokumentering av sprøytebetong ved tunneldriving

Dokumentering

Grimstad og Norsk betongforening (2011) viser til det har vært en varierende kultur på å dokumentere sikringsarbeid basert på empirisk erfaring. Derimot har det i senere tid blitt opprettet krav til dokumentering av bergmassekvalitet og geologi ved å anvende et klassifikasjonssystem. Før den permanente sikringen bestemmes, skal tilstanden til arbeidssikringen og totalstabiliteten observeres og kontrolleres. Eksempler på lav grad av kontroll på stabiliteten kan være lav kvalitet for påføring av sprøytebetong.

Brox (2017) peker på at alt arbeid angående framgang og inspeksjoner ved tunneldriving skal kartlegges på en god måte slik at en enkelt kan se tilbake på utført arbeid dersom sikkerheten ikke er som den skal. Følgelig bør det utføres manuelle inspeksjoner som loggfører arbeid utført, noe som også inkluderer avvik ved bruk sprøytebetong i tillegg til føring av sprøyterapporter. Statens vegvesen sin rapport viser at de tradisjonelt sett har utført sjekk av tykkelsen til sprøytebetong ved bruk av boreprøver med håndholdt boremaskin, men at metoden kan være upålitelig og i tillegg tidkrevende (Stenerud og Statens vegvesen, 2012).

Som nevnt tidligere i oppgaven, ble det i feltstudiene fortalt at sprøytebetongen dokumenteres i form av elektroniske sprøyterapporter. Entreprenørservice fører rapporter i Power Apps som fortløpende blir tilsendt Skanska for behandling i tunnelrapporten når sprøyterapportene er ferdig utfylt etter hver sprøyt. Vivek (2021) skriver at Power Apps er en løsning som inneholder tjenester, apper og koblinger. I tillegg er det en dataplattform som kan være med på å skape programutvikling for konstruering av tilpassede apper for ulike forretningsbehov. På denne måten kan en lage sine egne apper som kan kobles sammen med data som en selv har lagret på dataplattformen eller lokalt hos bruker.

5.4.1 Skanning av sprøytebetong

Ifølge Gikas (2012) har teknologi for laserskanning ved tunneldriving åpnet opp for nye muligheter innen konstruering av tunneler ved bruk av 3D-modeller i ulike faser av drivingen. Blant annet tas det i bruk Terrestrial Laser Scanners (TLS) som benytter refleksjonen til laserstråler som sendes ut mot objekter som lokaliseres. Dersom skanneren er av god kvalitet kan det registreres millioner av punkter i rommet under utfordrende forhold med en nøyaktighet helt ned på millimeternivå. De viser også til at teknologien for TLS kan fungere som kvalitetskontrollering og dokumentering innen kartlegging av

geometrien en arbeider på. Dette inkluderer blant annet volumberegninger og skanning av tykkelsen til den påførte sprøytebetongen ved tunneldriving. Bruken av TLS til å kartlegge og skanne volumendringer har økt betraktelig de siste årene (Monserrat og Crosetto, 2008). Til tross for at TLS kan være tidskrevende vil slike innføringer av denne type prosess kunne føre til mindre manuelt arbeid og derfor spare tid og penger (Fekete, Diederichs og Lato, 2010; Abellán *et al.*, 2014).

Gikas (2012) viser også til skanning ved å ta i bruk TLS for sprøytebetong. Det vil si at en først skanner aktuelt område før og etter sprengning, og deretter en gang til etter at første laget med sprøytebetong er påført. I dette tilfellet er skanneren ikke koblet på noe sprøyterobot, og det ble tatt i bruk en totalstasjon for å legge til rette for korrekt plassering av skanneren og for å definere det aktuelle området. Skanneren ble satt opp 10 meter unna stuff for å oppnå et sikkert arbeid og best mulige resultater. De viser til at informasjon om areal- og volumberegninger av både masseuttak og sprøytebetong er viktige innen dokumentering av arbeidet og til kostnadsberegning i prosjekter. De viser til at denne metoden kan gi denne type informasjon ved bruk av en såkalt 3D-modell i mesh eller direkte i de konstruerte dataene i form av punktskyer. Autodesk (2015) skriver at en mesh-modell består av kanter, hjørner og flater som tar i bruk polygonaler for å konstruere former i 3D.

Figur 5-7 illustrerer hvordan Gikas (2012) har gått frem for å konstruere tverrsnittet til en tunnel ved bruk av datapunktskyer. Til venstre vises kun tverrsnittet med rådata fra skanningen og i midten er en tynn linje av punktskyene som er mindre enn 5 cm tykk. Dette gir en muligheten til å danne en sammenhengende linje av segmentene fra punktskyene som representerer den faktiske tunnelprofilen. Resultatet av tverrsnittet blir derfor det som vises til høyre. På denne måten beregnes arealet som ligger utenfor tverrsnittet og ved å gjenta dette for hele tunnelprofilen kan en beregne volumforskjeller. Det påpekes at dette er noe som kan utføres ved tunneldriving og kan gi fordeler for både byggherre og entreprenør, i form av bedre estimering av nødvendige materialer, fremdriftsplanlegging og oversikt over masseuttak og andre mengder.

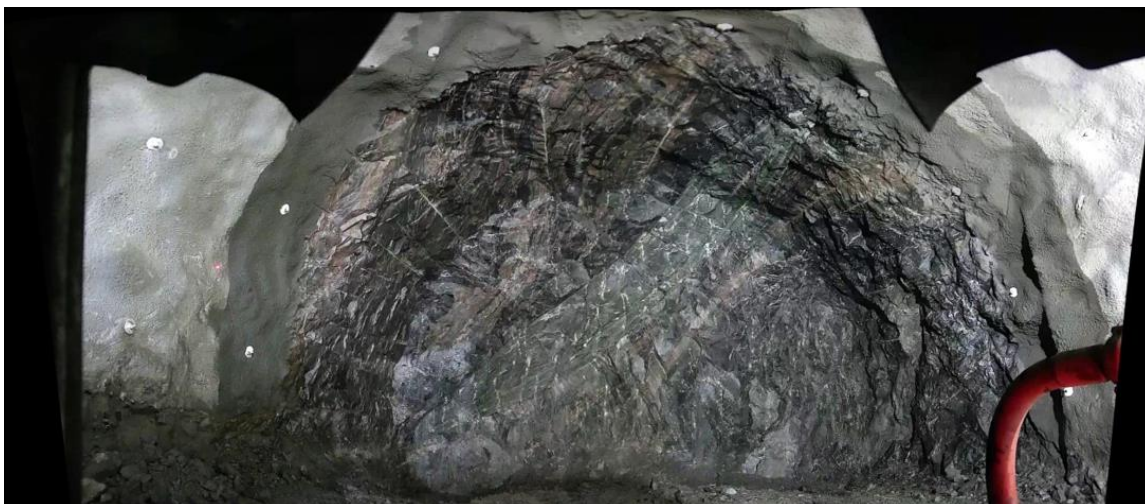


Figur 5-7: Tverrsnitt til tunnelstuff generert av punktskyer.

AMV forteller gjennom telefonsamtale og e-post at de utvikler sin egen løsning for skanning av fjelloverflaten som det sprutes på ved bruk av LiDAR. Holtet (2018) skriver at LiDAR er en metode som gjør det mulig å beregne avstand og bevegelse relatert til et objekt relatert til utsenderen. Det baseres på bruk refleksjon av lys på samme måte som en radar gjør med radiobølger. Dette gjøres ved frekvensforskyvning og forsinkelser der en sammenligner disse parametrene i utsendt og reflektert lys. Videre forteller AMV at de har planer om å utvikle en slik løsning som kan beregne betongtykkelsen kontinuerlig under påføring. Samtidig fortelles det også at sprøyterobotene til AMV har mulighet til å integrere Bever Control sine skannere for å kunne lese fjellets formasjoner.

Gjennom en samtale på e-post med Bever Control viser de til et pilotprosjekt utført på Nordøyvegen i regi av Skanska. Det har blitt tilsendt resultater fra en skanning i Nogvafjordtunnelen som er en undersjøisk tunnel mellom Fjørtofta og Longva i Ålesund. Gjennom skanningen har Bever Control fått informasjon om hvilken tykkelse som er produsert og hvor den befinner seg i tunnelprofilen. Dette gjøres ved å skanne det aktuelle området før og etter påføring for å sjekke forskjellen. Figur 5-8 viser Nogvafjordtunnelen på stuff, hvor en ser at det mørke området til sprøytebetongen i vegg og heng er området som er det aktuelle området for skanning. I tillegg er det blitt tilsendt tilhørende

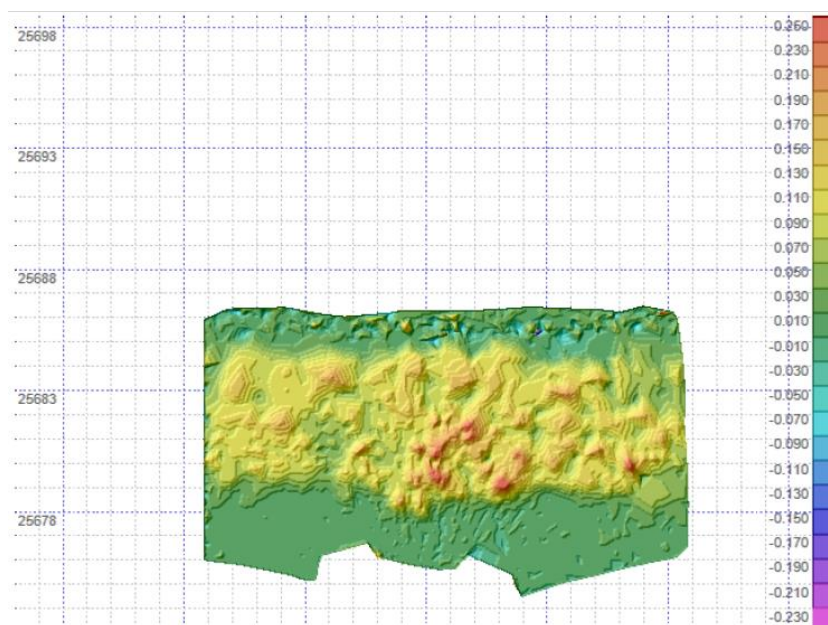
sprøyterapport fra Skanska som viser at det er en salvesprøyt som fungerer som permanent sikring med et areal på 100 m², planlagt tykkelse på 10 cm og et faktisk betongvolum på 14 m³.



Figur 5-8: Bilde tatt av skanner på stuff i Nogvafjordtunnelen av Bever Control.

Bever Control viser hvordan dokumentering av sprøytebetong kan anvendes i form av laserskanning. I vedlegg 3 er det lagt frem statistikk for som et resultat av skanningen. Dette viser som nevnt at det var bestilt en tykkelse på 10 cm, og at midlere tykkelse endte på 9,3 cm hvor det fortelles at det er innen minimumskravet. På denne måten kan en derfor dokumentere påført sprøytebetong og følgende tykkelse for en hel sprøyting ved bruk av skanning. I dette tilfellet ble det ikke definert et område for beregning av volum, i tillegg til at usikkerhetsmomentene; skygger og valgt oppløsning påvirket resultatet.

I tillegg har Bever Control visualisert den påførte sprøytebetongen på to ulike måter som er vist i Figur 5-9 og i vedlegg 6. Siden vegg og heng er skannet før og etter påføring kan tykkelsen beregnes for det aktuelle området. De ulike fargene representerer derfor hvilken tykkelse av sprøytebetong som er påført, og kan leses av på søylen til høyre. Dette viser at skanningen gir resultater som også sprøyteoperatør kan tilegne seg kunnskaper om eget arbeid. Dersom en ser bort fra det grønne området som ikke skulle sprøytes, ender mesteparten av tykkelsen til sprøytingen på rundt 11 cm, som er gult, mens en liten andel som er samlet i midten er rødt og følgelig opp mot 25 cm.



Figur 5-9: Visualisering av sprøyteresultat ved bruk av skanning fra Bever Control.

Gikas (2012) konkluderer med at ved bruk av laserteknologi som TLS kan en konstruere nøyaktige og gode 3D-modeller for å kartlegge mye ulikt innen tunneldriving. På denne måten kan tunnelingeniører få god nytte av bruken ved å bedre innsikt over forholdene i tunnelen. Samtidig nevnes det at resultatene de tar i bruk er basert på casestudier og kan ikke direkte generaliseres for alle prosjekter. Riktignok kan bruken av laserskanning variere stort fra et prosjekt til et annet som baserer seg på blant annet sikringsmetode, grunnforhold, geologi og drivemetode. Derfor påpekes det til slutt at bruk av denne type laserskanning, som nevnt i artikkelen, må vurderes nøye før bruk og tilpasses for ethvert prosjekt.

