

Forskjeller i overberg og utfall ved ulike Q-verdier under tunneldriving

Variations in Overbreak and Rock-fallouts Due to Different Q-values in Tunneling

Trondheim Mai 2022

Niklas Oksvold Karlseng
Anders Nideng
Mizgin Khalil Aalberg Zito

Intern veileder:
Omar Sabri

Ekstern veileder:
Arne Dokken

Prosjektnr:
2022 -25

Rapporten er ÅPEN

SKANSKA

 NTNU

Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Problemdefinering fra forprosjektet

Oppgaven skal skrives i samarbeid med Skanska, prosjektgruppen har et ønske om å se nærmere på fjellets geologi hvor tunnelen skal drives, tverrsnitt i tunnelen og knytte dette opp mot et miljøperspektiv. Dette er sentrale temaer i tunneldrift og en god inngang for å finne en problemstilling som er interessant å skrive om.

For å finne en problemstilling rettet mot dette temaet, er det ønskelig å ha en dialog med Skanska, for å høre deres ønsker og hva som er spesielt med denne tunnelen. Tanken med oppgaven er å finne noe Skanska kan dra nytte av, og som kan gi verdifull kompetanse senere i arbeidslivet. Ved utarbeidelse av en oppgave med et omfang på 20 studiepoeng er det nødvendig å ha mulighet til å hente ut mye data og informasjon. Under skriving av en oppgave på en slik størrelse, er det en stor fordel med god data og informasjon. Informasjon er planlagt å hentes ved intervju, fra prosjekt, lese tidligere masteroppgaver i tillegg til å finne nødvendig informasjon på internett. Ved innlevering av forprosjektet er ikke oppgaven snevret inn til noe definert problemstilling, da det er ønskelig å ha det åpent før man kommer lengre inn i oppgaven.

Beskrivelse av prosjektet og mål

Ønsker å gjøre et godt forprosjekt, for å ha et godt fundament til en god bacheloroppgave. For å kunne få et godt resultat på bacheloroppgaven, vil det være hensiktsmessig å gå grundig til verks. Under arbeid med oppgaven er det et mål om å legge ned jevn innsats gjennom hele oppgaven for å få et godt sluttresultat og gi et godt inntrykk til intern og ekstern veileder.

Stikkord fra prosjektet:

- Overberg
- Utfall
- Q-verdi
- Kontur
- Sikring
- Nøyaktig boring
- Geologiske forhold

Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet i ledd av emnet BYGT2900 Bacheloroppgave bygg ved NTNU. Bacheloroppgaven utgjør i sin helhet vurderingsgrunnlaget i emnet som er på 20 studiepoeng. Oppgaven er skrevet gjennom et samarbeid med entreprenøren Skanska.

Prosjektgruppa består av tre byggingeniørstudenter ved NTNU i Trondheim som alle har valgt studieretning for anleggsteknikk ved femte semester. Denne fagblokken bestående av anleggsteknikk og ingeniørgeologi har vekket interessen for tunneldrift hos gruppe medlemmene. Det var derfor ønskelig fra alle medlemmenes side å kunne skrive en oppgave innenfor dette fagfeltet. Selve problemstillingen i oppgaven ble til gjennom dialog med Skanska.

Takk til ekstern veileder og senior produksjonsleder for tunnel i Skanska Arne Dokken for å ta imot prosjektgruppa på strak hånd, og for deling av sine erfaringer med tunneldrift. En ekstra takk rettes til geolog på prosjektet for Kroatunnelen Torbjørn Haga Sletten for organisering av prosjektbesøk, oppfølging under besøk og god dialog både i forkant og etterkant av besøket. Sist, men ikke minst vil vi rette en stor takk til stikningsingeniør John Åge Kulild for god hjelp med innsamling og beregninger av data til oppgaven.

Takk til doktorgradsstipendiat og statistikk ekspert ved Institutt for matematiske fag, Janne Cathrin Hetle Aspheim for god hjelp med analyse av tallmaterialet og tolkning av resultatene i oppgaven. Til slutt vil vi takke Omar Sabri for å stille som intern veileder fra institutt for Bygg og Miljøteknikk.

Arbeidet med bacheloroppgaven har vært veldig lærerikt, både akademisk sett, men også med tanke på å få et innblikk i praktisk tunneldrift. Prosjektbesøket og brakkelivet på Austrepollen i Hardanger er nok det vi kommer til å huske best fra denne prosessen.

Trondheim, 19.05.2022

Niklas O. Karlseng

Niklas O. Karlseng

Mizgin K. Aa. Zito

Mizgin K. Aa. Zito

Anders Nideng

Anders Nideng

Sammendrag

Ved konvensjonell tunneldrift blir det alltid tatt ut mer masser enn det som er prosjektert. Mengden av denne massen utgjøres av forskjellen mellom det teoretiske og det utførte sprengningsprofilen og kalles overberg. Overberg utgjør en betydelig andel av uttatte masser ved tunneldrift. Dette gir en kostnad i merforbruk av innsatsfaktorer og dermed også økte konsekvenser for miljøet, både lokalt og globalt. Gjennom oppgaven er det i samarbeid med Skanska hentet ut data på utfall, overberg og Q-verdi fra to av deres tunnelprosjekter. Hovedfokuset i oppgaven er undersøkelser knyttet til å undersøke sammenhengen mellom Q-verdi og overberg. Disse dataene er basert på det pågående tunnelprosjektet for Kroatunnelen lokalisert i Kvinnherad kommune. Dette prosjektet var også gjenstand for prosjektbesøk i anledning denne bacheloroppgaven. I tillegg er det gjort undersøkelser av sammenheng mellom utfall og Q-verdi for Skarvberg tunnelen der tunneldriften er avsluttet for vel ett år siden i skrivende stund. For sistnevnte prosjekt er det også gjort undersøkelser på effekt av forspiling. Dataene i oppgaven er systematisert ved bruk av regneark i Excel, deretter er det utført statistisk analyse ved hjelp av programmet RStudio.

Hovedfunnene i oppgaven er at det for prosjektet Kroatunnelen kan påvises en negativ korrelasjon mellom Q-verdi og utfall. For Skarvberg tunnelen kan det ikke med god nok sikkerhet påvises en sammenheng mellom Q-verdi og utfall. Det må presiseres at en slik sammenheng ikke kan fastslås som universell for alle tunneler, men er gjeldende i undersøkt lokasjon for tunneldrift. Spiling er påvist å ha en reduserende effekt på utfall basert på erfaringer hentet fra fagfolk og fra tydelige data på dette.

Abstract

During conventional tunneling it will always come out more masses than theoretically designed. The quantum of this mass makes up of the difference between the theoretical and performed blasting profile and is called overbreak. Overbreak makes up a considerable amount of the masses taken out under tunneling. This gives a significant cost of additional consumption and pollution on the environment locally and globally. Throughout this thesis, in cooperation with Skanska data on on fall-outs, overbreak and Q-value from two of their projects has been collected. The main focus in the thesis is to research the correlation between Q-value and overbreak. These data are based on the ongoing tunnel project for Kroatunnelen located in Kvinnherad municipality. The project was the subject of a visit in the occasion of writing the bachelor's thesis. Investigations of the link between rock-fallouts and Q-value have been done on Skarvbergtunnelen which is a project completed one year ago. For the latter project, studies have also been conducted on the effect of pre-bolting.

The most important findings in the thesis for the project of Kroatunnelen is that a negative correlation can be confirmed between Q-value and rock-fallouts. For Skarvbergtunnelen a correlation between Q-value and rock-fallouts can't with enough certainty be confirmed. It must be emphasized that such a connection cannot be established as universal for all tunnels, but can be valid in our chosen tunnel. Pre-bolting has been shown to have a reducing effect on rock fall-outs based on experience gained from tunnelworkers and from the data extracted.

Terminologi

Beskrivelse av faguttrykk hentet fra (Statens vegvesen 2011) ordliste for sprengningsterminologi, tilgjengelig på Blackboard (BYGT2315 Anleggsteknikk) og (Statens Vegvesen, 2021c).