Ifølge Lato og Diederichs (2014) kan en dra god nytte av ved bruk av laserskanning før og etter påføring av sprøytebetong i tunneler. Dette kommer i form av å få vite tykkelsen til sprøytebetongen på ønskede områder i tunnel, men at det også følger med en viss usikkerhet. Skanningen tar ikke hensyn til usikkerheten som oppstår ved radiell forskyvning. Ifølge Dick (2020) er radiell forskyvning det som skjer når oppstikkende landsskapsdetaljer drar seg utover fra sentrum i et bilde, eksempelvis i et flyfoto. Dette oppstår på grunn av at et fotografi er en sentralprojeksjon for motivet inn i bildeplanet. Lato og Diederichs (2014) skriver videre at denne typen usikkerhet vil påvirke beregningen av tykkelsen til sprøytebetongen og vil gi en større beregnet tykkelse enn faktisk tykkelse. Usikkerheten kan fjernes dersom en kjenner til den radielle forskyvningen og kompensere for dette.

5.4.2 Robotstyring av sprøytepåføring

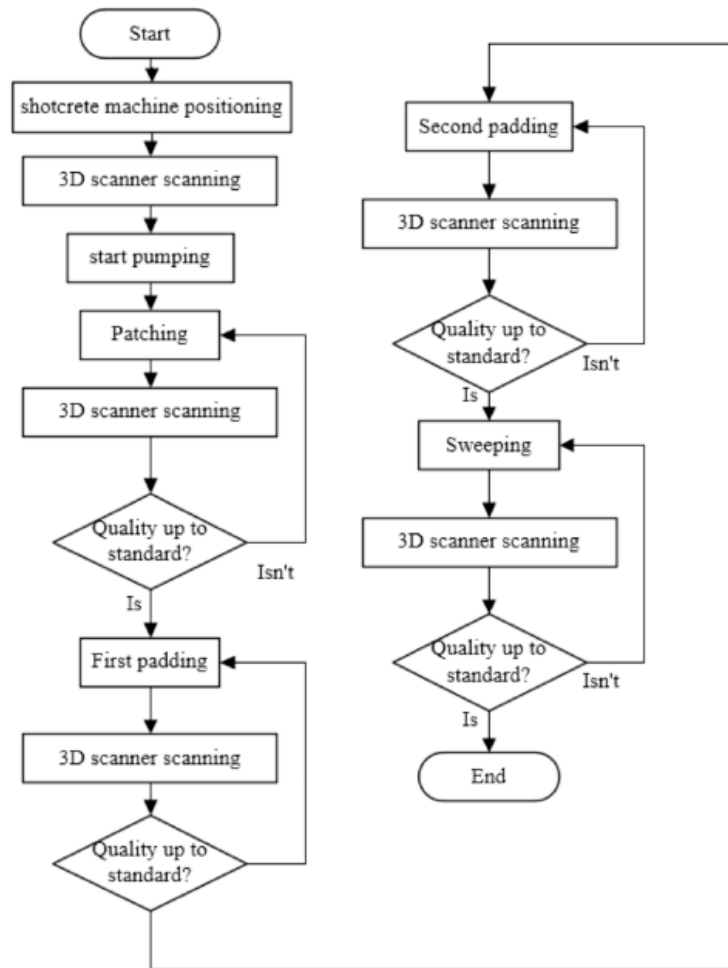
Kurth, Gause og Rispin (2004) mener at det er høye krav om kvalitet i dagens tunnelbransje for arbeid som foregår ute i felt. Følgelig mener de at det er nødvendig med mer automatisering for å tilfredsstille disse kravene. Intelligente maskiner har mulighet til å oppnå resultater selv om de ikke er menneskestyrte, ifølge Liu *et al.* (2021). På denne måten kan intelligent styring av teknologi ved påføring av sprøytebetong løse problemet ved det røffe arbeidsmiljøet som en sprøyteoperatør opererer i. Ofte ved tunneldriving er det essensielt å optimalisere metoden for påføring av sprøytebetong, mener Girmscheid og Moser (2001).

Liu *et al.* (2021) viser til at en automatisering av påføring av sprøytebetong er en viktig del av å forbedre produktivitet og kvalitet i tillegg til å redusere prelløstap. I tillegg vil en automatisk påføring av sprøytebetong vil kunne lede flere goder som blant annet:

- Øke sikkerhet og helse for personell.
- Sikre kvaliteten til påføring sprøytebetong.
- Øke produktiviteten til påføringen.
- Sørge for at færre blir eksponert for tøffe arbeidsforhold ved sprøyting.

Gjennom telefonsamtaler og e-poster, forteller AMV at de foreløpig arbeider med utvikling av robotstyring for sprøyteroboten. Her har de satt opp et testsenter hvor det utføres testing av programvare for robotstyring. I tillegg nevnes det at AMV er en industripartner i prosjektet SUPERCON og samarbeider om blant annet robotisert påføring av sprøytebetong.

Liu *et al.* (2021) sin fremgangsmåte for å anvende robotisert påføring av sprøytebetong ved tunneldriving består i første omgang av å benytte en 3D-laser ved å skanne arbeidsområdet. Dermed dannes det punktskyer av data som gir dem muligheten til å markere det faktiske området hvor det skal påføres sprøytebetong. Følgelig kan de ved å skanne forskjellen i avstander på området før og etter påføring beregne volumet av påført sprøytebetong. Skanningen gjør det mulig å beregne påføringsmønsteret og vinklene som munnstykket og sprøytebommen skal ha under sprøyting. Hele metoden for robotisert påføring av sprøytebetong er delt inn i 4 steg og følger instruksene som er illustrert i Figur 5-10; patching, first padding, second padding og til slutt sweeping. I første steget patching, fylles hulrom og sprekker med sprøytebetong. Deretter følger first padding som er første sprøytelegg mellom berget og stålbuen som brukes. Følgelig består second padding av å sprøyte området mellom stålbuen og fjellet. Til slutt utføres sweeping som innebærer å sprøyte et 2 cm tykt overflatelag på stålbuen. Alle stegene inkluderer en kvalitetssjekk ved laserskanning og dersom kravene ikke imøtekommes må steget utført på ny.



Figur 5-10: Stegene for automatisk påføring av sprøytebetong (Liu *et al.*, 2021).

Solberg (2020) skriver at i prosjektet SUPERCON inngår det også arbeid med påføringen av sprøytebetong, noe som gjør at de vil fokusere på robotstyring for sprøyteroboten. Intervjuobjektet i artikkelen som er sjefsforsker og prosjektleder i SUPERCON, ser ikke bort fra at en utvikler fullrobotiserte sprøyteroboter til påføring av sprøytebetong om fem til ti år.

Lin *et al.* (2019) konkluderer med at en automatisering av sprøyteroboter vil kunne tas i bruk ved tunneldriving i komplekse prosjekter. De mener at dagens tunneldriving i stor grad baserer seg på ferdighetene til sprøyteoperatørene. Følgelig vil de endre dette ved å utvikle og anvende en automatisert sprøyterobot som vil øke fremdriften og produksjonskapasiteten ved å fjerne ansvaret til sprøyteoperatøren.

5.4.3 Big data

Motawa (2017) viser til en formidabel utvikling av teknologi som er koblet opp mot internett. Derfor har programmer som kan anvende big data i byggebransjen særlig ettertraktet, der det eksisterer mye ulik data som kan være både input og output.

Sørensen, Olsson og Landmark (2016) mener at big data kan anvendes ved prosjektering av systemer som kan prosessere, samle og lagre data i meget store mengder som kan resultere i en stor mengde med bruksmuligheter. Dette forutsetter at metoden utføres av spesialister innen internetteknologi, programmering og har store kunnskaper med datautstyr.

Shrestha (2013) antyder at ved å bruke big data i byggebransjen i form av analytisk informasjon, kan det komme til nytte for vedlikehold, fremdriftsplanlegging, ressursplanlegging, forbedre sikkerheten og kvalitetssikre arbeidet som underentreprenører utfører.

Sørensen, Olsson og Landmark (2016) konkluderer med at metodene ikke bare kan analyseres og brukes på et datasett, men at det også er kompatibelt med å kombinere ulike data sett under ett. De viser også til at det vanligvis ikke fungerer særlig godt til små demonstrasjoner, men en må involvere store mengder data for å oppnå et utbytte. Behandling av dataene kan lede til ny informasjon om prosjektering, kostnader og prosesser for en prosjektledelse. Disse større mengdene med data kan lede til mer nøyaktige forutsigelser som tilrettelegger for at klokere valg tas. Samtidig vil mye data kunne lede til problemer angående personvern.

Ram, Afridi og Khan (2019) mener at ved å anvende big data i byggebransjen, vil dette kunne hjelpe ledelsen å forstå faktorene som påvirker deres egen bruk av big data. Det vil si at ved å implementere bruk av big data vil det kunne tilrettelegge for at beslutninger som tas følger utviklede retningslinjer som vil bidra til at det tas bærekraftige valg som kan føre til sosiale, økonomiske og miljømessige fordeler.

6 Diskusjon

6.1.1 Introduksjon

Gjennom oppgaven har det blitt gjort et forsøk på å undersøke hvordan sprøytebetong tas i bruk ved tunneldriving i dag, undersøke produksjonskapasiteten til en sprøyterobot og hvordan dette dokumenteres. Videre har diskusjonskapittelet som hensikt å diskutere kapittel 5 Resultater sett opp mot det teoretiske rammeverket fra kapittel 3 Teoretisk rammeverk. Følgelig blir diskusjonskapittelet strukturert etter forskningsspørsmålene.

6.2 FS1: Bruk av sprøytebetong ved tunneldriving i dag

6.2.1 Utførelse

Det viser seg fra feltstudiene at sprøytebetong anvendes som en del av den permanente sikringen ved konvensjonell tunneldriving. Sprøytebetong påføres ved bruk av en sprøyterobot, både med og uten operatørrhytte. Siden sprøytingen kan finne sted hvilken som helst tid på døgnet, kan en unngå å komme i tidskonflikt med andre aktiviteter i tunnelsyklusen. Det viser seg at det er våtmetoden for sprøytebetong som er mest aktuell for større oppdrag og ble også tatt i bruk for Sollihøgdatunnelen. Sprøytebetong påføres av et eksternt firma, der totalentreprenøren uttrykker at det virker å være god kommunikasjon mellom partene. I tillegg gis det uttrykk for at god kommunikasjonen er helt essensielt for å kunne gjennomføre sikring ved sprøyt av god kvalitet. Dette med tanke på å bestille rett mengde betong, starttidspunkt for sprøyting og eventuelle spesielle forhold.

6.2.2 Mengdebestilling

Det viser seg at ved mengdebestilling av betong før påføring av sprøytebetong, eksisterer det insentiver i både form av tekniske og økonomiske grunner, ifølge Martínez-Sánchez *et al.* (2016). Av de tekniske baserer dette seg på hvordan selve mengdeberegningen utføres, der det viser seg at mengden som bestilles baseres på faktorer som areal, fjellfaktor, tykkelsesmålinger og andre spesielle forhold. Denne metoden beskriver hvordan de ulike kildene samsvarer med dagens måte å beregne volumet til en sprøyt i tunnel. Følgelig blir dette også bekreftet i teorien av Grimstad og Norsk betongforening (2011), noe som betyr at samme metode anvendes den dag i dag. De økonomiske grunnene vil naturligvis bestå av å redusere de nødvendige kostnadene mest mulig for gjennomføring av sprøyt, og samtidig legge til rette for god bergsikring.

Dersom det skulle være for liten eller for stor mengde bestilt betong, viser det seg her at parten som utfører selve sprøytingen ikke har det overordnede ansvaret, ifølge Entreprenørservice. Dette kommer av at sprøyteoperatør kun har som oppgave å sprøyte mengden betong som er bestilt for å oppnå en best mulig bergsikring. I dette tilfellet vil både sprøyteoperatør og totalentreprenør ha insentiver om å oppnå god bergsikring. På denne måten vil bestillingsmengden være med å påvirke kvaliteten av utført arbeid, slik at mengden er passende for arbeidet.

En erfaren sprøyteoperatør vil i de fleste tilfeller kunne forutsi hvor mye betong som behøves for ulike tykkelser, ifølge Entreprenørservice. I tillegg vil operatøren kunne få kontinuerlige tilbakemeldinger for sine antakelser om mengden, ved at det foretas kontinuerlige tykkelsesmålinger av sprøytebetongen. Selv om det er oppdragsgiver som bestiller og innkjøper av mengde betong før sprøyt vil det muligens lønne seg å inkludere sprøyteoperatør og danne et samarbeid ved bestilling av mengde betong før sprøyt. På denne måten kan det forekomme et samarbeid mellom partene som kan føre til en reduksjon av forbruket til betongen. Dersom det bestilles korrekt mengde, kan det føre til at en eksempelvis slipper å bestille to betonglass, men kun ett. Følgelig vil det føre til blant annet reduserte transportkostnader, forbruk av betong og følgelig blir det også et mer bærekraftig arbeid.