Faguttrykk	Definisjon
Q-verdi	Mål for geologisk kvalitet på bergmasse
HMS	Helse, miljø og sikkerhet
SJA	Sikker jobbanalyse
TCI	Tunnel Contour Quality Index
MWD	Measurement while drilling
RMR	Rock Mass Rating
BIM	Building Information Modeling (Bygningsinformasjonsmodellering)
ÅDT	Forkortelse for årsgjennomsnittlig trafikk som er definert av totalt antall som passerer et bestemt punkt på en vei i løpet av ett år dividert på 365
DbA	Desibelskala tilpasset mennesker med normal hørsel
Kontur	Tilsiktet flate i berget etter sprengning (Gjenstående bergmasse etter sprenging)
Overberg	Masser utenfor prosjektert tunnelprofil
Utfall	Bergmasse som faller ut utenfor utført kontur (de synlige borestrengene i konturen). Karakteriseres av hakkete salver som gir ujevnt profil og blokker som faller ut
Knøl	Berg som står igjen innenfor sprengningsprofilen
Omskyting	Eventuell boring, lading og sprenging som gjøres på grunn av en mislykket foregående salve.
Sprengstoff	Blanding av kjemiske komponenter karakterisert ved at blandingen på meget kort tid kan omsettes til gass under utvikling av meget høye trykk og temperaturer. Stoff som detonerer
Stuff	Arbeidsstedet ved tunneldrift, det er her salven bores, lades og sprenges for videre fremdrift
Foliasjon	Planstruktur (parallelstruktur) dannet i metamorfe bergarter som følge av deformasjon.
Nonel-tenner	Er et ikke-elektrisk tennsystem. Det kan brukes for alle typer sprengningsarbeid
Ansett	Punktet der en begynner å bore
PE-skum	Frostisolasjonsmateriale som brukes i tunneler kombinert med at det fungerer som vann- og frostsikring, blir brannsikret med sprøytebetong.
Injeksjon	To typer: Sementbasert og kjemisk. Brukes for stabilitetssikring og for å tette vannlekkasjer
Forbolter/Spiling	Brukes for å hindre utfall/ras etter salve
Salve	Steinmassen som sprenges ut når en rekke sprengstoffladninger detonerer. Angir også selve sprengningen

Påhugg	Den første salve for en bergskjæring eller for en tunnel (tunnelpåhugg), sted der tunneldriving starter
Nisje	Sideveis utvidelse i tunnel eller bergrom
Forskjæring	Der tunnelinngangen starter
Driving	Omfatter de faste arbeidsoperasjonene ved tunneldrift som, boring, lading og sprenging.
Inndrift	Målt økning av bergrommets lengde etter en salve
Rensk	Fjerning av løse steinblokker i sprengte kontur for å hindre steinnedfall og rasfarlige partier
Korrelasjon/ Samvariasjon	Et mål innenfor statistikk på hvordan to ulike parametere avhenger av hverandre
Teoretisk sprengningsprofil	Profil som angir minimumskravet for sprenging av tunnel
Utført sprengningsprofil	Konturet som står igjen etter sprengingen
Buelengde	Lengde langs ytterkanten av en kurve
Sleppe	Naturlig lett synlig sprekk i bergarten, ofte med sprekkefyll

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon.....	1
1.1	<i>Bakgrunn.....</i>	1
1.2	<i>Avgrensning av oppgaven</i>	2
1.3	<i>Hypotese</i>	2
2	Teoretisk grunnlag.....	3
2.1	<i>Overberg</i>	3
2.2	<i>Utfall</i>	4
2.3	<i>Geologi.....</i>	6
2.3.1	<i>Bruk av Q-systemet.....</i>	6
2.3.2	<i>Sikring.....</i>	8
2.3.3	<i>Tunnelgeologi.....</i>	8
2.3.4	<i>Oppsprekking</i>	9
2.3.5	<i>Sprekkes orientering.....</i>	12
2.3.6	<i>Svakhetssoner</i>	13
2.4	<i>Arbeidsoperasjoner som kan ha innvirkning på resultatet av undersøkelsen.....</i>	14
2.4.1	<i>Bruk av tenningsystem</i>	15
2.4.2	<i>Lademengde.....</i>	16
2.4.3	<i>Spiling/forbolting</i>	16
2.4.4	<i>Boring.....</i>	17
2.4.5	<i>Stikning.....</i>	17
2.4.6	<i>Ansett for konturhull</i>	18

2.4.7	Planlagt overberg	18
2.4.8	Boreavvik.....	22
2.4.9	Tilpasning utover boreplan	23
2.4.10	MWD (Measurement While Drilling).....	23
2.4.11	Sondering av fjell	25
2.5	<i>Tunnelprofiler</i>	26
2.5.1	Håndbok N500	26
2.5.2	Teoretisk Sprengningsprofil	29
2.5.3	Utført Sprengningsprofil	30
2.5.4	Kontroll av tunnelprofil.....	30
2.6	<i>Økonomi, utvikling og innovasjon i tunnel</i>	31
2.6.1	Kontrakt	31
2.6.2	Økonomisk og miljømessig besparelse.....	32
2.6.3	Innovasjon.....	33
2.7	<i>HMS ved tunneldriving</i>	34
2.8	<i>God kontur og sikring</i>	36
2.8.1	Sikringsmetoder	36
2.8.2	Bolting	37
2.8.3	TCI- Tunnelkonturindeks og Nordtugindeksen	38
3	Metode	42
3.1	<i>Datainnsamling</i>	42
3.1.1	Datainnsamling for Q-verdi.....	43
3.1.2	Datainnsamling for overberg og utfall.....	43
3.1.3	Databehandling og analyse.....	45

3.2	<i>Intervju</i>	45
3.3	<i>Hypotesetesting</i>	46
4	Resultat	47
4.1	<i>Sammenheng mellom Q-verdi og overberg</i>	47
4.2	<i>Sammenheng mellom Q-verdi og utfall</i>	50
4.3	<i>Effekt av spiling</i>	52
4.4	<i>Utført overberg for vegg og heng</i>	53
4.5	<i>Potensiale for kostnadsbesparelse ved reduksjon av overberg</i>	53
5	Diskusjon	57
5.1	<i>Generelle observasjoner</i>	57
5.2	<i>Sammenheng mellom Q-verdi og overberg</i>	58
5.3	<i>Sammenheng mellom Q-verdi og utfall</i>	59
5.4	<i>Planlagt og utført overberg</i>	60
5.5	<i>Effekten av spiling</i>	60
5.6	<i>Miljøperspektiv</i>	61
5.7	<i>Kostnader</i>	62
5.8	<i>Videre arbeid</i>	62
6	Konklusjon	63
7	Bibliografi	65
8	Vedlegg	68

Figurliste

Figur 1: Visualisering av overberg Illustrasjon av A.N	3
Figur 2: Begrepsforklaring av tunnelprofiler (Statens vegvesen, 2018).....	4
Figur 3: Bilde fra tunnel med eksempel på utfall	5
Figur 4: Scanning av profil	5
Figur 5: Visualisering av utfall i Skarvbergtunnelen hentet fra datagrunnlaget i oppgaven	5
Figur 6: Bruk av Q-systemet (NGI, 2015).....	7
Figur 7: Sprekkerose med strøk og fall påhuggsområdet ved musskjerneset (SWECO, 2021) ...	10
Figur 8: Stereografisk projeksjon påhuggsområdet ved musskjerneset (SWECO, 2021).	10
Figur 9: Sprekkerose med Strøk og fall påhuggsområdet ved kroka (SWECO, 2021).	11
Figur 10: Stereografisk projeksjon påhuggsområdet ved kroka (SWECO, 2021).	11
Figur 11: Effekt av driveretning i forhold til Strøk og fall (Sciencedirect, 2001)	12
Figur 12: Sprekkeorientering (Skretting, 2021).....	12
Figur 13: Svakhetssoner kartlagt ut fra topografiske strukturer og terrengmodeller (SWECO, 2021).	14
Figur 14: Stikning og ansett for kontur med amv tunnelrigg for illustrasjon (AMV, 2022)	18
Figur 15: Tunnelprofil med geometriske mål. Illustrasjon: A.N	19
Figur 16: Videre beregning av buelengde. illustrasjon: A.N	20
Figur 17: Boreplan fra bever team	21
Figur 18: Visualisering av MWD-teknologi (Jakobsen & Oosterhout, 2018).....	24
Figur 19: Borelogg fra bever team, pel 4678,900 og scanning av pel 4679	25
Figur 20: Tunnelprofil T9,5 (SWECO, 2021).	26
Figur 21: Tunnelprofil T9,5 for toløpstunnel (Statens Vegvesen, 2021a).	27
Figur 22: Tunnelprofil (Statens Vegvesen, 2021b).....	27
Figur 23: Tversnittdata (geometriske mål) for ulike tunnelprofilene (Statens Vegvesen, 2021b).	28
Figur 24: Geometriske mål for T9,5-14 (Statens Vegvesen, 2021b).....	28
Figur 25: Sprengningsprofil fra bever team.....	30
Figur 26: Sammenhengen mellom bergmasseklasser (Q-systemet) og sikringsklasser (Statens Vegvesen, 2021c).....	37
Figur 27: Eksempel på bruk av forbolter i kombinasjon med sprøytebetongribber og sålestøp (eksempel fra Bjorøytunnelen) (NFF, 2008)	38
Figur 28: Eksempler på ulike typer avvik fra ideell kontur (NFF, 2012).	39
Figur 29: Tunnelrigg i kroatunnelen under boring av kontur med antydte teoretisk sprengningsprofil, i forgrunnen kan vi skimte laserskanneren. bilde og illustrasjon: A.N	44
Figur 30: Utklipp av plott for Q-verdier og overberg med regresjonslinje. utklipp fra RStudio..	48
Figur 31: Utklipp av plott for Q-verdi og utfall med regresjonslinje fra Rstudio.....	50