6.3 FS2: Beregning av produksjonskapasitet

6.3.1 Produktivitet ved tunneldriving

Nilsen (2017) peker på at det norske tunnelarbeidet foregår ved bruk av akkord, noe som bekreftes i det teoretiske rammeverket. For å unngå at incentivet om maksimal fremdrift går utover sikkerheten ved driving, blir tunnelarbeiderne betalt både per meter inndrift og for utført sikring. Følgelig kan sikringsfilosofien lettere implementeres inn i arbeidet der produktivitet står sterkt.

En av hovedincentivene bak ethvert byggeprosjekt for en bedrift er naturligvis lønnsomhet, mener Construction Industri Institute (2022). Av den grunn fremheves som nevnt produktivitet som et essensielt tema innen byggebransjen. Ved å oppnå mest mulig output med minst mulig input, kan produktiviteten øke og tilrettelegge for en økning av inntjening.

Sprøyting ved tunneldriving blir også påvirket av ønsket om høyest mulig utnyttelse, i form av en høy produktivitet ved påføring av sprøytebetong, skriver Yang *et al.* (2014). Til tross for at det anvendes høyteknologisk sprøyteutstyr som stadig utvikles, vil det sjeldent kunne oppnå full utnyttelse. Selv om enhver aktør higer etter å oppnå en god produktivitet gjennom mest mulig output på minst mulig input.

6.3.2 Teoretisk pumpekapasitet versus produksjonskapasitet

Dersom en sammenligner den teoretiske pumpekapasiteten med produksjonskapasitet for en sprøyterobot, vil det være faktorer som påvirker slik at førstnevnte kapasitet er betydelig større enn sistnevnte. Dette kan komme av blant annet sprøyteoperatørs erfaring, geologiske forhold, type sprøyt, utstyrs kvalitet eller andre spesielle forhold.

Kapittel 3 Teoretisk rammeverk legger frem kapasitet for stempelpumper i sprøyteroboter til å være lavere enn det maskinprodusenten oppgir som teoretisk pumpekapasitet. I dette tilfellet skiller det betydelige 5 m³/t. Det bør nevnes at teorien går ut fra Grimstad og Norsk betongforening (2011) som er ble publisert for 11 år. I løpet av denne perioden har en maskinprodusent åpenbart utviklet seg og sitt utstyr betydelig, og forskjellen kan ha sin årsak i det. Følgelig må det også legges til at teoretisk pumpekapasitet kun angir hvor mye betongpumpen maksimalt kan yte under perfekte forhold, og at en ikke forvente en produksjonskapasitet lik denne.

Som nevnt av Grimstad og Norsk betongforening (2011) vil en måtte rette sprøytemunnstykket og sprøytebommen i alle mulige vinkler under påføring av sprøytebetong. Følgelig vil det oppstå korte perioder som krever stansing av sprøytingen. Dette kan eksempelvis skje ved forflytning og endring av vinkel. Disse korte stoppene vil føre til at det ikke sprøytes noe i det hele tatt i periodene. Samtidig ble det fra feltstudiene observert at denne tiden som regel var minimal og at nødvendig forflytning av utstyret gikk hurtig for seg. Produksjonskapasiteten vil imidlertid bli betydelig redusert dersom disse stoppene varer over lengre tid. Dette var dog ikke tilfellet under tidsstudiene, men det likevel tenkes å oppstå under andre spesielle forhold.

Sett under ett vil en sprøyterobot ha mulighet til å oppnå en høy produksjonskapasitet dersom små stans unngås. Små stans kan hindres ved god planlegging av sprøyteutførelsen.

Produksjonskapasiteten vil være en del mindre enn den teoretiske pumpekapasiteten for en sprøyterobot. Imidlertid betyr det at pumpekapasiteten ikke begrenser produksjonskapasiteten, men at en har mulighet til å oppnå høyest mulig produksjonskapasitet ved å optimalisere andre forhold.

6.3.3 Tidsstudier

Aasland (2015) viser til at en ikke alltid kan planlegge for alt. Dette fikk undertegnede oppleve under tidsstudiene. Det vil si det innebar endringer på inndelingen av aktivitetene for tidsstudie I. Til tross for at endringen gikk ut på å forandre inndelingen, førte det til en mer oversiktlig resultatdel der en lettere kan sammenligne data med annen litteratur omhandlende samme tema. Dette er som nevnt litt av hensikten med oppgaven. Dette viser viktigheten ved å utføre flere forsøk ved datainnsamling, slik at en kan utføre forskningsmetoden på best mulig måte. Aktivitetene er delt inn i tre ulike tidstyper; faste

tapstider, proporsjonale operasjonstider og tilfeldige tapstider. Dette gjør at en lettere kan strukturere og analysere resultatene fra tidsstudiene.

Siden alle tidsstudiene ble utført med samme type sprøyterobot og type sprøyt, vil en tro at forutsetningene er like. Derfor burde de oppnå omtrent samme tidsforbruk basert på bestilt mengde betong. Derimot viser det seg at syklustiden for tidsstudie III sammenlignet med tidsstudie I er hele 32 minutter kortere. Dette til tross for at det i begge tilfeller er planlagt å bruke 7 m³ betong, og inneholder samme antall aktiviteter. Det kan være tilfeldig at det oppstår en slik forskjell akkurat under disse tidsstudiene, men samtidig fungerer tidsstudiene som stikkprøver. Derfor kan en ikke se bort fra at påvirkninger i form av maskintrøbbel kan påvirke sprøytekapasiteten, på generell basis, av ulik grad.

Resultatene til tidsstudiene viser at det oppstod situasjoner som ble inndelt i følgende tidstyper; faste tapstider, proporsjonale operasjonstider og tilfeldige tapstider. I tillegg dukket det opp hendelser hvor en måtte vente på betonglass mellom sprøytene i tidsstudie II. Denne tiden endte på totalt 45 minutter og hadde hatt stor betydning dersom den hadde blitt inkludert i brutto sprøytekapasitet. Dette er ikke tilfellet, siden det ikke defineres som effektiv tid i sprøyteaktivitetene. Samtidig oppstod det under tidsstudie III maskintrøbbel som også ble ekskludert fra tidsstudiet. Det utgjorde omtrent 68 minutter og kunne derfor føre til et stort utslag dersom hendelsen hadde blitt inkludert i tidsstudie III. Basert på hvordan tilfeldig tapstid er definert, oppstår det et skille for hva som skal inkluderes og ikke. Følgelig antydes det at brutto sprøytekapasitet i stor grad kan bli påvirket av tilfeldig tapstider ettersom hva som defineres som det og ikke. Her viser det seg å være en definisjonssak (Aune og Lima, 1992).

Tidsstudie II bestod av 14 m³, altså dobbelt så mye bestilt betong sammenlignet med tidsstudie I og III med 7 m³. Dette vises gjennom høye verdier for både netto og brutto tidsforbruk for tidsstudie II. I tillegg er brutto tidsforbruk for tidsstudie II det tidsstudiet med høyest verdi og skiller seg logisk nok ut med 128,7 minutter. Samtidig viser tidsstudie III å ha en del høyere verdier for netto og brutto tidsforbruk som er påvirket av maskintrøbbel, til tross for at driftsstansen er ekskludert.

Til tross for ulik mengde betong, viser det seg at det skiller lite mellom netto sprøytekapasitet i tidsstudie I og II, som begge unngikk tilfeldig tapstid. De endte på 18,4 m³/t og 16,7 m³/t, mens tidsstudie III endte med kun 11,6 m³/t. Brutto sprøytekapasitet endte på 12,1 m³/t og 13,1 m³/t henholdsvis for tidsstudie I og II, og 8,2 m³/t for tidsstudie III. Følgelig betyr dette at sprøytekapasiteten kan, og blir, påvirket av hendelser som maskintrøbbel til en viss grad, noe som fant sted i tidsstudie III.

Som nevnt i resultatene av NTNU (2006), skiller det mellom netto og brutto og sprøytekapasitet. Med tanke på antall aktiviteter ville en tro at samtlige tidsstudier får lavere brutto sprøytekapasitet enn netto sprøytekapasitet. Dette viser seg å ikke være tilfellet for netto sprøytekapasitet i tidsstudie III sammenlignet med brutto sprøytekapasitet for tidsstudie I. Forskjellen er liten, men den er signifikant. Dette til tross for at netto sprøytekapasitet kun inneholder aktiviteten sprøyting, der det nevnes at det som regel ble utført en kontinuerlig påføring. Imidlertid ble sprøytingen i tidsstudie III påvirket av maskintrøbbel underveis. Til tross for at maskinen ble reparert slik at sprøytingen kunne fortsette, ble begge sprøyt og nedrigging påvirket, i den grad at konsekvensen ble en lavere netto og brutto sprøytekapasitet.

Samlet sett kan det fremstå som at en påvirkning under sprøyting, kan føre til at netto sprøytekapasitet blir betydelig redusert. Det kan tenkes at dette kommer på grunn av at netto sprøytekapasitet er meget høy under optimale forhold med kontinuerlig påføring, sammenlignet med en påvirkning av brutto kapasitet. Dette oppstår blant annet fordi sistnevnte inneholder flere aktiviteter og vil derfor som regel ha større tidsforbruk.

Dersom en sammenligner med det teoretiske rammeverket tidligere i oppgaven, viser NTNU (2006) til at en god organisert tunneldriving oppnå tilfeldige tapstider på omtrent 11,1 % av summen til de faste tapstidene og de proporsjonale tidene. Ved utførelse av tidsstudie I, II og III er det ingen av dem som bidrar til de tilfeldige tapstidene. Dette kan tyde på at det er en god organisert tunneldriving som

utføres i feltstudiet. Samtidig baseres det på kun tre tidsstudier, og bør dermed undersøkes ytterligere for en mer nøyaktig kartlegging av forholdstallet.

6.3.4 Sprøyterapporter

Sprøyterapportene som totalentreprenøren blir tildelt fra sprøyteoperatøren i feltstudiene, inneholder det meste av relevant informasjon om utført sprøyting. Siden denne ble mottatt kort tid etter endt sprøyting, gir dette mulighet til å se tilbake på, og vurdere hvordan sprøytingen foregikk.

Sprøyterapportene vil i denne sammenhengen fungere som kvalitetssikring av sikringsarbeidet til underentreprenøren. Dette fordi totalentreprenøren ofte ikke er til stede om natten. Dermed kan det kjapt dannes et inntrykk av hvordan neste sprøyting kommer til å foregå, og kan gi en pekepinn på mulige spesielle forhold under neste sprøyting.

Tildelingen inneholder hele 69 og 63 sprøyterapporter, for henholdsvis nordgående og sørgående tunnellop. Dette tilsvarer totalt 1149 m³ bestilt betong som inkluderer de ulike type sprøytene; salve, spiling og bue. En gjennomgang og analysing av de ulike type sprøytene, fører til et meget stort potensial for hvor en kan danne oversikt over sprøyteprosessen. Dette gjelder over lengre tid og kan resultere i relevant nøkkelinformasjon. En analyse av denne enorme mengden data vil i tillegg kunne føre til en reduksjon av usikkerheten, hvor eventuelle feil vil havne på begge sider av gjennomsnittet.

Da et fåtall av sprøyterapportene inneholdt informasjon som mistenktes å inneholde feil i tidsbruken, ble flesteparten inkludert i analysen. I slike tilfeller kan en spille på fordelen ved å ha et stort antall sprøyterapporter som grunnlag, der potensielle feil i loggføring påvirker sluttresultatet i liten grad. I tillegg ble det lagt merke til at sprøytekapasiteten varierte i stor grad for noen av sprøyterapportene, noe som muligens oppstår på grunn av driftsteknisk tapstid. Særlig med tanke på tilfellet i tidsstudie III som påvirket sprøytekapasiteten av samme grunn. Altså vil en slik analyse av store datamengder fra sprøyterapportene kunne føre til at en kommer et steg nærmere samlede verdier for produksjonskapasiteten for ulike typer sprøyt.