Figur 32: Gjennomsnittlig Q-verdi utfall for profiler uten spiling Skarvberg tunnelen	52
Figur 33: Gjennomsnittlig q-verdi og utfall for profiler med spiling Skarvberg tunnelen	52
Figur 34: Gjennomsnittlig overberg for kroatunnelen.	53
Figur 35: Pris for boring, lading og lasting (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006).....	54
Figur 36: Pris for transport (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006).....	54
Figur 37: Sammenheng mellom utfall og profilnummer i Skarvberg tunnelen.....	57
Figur 38: Plott av Q-verdi og overberg mot profilnummer	58
Figur 39: Plott av Q-verdi og utfall mot profilnummer	59

Tabelliste

Tabell 1: Sprekkemålinger fra bergskjæringer i nærheten av påhuggsområdet (SWECO, 2021)..	9
Tabell 2 sikringsmengder for Kroatunnelen (SWECO, 2021).....	36
Tabell 3: kostnader for boring, lading, sprenging og transport for planlagt og utført overberg ...	56

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Formålet med oppgaven er å undersøke om det er mulig å finne en sammenheng mellom den geologiske kvaliteten på bergmassen (Q-verdi) ved tunneldrift og mengden med overberg, inkludert utfall. Overmassen sammenlignet med Q-verdi kan dermed potensielt si noe om hvor godt det utførte sprengningsprofilen er hensyntatt geologien. Og slik kunne brukes av entreprenører og andre aktører som en motivasjon til å minimere mengden av fjell som tas ut i fremtidige prosjekter og gi positive ringvirkninger, både for miljøet og økonomien i prosjektene.

I oppgaven vil det bli brukt data fra to av Skanskas tunnelprosjekter. Det ene tunnelprosjektet er lokalisert ved Maurangerfjorden som er en sidefjord til Hardangerfjorden i Vestland fylkeskommune. Dette prosjektet består av en rassikringstunnel som skal etableres mellom Musskjerneset og Kroka i Kvinnherad kommune i forbindelse med utbedring av eksisterende fylkesvei 500. Kontrakten som omfatter strekningen fra Folgefonntunnelen til Årsnes er tildelt Vassbakk & Stol AS som er et heleid datterselskap av Skanska Norge AS. Selve tunneldriften er det Skanska Norge AS som står for, og fungerer som underentreprenør på dette prosjektet. Tunnelen vil i oppgaven bli omtalt som Kroatunnelen jamført den geologiske rapporten (SWECO, 2021). Det andre prosjektet er Skarvberg tunnelen på E69 i Finnmark. Data fra dette prosjektet benyttes utelukkende for undersøkelser knyttet til utfall og spiling. Gjennomgående i oppgaven er hovedfokus på førstnevnte prosjekt. Sistnevnte prosjekt ble tatt inn for å gi et noe større datagrunnlag for analyse.

Datainnsamling skal i hovedsak gjøres av entreprenøren. Prosjektgruppa skal ved prosjektbesøk se nærmere på hvilke parametere som er nødvendige for å få et godt resultat og kvalitetssikre måten dataene hentes ut.

1.2 Avgrensning av oppgaven

For å få mest mulig sammenlignbare tall har prosjektgruppa kommet frem til at det kun skal brukes data fra de parsellene hvor tunnelen er dimensjonert etter normalprofilen, ser altså bort fra nisjer og eventuelle tilpasninger av sprengningsprofilen gjennom svakhetssoner. Det kommer også til å bli skilt på data fra der det er brukt forbolting og ikke, grunnet at dette stabiliserer bergmassen og stabiliteten etter forbolting ikke vil være representativ for den gjeldende Q-verdien.

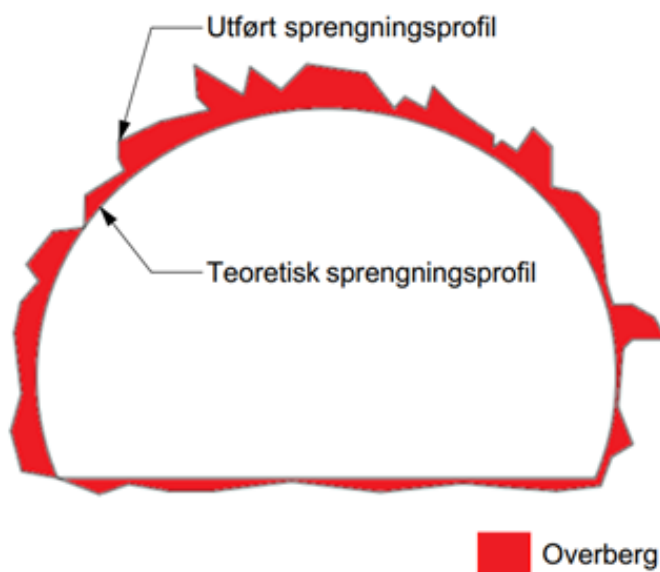
1.3 Hypotese

Hypotesen for undersøkelsene er at det vil være en negativ korrelasjon mellom parameteren Q-verdi og parameterne for overberg og utfall. Dette vil si at dersom det er en lav Q-verdi opptrer denne sammen med høy verdi for overberg. Eller motsatt at lave verdier for overberg opptrer sammen med høye verdier for Q-verdi. Det samme gjelder for utfall. Ved lave Q-verdier forventes mye utfall og motsatt. Når det gjelder effekten av forspiling, forventes det å redusere mengden av utfall dersom Q-verdien er den samme eller tilnærmet lik.

2 Teoretisk grunnlag

2.1 Overberg

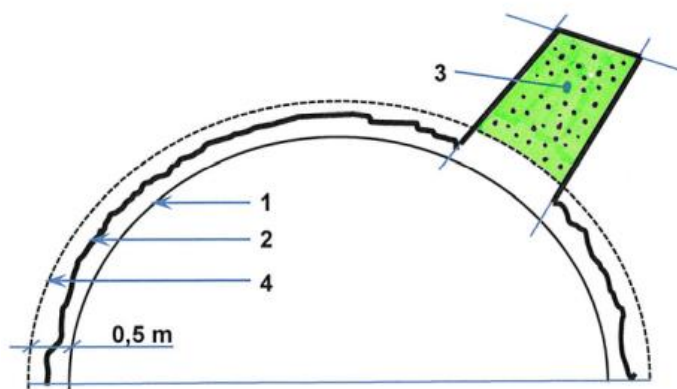
Overberg er definert som «Masser utenfor prosjektert sprengningsprofil.» (Statens Vegvesen, 2021c, p. Ordliste) Overberg er bergmasse som i utgangspunktet ikke direkte er nødvendig å ta ut for å få tilstrekkelig plass til å anlegge en tunnel med sikring. Av praktisk årsaker vil det ved konvensjonell drift, ikke være mulig å drive en tunnel uten en viss mengde overberg. Dette er knyttet opp mot mange faktorer slik som blant annet geologiske forhold, lading av borehull, stikning, ansett i forhold til teoretisk profil og nøyaktighet ved boring. Anslagsvis 90 prosent av overberg skyldes boring mens 10 prosent kommer av bergmassens stabilitet. (Jacobsen, 2021). «Tallene med 90-10% fordeling er konklusjonen på Yangkyun Kims doktorgrad. Han brukte ikke overberg som parameter på kontur, men Tunnel Contour Index (TCI).» Er svaret fra tidligere foreleser ved NTNU og nå seniorrådgiver innenfor miljø og ingeniørgeologi hos NGI Pål Drevland Jacobsen på hvor tallene er hentet fra. Overberg vil i oppgaven bli benevnt enten som kubikkmeter for en tunnelstrekning eller i kvadratmeter for tunnelprofiler.