For de beregnede sprøytekapasitetene for nordgående og sørgående tunnellop med utgangspunkt i sprøyterapportene, viser det seg at ingen av de ulike type sprøytene skiller seg sterkt ut. Sprøyt for salve, spiling og bue beregnes henholdsvis til netto sprøytekapasiteter lik 13,3 m³/t, 14,1 m³/t og 13,8 m³/t. Av den grunn skulle en tro at de små forskjellene i sprøytekapasitetene kommer av at forutsetningene i det nordlige og sørlige tunnellopet bortimot er like. Dette innebærer lik geologi, som sies å bortimot bare være rombeporfyr, måten de drives på og utstyret som anvendes. Når det gjelder sprøytekapasiteten for salve, viser det seg at denne typen sprøyt har minst forskjell mellom det nordlige og sørlige tunnellopet. Dette kan være tilfellet på grunn av større mengde betong sprøytet for salve enn for spiling og bue. Det vil si at mengden betong sprøytet for salve i begge tunnellop, er sprøytet omtrent tre ganger mer enn for spiling og bue.

6.3.5 Big data

I resultatene peker Motawa (2017) på at en kan ved bruk av internett og programmer, analysere og påvirke byggebransjen på helt nye måter enn det tidligere er gjort. I det teoretiske rammeverket blir big data omtalt som teknologi og analysemetodikk som kan anvendes for ulike typer ustrukturerte datamengder som er for store til å hente ut på tradisjonelt vis. Sørensen, Olsson og Landmark (2016) viser også til at en kan behandle meget store datamengder som videre kan føre til mange nye bruksmuligheter. Samtidig er metode for analysing av big data noe som bør utføres av noen med tilstrekkelige datakunnskaper. Derfor vil det ved en eventuell implementering være nødvendig at en enten ansetter noen fast i et firma, eller hyrer inn personell til å utføre et slikt arbeid.

Shrestha (2013) peker på at analytisk informasjon kan anvendes i big data som kan brukes til ulike formål. På lik linje vil det være muligheter for å anvende big data for sprøyterapportene og underentreprenøren, som sikrer ved bruk av sprøytebetong i feltstudiene. Det kan eksempelvis være å analysere sprøyterapportene på samme måte som undertegnede har gjort i denne oppgaven. Det kan gjøres på samme måte ved å hente ut informasjon om produksjonskapasiteten for de ulike type sprøytene, bare i mye større skala. Dermed kan det også lett deles opp for hvert enkelt tunnelprosjekt

der en kan se utviklingen av produksjonskapasiteten for ulike faser i drivingen. Forskjellen blir at en slipper å gjøre det manuelt slik som det er utført i denne oppgaven. Ved bruk av programmering kan det gjøres på en effektiv og lønnsom måte.

Ved å implementere big data på en slik måte kan det følge med ulike goder. Dette kan for eksempel være bedre innsikt under fremdriftsplanleggingen og en kan derfor tilpasse andre aktiviteter som finner sted før og etter på en mer nøyaktig måte. I tillegg kan en få bedre oversikt over arbeidet som utføres av underentreprenør, og videre kan dermed tilrettelegge og muligens endre vilkårene for arbeidet dersom det er nødvendig. Disse eksemplene kan potensielt føre til besparing av både tid, kostnader, ressurser og personell ved driving.

6.3.6 Tidsstudier versus sprøyterapporter

Når det kommer til sprøytekapasiteten beregnet i tidsstudiene sammenlignet med sprøyterapportene, er det kun netto sprøytekapasitet som kan sammenlignes direkte. Netto sprøytekapasitet inneholder bare aktiviteten sprøyting, og vil ved normal drift ha liten grad av variasjon ved en kontinuerlig påføring. Dette styrker påliteligheten til tallene fra tidsstudiene. Feilkilder kan oppstå, men på bakgrunn av tidsstudiene vises det å være minimalt med disse. Dette sees i sammenheng med at det skal mye til for å gjøre feil under simpel tidtaking. I tillegg viser forskjellen i sprøytekapasiteten seg å være lav mellom tidsstudiene og sprøyterapportene, slik at dette også styrker påliteligheten til sprøyterapportene.

Imidlertid ender samtlige av netto sprøytekapasitetene for tidsstudiene på en høyere verdi sammenlignet med sprøyterapportene for sprøyt 1,2 og 3. Mengden betong er den samme og varierer ikke i noen av sprøytene. Dermed kan det tyde på at undertegnede og betongleverandøren har ulike tidspunkter for start og stopp i sprøyteaktiviteten. Følgelig kan det være at betongleverandøren inkluderer tilfeldige tapstider i netto sprøytekapasitet. Dersom det er tilfellet fører det til at samtlige sprøyt som inneholder driftsteknisk tapstid har dette inkludert i netto sprøytekapasiteter beregnet ut fra sprøyterapportene.

6.3.7 Sammenligning med enhetstidsystem

Det viser seg at eldre enhetstall fra NTNU (1999) ender på høyere tidsforbruk per kubikkmeter sprøytebetong, sammenlignet med samtlige av de beregnede verdiene i masteroppgaven. Dermed er det god grunn til å tro at produksjonskapasiteten til påføring av sprøytebetong har økt siden 1999. Til tross for at sprøyterapportene baserer seg på ulik tykkelse, havner de likevel et godt stykke under verdiene i rapporten «2F-99N». Dette til tross for at sistnevnte sin bergkvalitet også er middels til god, og at utstyrsbruken er optimalisert, akkurat som i masteroppgaven. Sett under ett vil det være grunn til å oppdatere dette enhetstidsystemet, som skal fungere som blant annet et hjelpemiddel til fremdriftsplanlegging mot bygging. Basert på verdiene vil det være naturlig å foreslå en verdi på 0,1 h/m³ som enhetstall for salve. Det tilsvarer omtrent litt over gjennomsnittet av resultatene fra masteroppgaven.

Siden rapport «2F-99N» av NTNU (1999) baserer seg på basis sprøytet lengde 10 meter, endres brutto sprøytekapasitet for tidsstudie I og III slik at de kan anvendes. Det vil dermed oppstå en viss usikkerhet om hvorvidt en kan legge til aktivitetene riggtid og sprøyting, slik at en oppnår samme forutsetninger for sprøyt over 10 meter. Denne usikkerheten anses som lav på grunn av kort varigheten i riggtid, og vil påvirkes lite til tross for at den blir relativ stor. Sprøytene som legges til er gjennomsnittet av foregående sprøyt der det antas at de også ville fått omtrent samme verdier. Det samme gjelder med tillegget lagt inn for sprøyterapportene, som til og med inkluderer verdier fra tidsstudie III, som er påvirket av en reduksjon i kapasiteten ved sprøyting. Sistnevnte antyder at selv en negativ påvirkning av sprøytingen fører til at dagens produksjon av sprøytebetong er forbedret, sammenlignet med tidligere.

6.3.8 Bærekraft

Som beskrevet i det teoretiske rammeverket er betong et byggemateriale som per i dag forbindes med relativt store utslipp av CO₂. Til tross for at betong har et stort bruksområde og er et meget fleksibelt materiale, er utslippene store knyttet til produksjonen. Samtidig pekes det på at byggebransjen er inne i en ny trend med insentiver om å oppnå bærekraft i produksjoner ved blant annet å redusere forbruket av betong.

Det fremheves flere metoder for å gjøre prosesser mer bærekraftig i tilfeller der det ikke vil være aktuelt å opphøre bruken av betong (Solberg, 2020). Her vil det heller kunne reduseres bruk av betong, ellers tas i bruk alternative materialer som råvarer. Å redusere bruken vil føre til flere goder, eksempelvis en mindre miljøbelastning i form av mindre energiforbruk ved transport, produksjon og avfallshåndtering. SUPERCON nevnes som et forskningsprosjekt som har mål om å oppnå flere av bærekraftsmålene til FN (SINTEF, 2019). Dersom en tar utgangspunkt i disse har en noe fast bestemt å strekke seg etter, og kan bidra til at ulike aktører kan arbeide mer bærekraftig. Samtidig er disse målene nokså generelle, og det er derfor opp til hver enkelt aktør som må prøve å implementere egne mål for gjennomføring av prosjekter. I tillegg til å kunne utføre arbeid på en mer bærekraftig måte, må aktørene også vite hvordan de kan flette sammen bærekraft og lønnsomhet. Dette for at en slik prosess skal være levedyktig og attraktiv.

Som nevnt vil en god fremgangsmåte ikke nødvendigvis være å avskaffe en metode, men å sammenligne den med andre alternativer. I dette tilfellet sammenligner Solberg (2020) bruk av sprøytebetong som en del av bergsikring, fremfor bruk av full utstøpning i tunnel som medfører en kraftig reduksjon av betongforbruk. Tilnærmingen ved å redusere et forbruk for å gjøre en arbeidsprosess mer bærekraftig, kan også være med å bidra til å gjøre den mer effektiv, og samtidig ikke redusere antall prosjekter. I det tilfellet vil det være aktuelt å forbedre og optimere en prosess for å øke produksjonskapasiteten (SINTEF, 2019). Eksempelvis kan dette anvendes ved arbeidet for påføring av sprøytebetong og dermed føre til en mer bærekraftig prosess. Følgelig bør en økt produksjonskapasitet og reduksjon av råvarer med et høyt CO₂-avtrykk, være aktuelt for aktører i byggebransjen for å oppnå bærekraftige løsninger og samtidig opprettholde lønnsomheten. Bærekraft virker å være et meget aktuelt tema i dagens byggebransje. Det kan derfor tenkes at tunnelbransjen vil pålegge aktørene strengere krav i fremtiden, som kan føre til en tvungen form for implementering av bærekraft.

6.4 FS3: Dokumentering av sprøyteprosessen

6.4.1 Sprøyterapporter

Resultatene peker på at dokumentering av sikringsarbeid tidligere har vært basert på empirisk erfaring i ulik grad (Grimstad og Norsk betongforening, 2011). I senere tid har det blitt dannet krav om dokumentering av bergkassekvalitet og geologi ved bruk av et klassifikasjonssystem. Kravene har følgelig gjort at samtlige aktører i tunnelbransjen har blitt tvunget til å dokumentere utføring av sikringsarbeid i større grad enn før. Dette inkluderer en kontinuerlig oppfølging og dokumentering av blant annet føring av sprøyterapporter, som nevnes i det teoretiske rammeverket.

Som utført i denne oppgaven, kan tidsstudier også brukes som en form for dokumentering av tunnelarbeid. Innlysende nok vil det være meget kostbart å utføre for hver sprøyt, men det kan bli implementert i visse tilfeller dersom noen spesifikke arbeidssituasjoner har behov for nærmere undersøkelse eller analyse.

Da det eksisterer krav om å loggføre sprøytingen i sprøyterapporter, er det måte å dokumentere sikringsarbeid på. Grimstad og Norsk betongforening (2011) nevner at alle involverte parter kan få sprøyterapporter på forespørsel og vil oppnå både loggføring og kvalitetssikring av arbeidet som utføres. Dette gjelder uansett, uavhengig om en selv utfører bergsikringen eller om det utføres av underentreprenører. Det oppfattes som at samtlige parter er åpne i sitt arbeid og har insentiver om å

oppnå best mulig bergsikring. Siden dette gjøres ved bruk av dokumentering, vil det føre til at en kan se tilbake på tidligere utført sikringsarbeid dersom en uventet hendelse skulle oppstå.

I tillegg til å loggføre alle sprøyt ved bruk av sprøyterapporter, blir det også foretatt tykkelsesmålinger kontinuerlig i kontrollsekvenser ved driving av tunnel (Grimstad og Norsk betongforening, 2011). Det viser seg at denne metoden utføres i form av boreprøver i tunnelprosjekter for å kontrollere tykkelsen til sprøytebetongen, men at metoden noen ganger kan være upålitelig og tidkrevende. Denne metoden fører til en viss grad av sikkerhetskvalitet av sprøytebetongens tykkelse, men samtidig vet en ikke hvordan underlaget til sprøytebetongen fremstår ut fra målingene. Dersom det eksempelvis tas en tykkelsesmåling i en sprekk fylt med sprøytebetong, vil en få en større tykkelse enn om den foretas ved siden av sprekken på annen overflate med sprøytebetong. Dette vil naturligvis ikke være tilfelle for alle prøver, og vil jevnes ut ved mer prøvetaking.

6.4.2 Skanning av tykkelse og volum

Laserskanning er en annen form for dokumentering av påført sprøytebetong (Gikas, 2012). Gikas (2012); Monserrat og Crosetto (2008) mener at ved å introdusere en metode for skanning av bergoverflaten i tunnel, vil en kunne beregne både tykkelse og volum for sprøytebetong. Sammenlignet med tykkelsesmålingene vil en ikke bare kunne skaffe tykkelsen, men det menes at plasseringen i sprøyteoverflaten med tilhørende tykkelse også vil være mulig å fremstille digitalt. Ved å anvende skanningsmetoder som TLS og LiDAR vil det også kunne skape mulighet til å beregne volum for påført sprøytebetong.

I feltstudie ble det funnet ut at sprøyteoperatør blir fortalt hvilken tykkelse som skal påføres på bergoverflaten, før sprøyt. Tykkelsen som sprøyteoperatør påfører, baseres på mengden som er bestilt og på påføringsområdet. Ved bruk av tykkelsesmålinger i kontrollsekvensene vil det fungere som regelmessige kvalitetssjekk for utført arbeid som beskrevet i teorien. Dersom det viser seg at skanningene er pålitelige, vil en sprøyteoperatør kunne bruke skanning som et verktøy til å sjekke antagelsene om tykkelse i større grad enn ved tykkelsesmålingene. Gitt at det ikke utføres skanning for hver sprøyt, vil en forbedring av nøyaktigheten for skanningen føre til at sprøyteoperatør også kan bli mer treffsikker under sine sprøyt. På denne måten kan en derfor oppnå et bedre resultat som gagnar alle parter.

Når det gjelder skannemetodene legger og Holtet (2018); Monserrat og Crosetto (2008) og AMV frem at skanning kan utføres ved bruk av både TLS og LiDAR. Begge metodene anvender skanning av aktuelt område som skal sprøytes. Det nevnes to fremgangsmåter ved å ta i bruk skanning rettet mot sprøytebetong. Den ene er å skanne før og etter påføring, mens den andre er å kontinuerlig skanne området, og å få opp påføring og tykkelse på et display. Førstnevnte fremgangsmåte bekrefter skannemetoden som er nevnt i det teoretiske rammeverket.

Fordelene en kan oppnå ved å beregne mengden kontinuerlig under sprøyting, som AMV utvikler, vil gjøre at sprøyteoperatør kan få tilbakemeldinger for påføringen umiddelbart. Følgelig vil det kunne tas hensyn til områder med for liten tykkelse, og en ny mengde kan påføres med en gang. Dette gjør at en slipper å vente til etter sprøyting for å se resultatet, noe som gjør at en kan unngå et tilleggslag og dermed spare tid og kostnader. Samtidig viser det seg at dette er en metode som er under utvikling, mens flere kilder peker på at skanning før og etter påføring av sprøytebetong allerede er utviklet. Dette stiller spørsmål til om en oppnår suksess eller fiasko, der en skulle tro at det er basert på utvikling av teknologi innen skanning. Dette baserer seg på at skanning av sprøytebetong fremstår som å være meget aktuelt for fremtidig bergsikring der sikkerhet er et viktig fokus.

Dersom det viser seg at skanningen av sprøytebetong er mer pålitelige enn tykkelsesmålingene, vil det følgelig stilles spørsmål til om manuell tykkelsesmåling burde erstattes med skanning som dokumenteringsmetode. Dette avhenger blant annet at en klarer å utvikle teknologi og metoder for fjerning og kompensering for usikkerhetsmomenter.

Usikkerhetsmomentene ved bruk av skanning av sprøytebetong kommer i form av blant annet skygger, oppløsning og radiell forskyvning, ifølge Bever Control og Lato og Diederichs (2014). Dette vil være utfordringer som en må ta hensyn til ved skanning av sprøytebetongen. Som nevnt i det teoretiske rammeverket vil det også være et slingringsmonn for den bestilte tykkelsen på sprøytebetongen. Dette til tross for at det vil være gunstig for alle parter å oppnå mest mulig korrekt mengde og tykkelse.

Som i eksempelet fra Bever Control der det er bestilt en tykkelse på 10 cm, viser det seg at en liten andel har en tykkelse på opp mot 25 cm. I dette tilfellet er det usikkert hvorfor det har oppstått, men det kan muligens komme av at det er sprøytet for å fylle sprekker. Av den grunn vil eksempelvis en gjennomsnittstykkelse av påført mengde ikke kunne representere et godt inntrykk for kvaliteten til en påføring. En må i det tilfellet analysere flere parametre, eksempelvis den grafiske fremstillingen i kombinasjon med en samtale med sprøyteoperatør som vet hvor de tilhørende sprekke befant seg.

Implementering av skanning vil naturligvis bli investert i dersom tidsforbruket og kostnadene er innenfor rimelighetens grenser. Derfor må dette vurderes for hvert enkelt prosjekt, som vil kunne ha ulike grader av usikkerhetsmomenter avhengig av blant annet geologi, erfaring og utstyr. Ved å anvende skanning til mengdeberegning og tykkelsesmåling for sprøytebetong, viser kildene seg å være samstemt i at dette kan redusere forbruket av sprøytebetong. Som nevnt tidligere vil en reduksjon av forbruk av betong kunne føre til både økonomiske og bærekraftige goder. Sett under ett, pekes det mot at skanning bør utprøves for den enkelte aktør dersom teknologien gjør at kostnadene for implementering er håndterbare.

Dersom det viser seg at skanning gjør at bruken av sprøytebetong kan reduseres en hel del og brukes som dokumentering, kan det tenkes at det vil medfølge nye krav for tunnelbransjen. Dette vil forsterkes på bakgrunn av at betong generelt har store utslipp knyttet til seg, til tross for at det er et rimelig og styrkemessig bra byggemateriale. I tillegg kan skanning gjøre at en får bedre oversikt over bergsikringen. Følgelig kan det føre til at insentivet om sikkerhet også påvirkes dersom det lages strengere krav til dokumentering i tunnelbransjen.

6.4.3 Robotisering av sprøyterobot

I dagens tunnelbransje forklares det at det er høye krav om kvalitet og pålitelighet til arbeidet som utføres, mener Kurth, Gause og Rispin (2004). I den sammenheng vil en implementasjon av robotisering også dras inn i diskusjonen for å finne ut i hvilken grad det kan brukes som verktøy til å nå og opprettholde disse kravene. Robotiseringen av sprøyteroboten vil være en kombinasjon av å skanne området som den skal arbeide på, og dermed utføre sprøyteprosessen på en mest mulig optimal måte (Girmscheid og Moser, 2001). Ulike insentiver for å utvikle denne type teknologi nevnes av kildene som å være blant annet å øke produksjonskapasiteten, øke sikkerheten for helse og sikkerheten til personell, samt å sørge for god kvalitet ved påføring (Liu *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2019).

Som nevnt i feltstudiene, ble det sprøytet bortimot kontinuerlig ved påføring av sprøytebetong for salve. En sprøyterobot har høy produksjonskapasitet og vil ved en slik påføring med få stans, oppnå omtrent det samme. I det tilfellet skulle en derfor tro at automatisert påføring av sprøytebetong ikke vil kunne øke produksjonskapasiteten i stor grad, til tross for at den kan optimere påføringen. På en annen side vil en unngå ha personell i nærheten av berg som er usikret, altså i form av berg uten påført sprøytebetong der det kan oppstå nedfall av stein. Dermed vil en oppnå større sikkerhet for sprøyteoperatør som kan overvåke prosessen i trygg avstand bak fra de røffe forholdene som eksisterer ved tunneldriving.

Når det kommer til de ulike type sprøytene sett opp mot robotisering av sprøyterobot, er det grunn til å tro at mulighetene vil variere for de ulike sprøytene, basert på feltstudiet. For salve er det som nevnt ikke grunn til å tro at produksjonskapasiteten vil øke. Derimot vil det muligens være tilfellet for spiling og bue der det vil være flere gjenstander i området hvor det påføres. Et eksempel på dette er innsprøyting av armeringsbuer der det er grunn til å tro at det blir flere ulike vinkler slik at

påføringsmønsteret kan optimaliseres av en robotisert sprøyterobot. På denne måten kan sprøytetiden reduseres og videre øke produksjonskapasiteten.

Det vil kanskje være mulig å tilrettelegge for at personen som leverer betongen til sprøyten også kontrollerer prosessen? Det vil si at en kun har én person til stede for både betongtransporten og til den automatiserte påføringen for å redusere driftskostnader. På lik linje som nevnt tidligere angående skjerpning av krav i tunnelbransjen, kan det også være tilfellet ved en eventuell robotisering av sprøyteroboter. Mulighetene til å øke sikkerheten og arbeide mer bærekraftig er forutsetninger som gjør at kravene øker. Det vil si at dersom en har mulighet til å påføre sprøytebetong med høyere sikkerhet, burde dette bli implementert, såfremt kostnaden ikke er meget stor. Kanskje vil en betingelse for sprøytebetong i fremtiden, bli at sprøyteoperatør koordinerer en robotisert påføring og holder seg i sikker avstand unna påføringen?

Som nevnt fra feltstudiet er det sprøyteoperatør som styrer og utfører sprøytingen med alt ansvar for påføring. I tillegg er det bestillingsmengden og erfaringen til sprøyteoperatør som avgjør hvilken tykkelse som oppnås, ifølge Entreprenørservice. Som beskrevet av AMV, menes det at ved å skanne underveis i påføringen, vil en robotisert påføring lede til at sprøyteroboten kontinuerlig kan overvåke tykkelsen til sprøytebetongen for det aktuelle området. Følgelig vil det i tillegg til å kunne forbedre kvaliteten til påføringen, vil det også føre mye av ansvaret bort fra sprøyteoperatør og over til den robotiserte sprøyteroboten (Lin *et al.*, 2019). En vil derfor ikke være avhengig av at sprøyteoperatør er erfaren for å kunne oppnå et godt resultat. Samtidig er utviklingen om automatisert påføring i startfasen hos samtlige av kildene, hvor det enda ikke er implementert ved tunneldriving, men utføres i testfaser. Derfor er det usikkert når den teknologiske utviklingen vil kunne bytte ut sprøyteoperatøren, selv om det nevnes et anslag på 5-10 år av Solberg (2020).

6.4.4 Big data

Fenomenet big data fremstår som en metode med utallige muligheter, der en kan anvende det til bortimot hva en ønsker. Det vil si at en henter ut så mye informasjon om en prosess som mulig, og anvender dette på en måte som kan komme byggebransjen til gode (Sørensen, Olsson og Landmark, 2016). Dette kan være i form av bedre oversikt over det arbeidet som underentreprenører utfører, nødvendig vedlikehold, fremdriftsplanlegging og ressursplanlegging (Shrestha, 2013). Samtidig pekes det også på at en implementering av big data bør innebære å inkludere store mengder data, og ikke bare en liten del av det. På denne måten kan en også sammenligne data fra ulike prosesser som kan lede til mer kunnskap og føre til at klokere valg kan tas (Ram, Afridi og Khan, 2019).

Det nevnes i det teoretiske rammeverket at MWD utnyttes til innsamling av data fra boreriggene under boring. På lik linje som antydnet i resultatene av Shrestha (2013), vil det med bruk av analysemetoder være mulig å komme til gode for vedlikehold, eksempelvis for sprøyteroboten. I dette tilfellet vil det derfor kanskje være en mulighet å iverksette tiltak som å utføre vedlikehold på maskinen for å unngå driftsstans og følgelig øke produksjonskapasiteten.

Som nevnt tidligere i diskusjonskapittelet, kan en ta for seg sprøyterapportene og hente ut data som potensielt kan anvendes til ulike analyser. Det vil si at en kan ta for seg produksjonskapasitet, forbruk av betong for ulike typer sprøyt eller andre merkverdige forhold. Det kan også tenkes at en kan få ut resultater fra analysene som en ikke visste en trengte, som igjen kan påvirke fremdriften eller sikkerheten ved tunneldriving. På denne måten kan det oppdages trender gjennom analyser som kan bidra til å gjøre et arbeid mer bærekraftig.

Internett har gitt byggebransjen stor tilgang til data om egne prosesser (Motawa, 2017). Samtidig kan det virke som aktørene ikke vet hvordan en kan benytte seg av informasjonen for å videre skape verdi. Kildene virker å være enige om at potensialet for en implementering av big data kan lede til mye uoppdaget informasjon angående flere ulike tema. Samtidig må det tilrettelegges for at big data ikke går utover personvern, som eksempelvis arbeidernes, der det kan slå negativt ut ved at analysene inkluderer data som egentlig er privat. I tillegg må det også tas hensyn til at en implementering av

bruk av big data vil innebære økte kostnader. Dette i form av blant annet spesialister som bør utføre arbeidet.

7 Konklusjon

I innledningen legges det frem at produktiviteten i bygge- og anleggsvirksomheten har falt helt siden år 2000. I tillegg står byggenæringen ovenfor mange av fremtidens lokale og globale utfordringer, der en av dem er klimatilpasning. Fokuset blir rettet mot å nå klimamålene, imøtekomme det grønne skiftet og samtidig opprettholde en økonomisk vekst. Masteroppgaven har i hovedsak tatt i bruk forskningsmetoder som litteraturstudie, casestudie, tidsstudie og dokumentstudie. I den forbindelse har det blitt undersøkt dagens bruk av sprøytebetong som bergsikring og hvordan utviklingen kan bli i fremtiden.