FIGUR 1: VISUALISERING AV OVERBERG ILUSTRASJON AV A.N

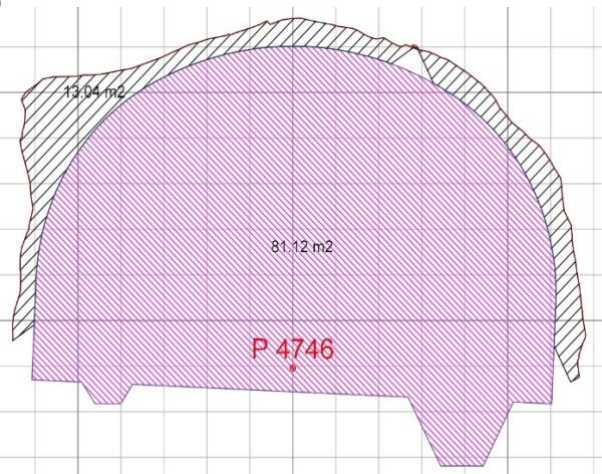
2.2 Utfall

Utfall inngår som en del av overberget og sett i et geologisk perspektiv dreier det seg om at man får blokker som faller ut og et ujevnt profil der man ikke ser borripene i konturen etter sprengning. Utfall skyldes i hovedsak geologiske forhold som ugunstige sprekkeretninger og lignende kombinert med skadesone forårsaket av sprenging av tunnelsalven og da spesielt konturen. Redusert og riktig ladning av konturen ved hjelp av slangetrekk eller patronert sprengstoff er derfor nødvendig for å hindre unødig utfall. Utfall med tilhørende begrepsforklaringer er presentert og forklart i figur 2. Benevnelser for utfall i prosjektoppgaven er de samme som for overberg.



FIGUR 2: BEGREPSFORKLARING AV TUNNELPROFILER (STATENS VEGVESEN, 2018).

1. Teoretisk sprengningsprofil (prosjektert kontur) i vegger og heng
2. Utført kontur
3. Geologisk betinget utfall utover 0,5 m fra teoretisk sprengningsprofil.

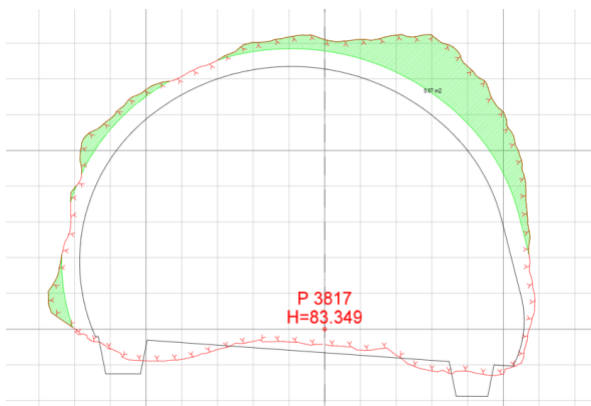


FIGUR 3: BILDE FRA TUNNEL MED EKSEMPEL PÅ UTFALL

FIGUR 4: SCANNING AV PROFIL

På figur 3 sees et tydelig eksempel på utfall fra Krokotunnelen. På figur 4 vises skanning for profilet omtrent der det avbildede utfallet befinner seg. Kontraktsmessig vil entreprenøren som hovedregel kun få betalt for de prosjekterte faste massene i tunneldriving. Dersom det sannsynliggjøres at utfallet skyldes geologiske forhold kan entreprenør få godtgjørelse for utfall utenfor 50 cm fra det prosjekterte sprengningsprofilen slik som vist på figur 2. (Statens vegvesen, 2018)