Forskningsspørsmål 1 kartlegger at sprøytebetong anvendes som en del av den permanente sikringen ved konvensjonell tunneldriving. Sprøytebetong påføres ved bruk av en sprøyterobot, der våtmetoden vanligvis anvendes ved større prosjekter. Utførelsen er avhengig av god kommunikasjon mellom de aktuelle partene med tanke på bestillingsmengde av betong og starttidspunkt for sprøyting for å oppnå bergsikring av god kvalitet.

Det eksisterer insentiver av både tekniske og økonomiske grunner ved mengdebestilling av betong. De tekniske grunnene baserer seg på mengdeberegningen som foretas basert på areal, fjellfaktor, tykkelsesmålinger og andre spesielle forhold. De økonomiske grunnene består av å redusere de tilhørende kostnadene, som også legger til rette for god bergsikring.

Sprøyteoperatør har ansvar for å oppnå en forutbestemt tykkelse med bestilt mengde betong på et bestemt område, og har ikke noe ansvar for selve mengdebestillingen. Kvaliteten til påført sprøytebetong i form av korrekt tykkelse, avhenger av sprøyteoperatørs erfaring og bestilt mengde betong. Derfor oppfordres det til et samarbeid mellom sprøyteoperatør og innkjøper av betongen, da dette kan føre til en reduksjon av betongforbruk, økt kvalitet på utført arbeid, redusere kostnader og dermed gjøre prosessen mer bærekraftig.

Forskningsspørsmål 2 fremmer at et stort insentiv ved norsk tunneldriving er å oppnå god inndrift, på grunn av lønningsformen akkord. Sikringsfilosofien blir opprettholdt ved at tunneldriverne blir betalt for både inndrift og sikring. For en bedrift er lønnsomhet helst essensielt, og fører dermed til at produktivitet er et essensielt tema, da enhver aktør ønsker å oppnå mest mulig output på minst mulig input.

For sprøyting vil produksjonskapasiteten være lavere enn teoretisk pumpekapasitet for en sprøyterobot. Sprøyteroboten oppnår en stor produksjonskapasitet ved kontinuerlig påføring, og påvirkes i stor grad ved driftsstans. Tidsstudiene viser at tilfeldig tapstid ikke oppstår ofte, og at det er grunn til å tro at det totalt sett ikke vil utgjøre en stor del av syklustiden for sprøyting.

Det kan oppstå hendelser som er i gråsonen om det skal inkluderes i brutto sprøytekapasitet. Derfor må tilfeldig tapstid vurderes enkeltvis. Tidsstudiene I, II og III fikk en netto sprøytekapasitet på henholdsvis 18,4 m³/t, 16,7 m³/t og 11,6 m³/t, og brutto sprøytekapasitet på 12,1 m³/t, 13,0 m³/t og 8,2 m³/t. Brutto sprøytekapasitet viser seg å bli redusert til en viss grad, dersom det oppstår utfordringer ved sprøyting. Netto sprøytekapasitet ble påvirket i større grad av hendelsen. Dette på grunn av at netto sprøytekapasitet kun innebærer aktiviteten sprøyting der det påføres bortimot kontinuerlig.

Netto sprøytekapasitet for salve, spiling og bue ender henholdsvis på 13,3 m³/t, 14,1 m³/t og 13,8 m³/t for begge tunnellopene sett under ett. Sprøyt for salve baserer seg på omtrent tre ganger så mye data, enn for spiling og bue. Samtlige av netto sprøytekapasiteter for tidsstudiene ender på høyere verdier enn for sprøyterapportene. Av den grunn er det grunn til å tro at kapasitetene i sprøyterapportene inneholder tilfeldige tapstider.

Ved bruk av big data, kan en nå analysere og påvirke byggebransjen på helt nye måter enn tidligere. Samtidig bør det utføres av eksperter innen fagfeltet med store datakunnskaper. På lik linje som i denne oppgaven, kan big data anvendes på samtlige sprøyterapporter for et helt tunnelprosjekt. Dette kan gjøres ved å hente ut sprøytekapasiteten for de ulike type sprøytene eller skaffe mer oversikt over arbeid som underentreprenører utfører. Big data kan føre til besparing av tid, kostnader, ressurser og personell ved driving.

Det viser seg at eldre enhetstall fra 1999 for påføring av sprøytebetong til bergsikring er utdaterte og må oppdateres mot dagens sprøytekapasiteter. Det oppfordres derfor til å ta i bruk en verdi på 0,1 h/m³ som gjeldende enhetstall for salvesprøyt ved tunneldriving.

Byggebransjen opplever en ny trend, der det er fokus på økt bærekraft. Det inkluderer tiltak som å redusere forbruket av betong eller bruke alternative råvarer, da betong forbindes med store CO₂-utslipp. En reduksjon i materialbruken kan føre til flere ringvirkninger, som et mindre behov for energiforbruk til transport, produksjon og avfallshåndtering. Til tross for økte CO₂-avgifter, setter aktører sine egne bærekraftsmål. Ved å øke produksjonskapasiteten til påføring av sprøytebetong, kan en redusere forbruket. Derfor bør en først skaffe oversikt over gjeldende produksjonskapasiteter, gjøre tiltak for at den kan øke, og dermed oppnå en mer bærekraftig sprøyteprosess.

Forskningsspørsmål 3 avslører at det eksisterer krav om dokumentering av påført sprøytebetong som kommer i form av sprøyterapporter. Tykkelsesmålinger blir utført i kontrollsekvenser som kan være tidskrevende og upålitelig, på grunn av ukjent underlag ved prøvetaking. En nyere dokumenteringsform anvender metodene for laserskanning; TLS og LiDAR som kan måle både tykkelse og volum av påført sprøytebetong. Tradisjonelt gjøres det ved skanning før og etter sprøyt, men nå utvikles det skannere som kan vise tykkelse og påført volum kontinuerlig under sprøyting. God kvalitet og nøyaktighet vil følge med og kan redusere forbruket av sprøytebetong som gagnar alle involverte parter. Samtidig finnes det usikkerhetsmomenter som skygger, god nok oppløsning og radiell forskyvning som må tas hensyn til, for å oppnå skanninger av god nok kvalitet. Til tross for at dette foreløpig ikke er standard prosedyre, tyder det på at tykkelsesmålingene kan bli erstattet med laserskanning i fremtiden. Dersom laserskanning realiseres som dokumenteringsmetode, kan det lede til strengere krav til dokumentering for sprøytebetong, med positive virkninger som økt bærekraft og bedre sikringsarbeid.

En robotisering av sprøyteroboten vil kunne optimalisere påføringsmønsteret, og dermed øke produksjonskapasiteten. Dette vil variere etter hvilken type sprøyt det er, hvor påføringen for salvesprøyt utføres omtrent kontinuerlig fra før. Derfor vil en robotisering øke sprøytekapasiteten i liten grad for salvesprøyt. Derimot vil en muligens øke sprøytekapasiteten for spiling og bue i større grad, der sprøytebom og sprøytemunnstykkets vinkler må endres ofte, der et optimalisert påføringsmønster er gunstig. På denne måten kan en redusere forbruket av betong og samtidig øke sikkerheten for sprøyteoperatør, som kan trekke seg et par meter unna påføringen. Følgelig kan det tenkes at det vil komme krav om at operatør ikke kan befinne seg under usikret berg, dersom robotisering for påføring av sprøytebetong blir normal prosedyre.

Foreløpig har sprøyteoperatør alt ansvaret ved å fordele sprøytebetongen jevnt utover til forhåndsbestemt tykkelse. En robotisert påføring vil føre noe av ansvaret over til sprøyteroboten og samtidig øke kvaliteten ved påføring. Imidlertid er utviklingen av robotisert påføring i startfasen hos samtlige aktører, og ingen utfører dette som fast prosedyre per i dag.

Det oppfattes som at aktører i byggebransjen har tilgang på mye data, men er usikre på hvordan dette skal tas i bruk.

8 Anbefalinger for videre arbeid

Gjennom masteroppgaven er det fremlagt momenter for forbedring i bransjen som kan utvikles videre. Av den grunn kan videre undersøkelser ved å utføre en grundigere kartlegging av bruk, produksjonskapasitet og dokumentasjon for sprøytebetong gjennomføres på denne måten:

- Det kan være interessant å undersøke om andre aktører utfører mengdeberegning av betong på andre måter enn fremlagt i masteroppgaven.
- Gjennomføre flere tidsstudier eller lignende kartlegging, for å undersøke størrelsen tilfeldige tapstider utgjør av summen til de faste tapstidene og de proporsjonale tidene. På denne måten kan en bestemme mer nøyaktig hvorvidt totalentreprenøren har en god organisert tunneldriving. I tillegg vil en også kunne beregne kapasitetene for salve, spiling og bue mer nøyaktig.
- For å skaffe et mer helhetlig bilde til produksjonskapasiteten, anbefales det å gjennomføre undersøkelser med andre type sprøyteroboter involvert.
- Analysere sprøyterapportene som utført i masteroppgaven ved hjelp av metoder innen big data.
- Bestemme enhetstall for sprøytebetong ytterligere, ved å inkludere et atskillig større datagrunnlag for salvesprøyt, delt inn etter tykkelse.
- Kartlegge mulighetene for å anvende alternative materialer som tilslag i sprøytebetong.
- Anskaffe ytterligere resultater fra skanning av sprøytebetong, for å kunne kartlegge mulighet for redusering av betongforbruket. I tillegg bør en fokusere ytterligere på nøyaktigheten til skanning for tykkelsesmåling, for å vurdere om det kan erstatte den gjeldende målemetoden.
- Opprette kontakt med maskinprodusenter som utvikler automatisert påføring av sprøytebetong. Dette kan bidra til å kartlegge hvor lang tid det vil ta før det blir standard prosedyre ved tunneldriving.

Referanser

Abellán, A. *et al.* (2014) Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities, *Earth Surf. Process. Landforms*, 39(1), s. 80-97. <https://doi.org/10.1002/esp.3493>

AMV (2008) *AMV 7450 Shotcrete Robot*. Tilgjengelig fra: <https://www.amv-as.no/7450-shotcrete-robot> (Hentet: 10.12 2021).

Arntzen, E. og Tolsby, J. (2010) *Student som forsker i utdanning og yrke. Vitenskapelig tenkning og metodebruk*.

Aune, S. E. og Lima, J. (1992) *Anleggsmaskiner : kostnad, ytelse og driftskontroll*. Trondheim: Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole, Institutt for anleggsdrift.

Autodesk (2015) *About Creating 3D Meshes*. Tilgjengelig fra: <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-A6232957-5039-4AB7-8B1D-8FD0AD98F77B-htm.html> (Hentet: 03.11 2021).

Behera, M. *et al.* (2014) Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Construction and Building Materials*, 68, s. 501-516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>

Bever Control (2016) *Laser Scanning of Shotcrete Thickness*. Tilgjengelig fra: https://www.bevercontrol.com/uploads/cHNJagPM/_1703_shotcrete_scan_en.pdf (Hentet: 20.12 2021).

Brox, D. (2017) *Practical guide to rock tunneling*. CRC Press/Balkema.

Byggenæringens Landsforening (2016) *Grønt skifte - byggenæringens bidrag til løsning*: Byggenæringens Landsforening. Tilgjengelig fra: <https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/rapporter/bnls-politikk-gront-skifte.pdf>.

Byggenæringens Landsforening (2022) *Om byggenæringen*. Tilgjengelig fra: <https://www.bnl.no/om-oss/om-byggenaringen/> (Hentet: 05.01 2022).

Byggutengrenser (2020) *Industrialisering*. Tilgjengelig fra: <https://www.byggutengrenser.no/2017/02/15/industrialisering/> (Hentet: 03.01 2022).

Chan, P. og Kaka, A. (2004) *Construction productivity measurement: A comparison of two case studies*.

Chawla, H. og Khattar, P. (2020) *Data Lake Analytics on Microsoft Azure: A Practitioner's Guide to Big Data Engineering*. Berkeley, CA: Berkeley, CA: Apress.

Cho, S. N., Seunguk (2017) *The Reduction of CO2 Emissions by Application of High-Strength Reinforcing Bars to Three Different Structural Systems in South Korea*. Tilgjengelig fra: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/9/1652> (Hentet: 11.12 2021).

- Construction Industri Institute (2022) *Work Force View of Construction Productivity*. Tilgjengelig fra: <https://www.construction-institute.org/resources/knowledgebase/knowledge-areas/construction-execution/topics/rt-215> (Hentet: 16.11 2021).
- Construction Research Congress (2005) *Construction Research Congress 2005: Broadening Perspectives*. Reston, VA: Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Crawford, P. og Vogl, B. (2006) Measuring productivity in the construction industry, *Building research and information : the international journal of research, development and demonstration*, 34(3), s. 208-219. <https://doi.org/10.1080/09613210600590041>
- Dick, Ø. B. (2020) *Radiell forskyvning*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/radiell_forskyvning (Hentet: 18.11 2021).
- Drevland, F. (2016) Reduksjon av syklustid i byggeprosjekt. Tilgjengelig fra: <http://frodedrevland.no/2016/03/17/reduksjon-av-syklustid-i-byggeprosjekt/>.
- Dvergsdal, H. og Elster, A. C. (2019) *Stordata*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/stordata> (Hentet: 08.11 2022).
- Engebø, A. (2020) Introduksjon til forskningsmetode for prosjekt- og masteroppgave. NTNU. Tilgjengelig fra: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/6449736?X-Blackboard>.
- Eriksen, K. (2012) *3D-skanning til sprøytebetong*. Tilgjengelig fra: <https://www.at.no/anlegg/442628> (Hentet: 05.01 2022).
- Fekete, S., Diederichs, M. og Lato, M. (2010) Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels, *Tunnelling and underground space technology*, 25(5), s. 614-628. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.04.008>
- FN-sambandet (2019) *Klimaendringer*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer> (Hentet: 10.04 2021).
- Gikas, V. (2012) Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation, *Sensors (Basel)*, 12(8), s. 11249-11270. <https://doi.org/10.3390/s120811249>
- Girmscheid, G. og Moser, S. (2001) Fully Automated Shotcrete Robot for Rock Support, *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 16(3), s. 200-215. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00226>
- Goodrum, P. M., Haas, C. T. og Glover, R. W. (2002) The divergence in aggregate and activity estimates of US construction productivity, *Construction management and economics*, 20(5), s. 415-423. <https://doi.org/10.1080/01446190210145868>
- Grimstad, E. og Norsk betongforening (2011) *Sprøytebetong til bergsikring*. [Rev. utg.]. Oslo: Norsk betongforening.
- Grønmo, S. (1996) *Forholdet mellom kvalitative og kvantitative tilnærminger i samfunnsforskningen*. Oslo: Universitetsforl.

- Grønmo, S. (2020a) *Kvalitativ metode*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/kvalitativ_metode (Hentet: 16.12 2021).
- Grønmo, S. (2020b) *Kvantitativ metode*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/kvantitativ_metode (Hentet: 02.12 2020).
- Grønmo, S. (2021) *Validitet*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/validitet> (Hentet: 16.12 2021).
- Hanington, B. og Martin, B. (2019) *Universal methods of design: 125 ways to research complex problems, develop innovative ideas, and design effective solutions*. Rockport Publishers.
- Haugan, B. (2016) *NHO-sjefen: Vi når aldri klimamålene med dagens politikk*. Tilgjengelig fra: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/g8jla/nho-sjefen-vi-naar-aldri-klimamaalene-med-dagens-politikk> (Hentet: 05.01 2022).
- Haugen Svendsen, C. (2020) Hvordan vi samler inn, analyserer og fremstiller geometrisk og geologisk informasjon?, i Control, B. (red.): Bever Control. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/13-Svendsen.pdf>.
- Heimestøl, A. (2022) *Geologi i Vidalen*. Tilgjengelig fra: <https://hedalen.no/severdigheter/vidalen/vidalen-geologi/> (Hentet: 03.01 2022).
- Holtet, J. A. (2018) *Lidar*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/lidar> (Hentet: 18.11 2021).
- Jernbaneverket (2018) *Slik bygges jernbanetunneler*. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/contentassets/9eac907f17454cbb9dacff4abf2df461/slik-bygges-jernbanetunneler---jbv.pdf> (Hentet: 17.12 2021).
- Kildekompasset (2022) *Kildekritikk*. Tilgjengelig fra: <https://kildekompasset.no/kildekritikk/> (Hentet: 16.12 2021).
- Kim, H. et al. (2018) Analyzing context and productivity of tunnel earthmoving processes using imaging and simulation, *Automation in Construction*, 92, s. 188-198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.002>
- Kim, Y. og Bruland, A. (2009) Effect of rock mass quality on construction time in a road tunnel, *Tunnelling and underground space technology*, 24(5), s. 584-591. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.02.004>
- Kurth, T., Gause, C. og Rispin, M. (2004) Robotic shotcrete applications for mining and tunneling, i.
- Lackner, E. J. (2021) *Forskning*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/forskning> (Hentet: 12.12 2021).
- Lato, M. J. og Diederichs, M. S. (2014) Mapping shotcrete thickness using LiDAR and photogrammetry data: Correcting for over-calculation due to rockmass convergence, *Tunnelling and underground space technology*, 41(1), s. 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.013>
- Lin, X. et al. (2019) *An Automatic Tunnel Shotcrete Robot*.

Liu, G. et al. (2021) Automatic spraying motion planning of a shotcrete manipulator, *Intelligent service robotics*. <https://doi.org/10.1007/s11370-021-00348-9>

Maidl, B., Thewes, M. og Maidl, U. (2013) *Handbook of tunnel engineering. : Volume I, : Structures and methods*. Ernst & Sohn.

Martínez-Sánchez, J. et al. (2016) AUTOMATIC THICKNESS AND VOLUME ESTIMATION OF SPRAYED CONCRETE ON ANCHORED RETAINING WALLS FROM TERRESTRIAL LIDAR DATA, *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences.*, XLI-B5, s. 521-526. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-521-2016>

Monserrat, O. og Crosetto, M. (2008) Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 63(1), s. 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.008>

Motawa, I. (2017) Spoken dialogue BIM systems – an application of big data in construction, *Facilities (Bradford, West Yorkshire, England)*, 35(13/14), s. 787-800. <https://doi.org/10.1108/F-01-2016-0001>

NFF (2008) *Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. Norsk forening for fjellsprengningsteknikk.

NFF (2014) *Norwegian Tunneling Technology*. (23). NFF - Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/publikasjoner/engelske-publikasjoner/> (Hentet: 17.10).

NFF (2016) *Sikkerhet ved arbeid i tunneler og bergrom*. Norsk forening for fjellsprengningsteknikk. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/publikasjoner/handboker/>.

NFF (2017) *The principles of Norwegian tunnelling*. (26). NFF - Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/publikasjoner/engelske-publikasjoner/> (Hentet: 03.11).

NFF (2019) *Digitalisation in Norwegian Tunnelling*. (28). NFF - Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/publikasjoner/engelske-publikasjoner/> (Hentet: 30.10).

NFF (2020) *Bergbolting*. Norsk forening for fjellsprengningsteknikk. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/publikasjoner/handboker/>.

NFF (2021) *Tunnelstatistikken 2021*. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2021/12/Tunnelstatistikken-2021.pdf> (Hentet: 17.11 2021).

NFF (2022) *Om oss*. Tilgjengelig fra: <https://nff.no/om-foreningen/om-oss/> (Hentet: 2022 06.01).

NGI (2015) *Bruk av Q-systemet*. Oslo: NGI.

NGI (2019) *Ingeniørgeologi og bergteknikk | Q-systemet*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Ingeniørgeologi-og-bergteknikk/Q-systemet> (Hentet: 11.12 2021).

Nilsen, F. (2017) *Kompetanse og innovasjon: Bygging og drift av tunneler*. Frode Nilsen Administrerende direktør, LNS Professor II, UiT. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/17840863->

Kompetanse-og-innovasjon-bygging-og-drift-av-tunneler-foede-nilsen-administrerende-direktor-Ins-professor-ii-uit.html (Hentet: 04.11 2021).

Norges standardiseringsforbund (1999) *Beskrivelsestekster for bygg, anlegg, installasjoner : NS 3420 : 2 : [Del J-Q]*. 3. utg. Oslo: Norges standardiseringsforbund.

NTNU (1999) *PROSJEKTRAPPORT 2F-99 TUNNELDRIFT Enhetstidsystem for driving, sikring og innredning*. - ANLEGGSDRIFT (Hentet: 05.01).

NTNU (2006) *Report 2B-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING Advance Rate*. NTNU. Department of Civil and Transport Engineering.

NTNU (2013) Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjekt- og masteroppgaver NTNU.

Tilgjengelig fra:

https://www.ntnu.no/documents/1272524419/1273312006/R%C3%A5d_Og_Retningslinjer_For_Rapp_ortskrivning_BAT.pdf/760496d8-2d08-4b99-9c33-8ff1e6ef7b9c.

NTNU (2016) Kompendium i anleggsteknikk. NTNU: Institutt for bygg, anlegg og transport. (Hentet: 15.10).

NTNU (2017) *EndNote*. Tilgjengelig fra: <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/EndNote> (Hentet: 15.12 2021).

NTNU (2021) *Databases by category*. Tilgjengelig fra: https://bibsyst-almaprmo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/dbsearch?query=contains,dbcategory,&tab=jsearch_slot&sortby=title&vid=NTNU_UB&lang=en_US&offset=0&databases=category,naturvitenskap_teknologi%E2%94%80bygg_konstruksjonsteknikk

(Hentet: 16.12 2021).

(Hentet: 16.12 2021).

NTNU (2022) *Mal for å skrive masteroppgave i Microsoft Word (.dotx) **. Tilgjengelig fra:

https://i.ntnu.no/documents/1305837853/1306916546/NTNU_Master_2018-12-17_NO.dotx/f5237b75-887e-40dd-9717-7b3733684b71?t=1545123903681

(Hentet: 11.12 2021).

O'Mahony, M. og Timmer, M. P. (2009) Output, Input and Productivity Measures at the Industry Level: The EU KLEMS Database, *The Economic journal (London)*, 119(538), s. F374-F403.

<https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2009.02280.x>

Putzmeister (2015) *What are the main components of mechanized shotcrete equipment? Find out in 5 minutes!* Tilgjengelig fra: <https://bestsupportunderground.com/shotcrete-equipment-for-wet-spraying-works/?lang=en> (Hentet: 20.11 2021).

Rade, G. (2020) *Rombeporfyr*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/rombeporfyr> (Hentet: 05.10 2021).

Ram, J., Afridi, N. K. og Khan, K. A. (2019) Adoption of Big Data analytics in construction:

development of a conceptual model, *Built environment project and asset management*, 9(4), s. 564-579. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-05-2018-0077>

Reserve Bank of Australia (2021) *Productivity*. Tilgjengelig fra:

<https://www.rba.gov.au/education/resources/explainers/productivity.html> (Hentet: 05.11 2021).

Riley, D. (2021) *Different Stages of Data*. Tilgjengelig fra:

<https://goalstoreresults.com/2021/09/different-stages-of-data/> (Hentet: 03.10 2021).

- Robson, C. (1993) *Real world research : a resource for social scientists and practitioner-researchers*. Oxford: Blackwell.
- Rodriguez, A., Nabulsi, S. og Rio, O. (2009) *A method for Estimating Thickness of Sprayed Concrete Layers from Pumped Volume*.
- Selmer, A.-K. et al. (2014) Estimating the roughness factor using Lidar scanning system: Comparison of tunnel surfaces before and after applied shotcrete: Institutt for geologi og bergteknikk.
- Shrestha, J. (2013) Big Data, Predictive Analytics, and Data Visualization in The Construction Engineering, i.
- Sika (2020) *Sika Sprayed Concrete Handbook*. Tilgjengelig fra: <https://www.sika.com/content/dam/dms/corporate/n/glo-sprayed-concrete-handbook-2021.pdf> (Hentet: 03.01 2022).
- SINTEF (2018) *Sprøytebetong skal bli mer miljøvennlig*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2018/sproytebetong-skal-bli-mer-miljovennlig/> (Hentet: 03.12 2021).
- SINTEF (2019) *SUPERCON "Sprayed sUstainable PERmanent Robotized CONcrete tunnel lining"*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/projectweb/supercon/> (Hentet: 15.12 2021).
- Skanska (2018) *E16 Bjørum - Skaret*. Tilgjengelig fra: <https://www.skanska.no/hva-vi-gjor/prosjekter/249448/E16-Bjorum-Skaret> (Hentet: 16.12 2021).
- Solberg, M. G. (2020) *Slik skal forskerne gjøre tunnelbygging raskere, rimeligere og mer miljøvennlig*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/slik-skal-forskerne-gjore-tunnelbygging-raskere-rimeligere-og-mer-miljovennlig/490310?key=HckqXqnL> (Hentet: 17.12 2021).
- SSB (2018) *Produktivitetsfall i bygg og anlegg*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/bygg-bolig-og-eiendom/artikler-og-publikasjoner/produktivitetsfall-i-bygg-og-anlegg> (Hentet: 10.04 2020).
- Statens vegvesen (1997) *Feltundersøkelser : retningslinjer*. [Rev. utg.]. Oslo: Statens vegvesen.
- Statens vegvesen (2018) *Bjørum-Skaret* (Hentet: 13.12 2021).
- Statens vegvesen (2020) *Skanska får bygge E16 Bjørum-Skaret*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/europaveg/e16barum/nyhetsarkiv/skanska-far-bygge-e16-bjorum-skaret/> (Hentet: 29.11 2021).
- Stenerud, J. og Statens vegvesen (2012) *Laserscanning av sprøytebetongtykkelse i tunnel = Applying laser scanners to verify shotcrete thickness in tunnels*. Vegdirektoratet.
- Sustainable development (2021) *Take Action for the Sustainable Development Goals*. Tilgjengelig fra: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Hentet: 21.11 2021).
- Svartdal, F. (2020) *Reliabilitet*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/reliabilitet> (Hentet: 14.12 2021).

Sørensen, A. Ø., Olsson, N. og Landmark, A. D. (2016) *Big Data in Construction Management Research*: Tampere University of Technology.

Tjernshaugen, A. (2020) *Akkord*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/akkord_-_arbeidsliv (Hentet: 15.12 2021).

Trussell, N. H. og Jacobsen, S. (2020) *Review of Sprayability of Wet Sprayed Concrete*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/ncr-2020-0016>

Ulstein, H. *et al.* (2016) *Beregning av produktivitetseffekter*. Menon Economics. Tilgjengelig fra: <https://www.menon.no/wp-content/uploads/2016-48-Beregning-av-produktivitetseffekter.pdf>.

Varmdal, T. (2017) *Datakvalitet*. Tilgjengelig fra: https://www.kvalitetsregistre.no/sites/default/files/workshop_statistiknettverk_datakvalitet.pdf (Hentet: 20.12 2021).

Vivek, K. (2021) *Hva er Power Apps?* Tilgjengelig fra: <https://docs.microsoft.com/nb-no/powerapps/powerapps-overview> (Hentet: 14.12 2021).

Wiki (2020) *Finne kilder*. Tilgjengelig fra: <https://innsida.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Finne+kilder> (Hentet: 03.12 2020).

Yang, Y. T. *et al.* (2014) *Study on Pneumatic Control of Shotcrete Machine Booster Manipulator, Applied mechanics and materials*, 496-500(Frontiers of Manufacturing and Design Science IV), s. 1012-1015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.1012>

Østenstad, G. T. (2017) *Produktivitet*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/produktivitet> (Hentet: 07.12 2021).

Aarhus, C. (2019) *Reduserer CO2-utslipp med miljøtilpasset betong på Bybanen*. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/reduserer-co-2-utslipp-med-miljotilpasset-betong-pa-bybanen/1418434/> (Hentet: 25.12 2021).

Aasland, O. G. (2015) *Et godt legeliv er både kunnskapsbasert og erfaringsbasert*. Tilgjengelig fra: <https://tidsskriftet.no/2015/08/legelivet/kunnskap-og-erfaring-teori-og-praksis> (Hentet: 05.12 2021).

Vedlegg

Vedlegg 1 – Bergmassekvalitet og bergsikring etter Q-systemet

Vedlegg 2 – Utklipp av beregninger fra sprøyterapporter

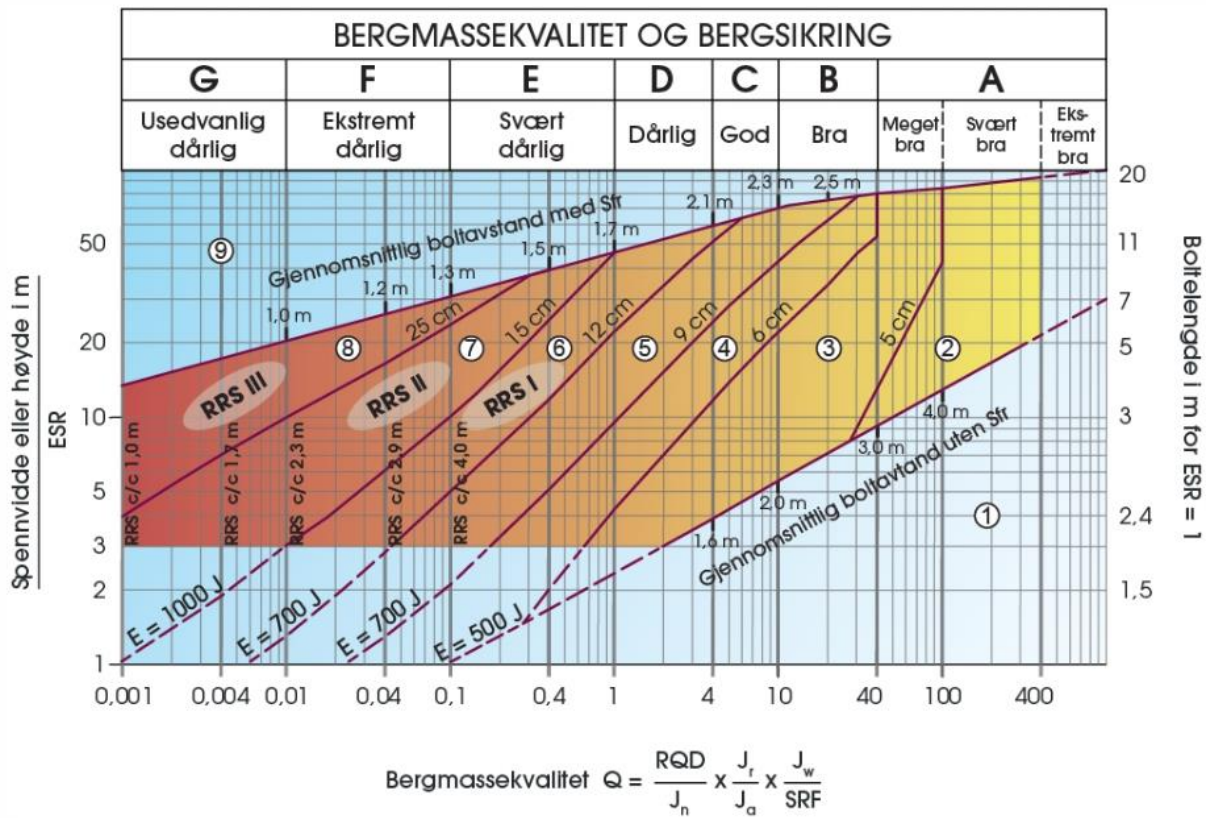
Vedlegg 3 – Resultater fra skanningsprosjekt til Bever Control

Vedlegg 4 – Beregningsgrunnlag for omgjøring til brutto sprøytekapasitet

Vedlegg 5 – Oversikt over uformelle samtaler med kontaktinfo

Vedlegg 6 – Skanningsresultat av Bever Control fra Nogvafjordtunnelen

Vedlegg 1: Bergmassekvalitet og bergsikring etter Q-systemet



Vedlegg 2: Utklipp av beregninger fra sprøyterapporter

Uke	Tunnel	Dato	Skift	Sprøyterapport E-service/Skanska			Følgeseddel NorBetong				Kommentar	Type sprøyt	Sprøytekapasitet 1 [m³/t]	Sprøytekapasitet 2 [m³/t]	
				Bestilt tykkelse [cm]	Vask av fjell [min]	Totaltid sprøyting [min]	Bestilt mengde [m³]	Sprøyting 1 [min]	Mengde 1 [m³]	Sprøyting 2 [min]					Mengde 2 [m³]
39	SG	27.09.2021	Dagskift	10	30	60	7	35	7		Ok	Bue	12,0		
39	SG	27.09.2021	Kveldsskift	15	30	120	12	37	6	24	6	Veldig bløt betong	Salve	9,7	15,0
39	SG	28.09.2021	Kveldsskift	15	27	-	7	30	7		Ok	Bue	14,0	-	
39	SG	28.09.2021	Kveldsskift	15	0	-	6	35	6		ok	Bue	10,3	-	
39	SG	29.09.2021	Dagskift	15	20	120	11	29	6	26	5	Ventet en time og ti	Usikker	12,4	11,5
39	SG	30.09.2021	Kveldsskift	25	5	-	8	35	8		Ok. Sprut på spiling	Spiling	13,7	-	
39	SG	30.09.2021	Kveldsskift	25	0	60	8	43	8		Ok sprut bue	Bue	11,2	-	
39	SG	01.10.2021	Dagskift	15	10	120	12	31	6	29	6	Veldig stiv og seig	Salve	11,6	12,4
40	SG	04.10.2021	Dagskift	25	10	60	7	25	7		E1000 på spiling,	Spiling	16,8	-	
40	SG	04.10.2021	Dagskift	25	0	60	8	53	8		Bløt betong, tilsatt 2	Bue	9,1	-	
40	SG	05.10.2021	Dagskift	15	10	0	12	19	6	25	6	Bløt betong begge	Salve	18,9	14,4
40	SG	05.10.2021	Kveldsskift	10	0	60	7	29	7		Spiling	Spiling	14,5	-	
40	SG	06.10.2021	Kveldsskift	20	0	-	7	37	7		Ok	Bue	11,4	-	
40	SG	06.10.2021	Dagskift	15	10	60	12	26	6	26	6	Venting på	Salve	13,8	13,8
40	SG	06.10.2021	Kveldsskift	25	0	60	7	28	7		Spiling, vann drypp	Spiling	15,0	-	
40	SG	06.10.2021	Kveldsskift	20	0	60	8	29	8		Bue	Bue	16,6	-	
40	SG	07.10.2021	Dagskift	15	20	120	12	26	6	37	6	Salve	Salve	13,8	9,7
40	SG	07.10.2021	Kveldsskift	20	0	60	7	32	7		Spiling sør	Spiling	13,1	-	
40	SG	08.10.2021	Dagskift	15	0	60	16	33	8	45	8	2 stk buer sør	Bue	14,5	10,7
40	SG	09.10.2021	Dagskift	15	10	60	12	24	6	29	6	Salve sør	Salve	15,0	12,4
41	SG	11.10.2021	Dagskift	20	0	-	7	34	7		Spilling sør,	Spiling	12,4	-	
41	SG	11.10.2021	Dagskift	20	0	60	7	26	7		Bue sør	Bue	16,2	-	
41	SG	11.10.2021	Kveldsskift	15	0	60	12	31	6	34	6	Ok	Salve	11,6	10,6
41	SG	12.10.2021	Dagskift	10	0	60	7	35	7		Spiling sør	Spiling	12,0	-	
41	SG	12.10.2021	Dagskift	10	0	60	7	26	7		Bue sør	Bue	16,2	-	
41	SG	12.10.2021	Kveldsskift	15	0	60	12	38	6	40	6	Salve på sør	Salve	9,5	9,0

Vedlegg 3: Resultater fra skanningsprosjekt

Site	FV 650 Nordoyvegen
Tunnel	Nogvafjordtunnelen
Section	25673.000
Wanted thickness (mm)	100
10% percentile (mm)	60
25% percentile - Lower quantile (mm)	74
50% percentile - Median (mm)	93
75% percentile - Upper quantile (mm)	113

Vedlegg 4: Beregningsgrunnlag for omgjøring til brutto sprøytekapasitet

Omgjøring fra netto til brutto sprøytekapasitet			
Tidsstudier			
Tidsstudie	I	II	III
Meter sprøytet	2	4	2
Snitt sprøytetid [t:min:sek]	00:22:51	00:25:07	00:36:14
Brutto tidsforbruk (2 sprøyt) [t:min:sek]	01:09:44	-	01:41:55
Tillegg 1 (2 x klargjøring) [t:min:sek]	00:04:06	-	00:04:06
Tillegg 2 (2 x sprøyt) [t:min:sek]	00:45:41	-	01:12:27
Netto tidsforbruk (4 sprøyt) [t]	1,5	1,7	2,4
Brutto tidsforbruk (4 sprøyt) [t]	2,0	2,1	3,0
Netto tidsforbruk/ brutto tidsforbruk [%]	76,4 %	78,1 %	81,2 %
Brutto sprøytekapasitet [m ³ /t]	14,1	13,1	9,4
Sprøyterapporter			
Netto sprøytekapasitet [m ³ /t]	13,9	12,7	
Brutto sprøytekapasitet [m ³ /t]	10,9	10,0	

Vedlegg 5: Oversikt over uformelle samtaler med kontaktinfo

Uformelle samtaler		
Bedrift	Kommunikasjonsform	Kontaktinfo
AMV	Telefonsamtale og e-post	Company@amv-as.no
Skanska	Feltstudie, e-post	+47 40 00 64 00
Entreprenørservice	Feltstudie, e-post	Firmapost@entreprenorservice.no

Vedlegg 6: Skanningsresultat av Bever Control fra Nogvafjordtunnelen