På figur 5 vises det et eksempel på en beregning av utfall gjort for Skarvbergtunnelen som er et tidligere tunnelprosjekt hos Skanska med relativt mye utfall og dårlig stabilitet. Utfallet som entreprenør får godtgjørelse for er markert i grønt.



FIGUR 5: VISUALISERING AV UTFALL I SKARVBERGTUNNELEN HENTET FRA DATAGRUNNLAGET I OPPGAVEN

2.3 Geologi

2.3.1 Bruk av Q-systemet

Q-systemet er det mest brukte klassifikasjonssystemet for bergmasse i Norge og brukes både i tunnel-, bergromsprosjekter og for fjellskjæringer. Q-systemet er et empirisk system som er basert på en database på omtrent 2100 tunnel- og bergromsprosjekter. Utviklingen er gjort av NGI og ble introdusert i 1974. Etter hvert har systemet blitt oppdatert med tanke på bergmasseklassifisering og sikringsanbefalinger (NGI, 2015).

For å kunne bruke Q-systemet er vi avhengige av å bestemme en Q-verdi som bestemmes ut fra følgende ligning:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Faktorene i ligningen representeres av:

- RQD = *Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)*
- J_n = *Antall sprekkesett (Number of joint sets)*
- J_r = *Sprekkeruhetstall (Roughness of the most unfavourable joint or discontinuity)*
- J_a = *Tall for sprekkefyll (Degree of alteration or filling along the weakest joint)*
- J_w = *Sprekevannstall (Water inflow)*
- SRF = *Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)*

For å gjøre Q-verdien noe mer forståelig er det nyttig å sette opp betegnelsen på hva de ulike brøkene som inngår i formelen står for. (NGI, 2015)

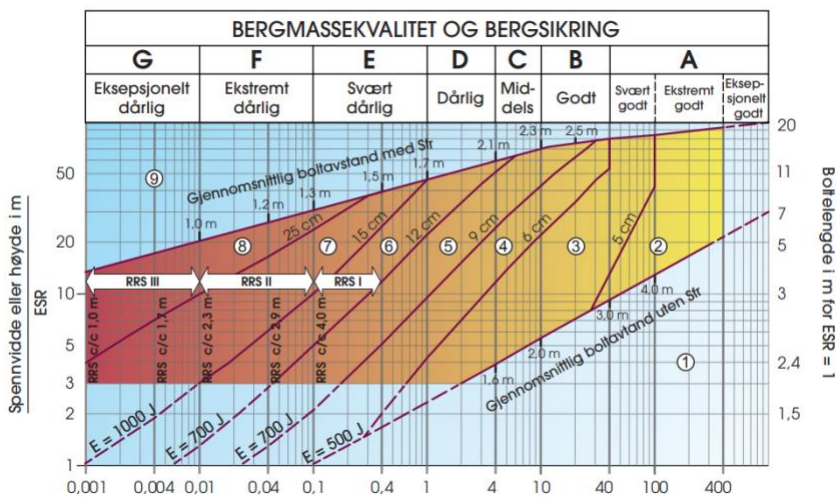
$$\frac{RQD}{J_n} = \text{Blokkstørrelse}$$

$$\frac{J_r}{J_a} = \text{Bergmassens minimale skjærfasthet/friksjon}$$

$$\frac{J_w}{SRF} = \text{Opptredende spenning}$$

Q-verdien settes under tunneldriving fortløpende for hver salve for å bestemme hvilken sikring som skal etableres basert på sikringsklasse. Når Q-verdien kartlegges underveis vil det være god tilgang på bergmassen som skal vurderes, og de ulike parameterne kan fastsettes med mye større sikkerhet enn det som er mulig å gjøre ved forundersøkelser. Normalt skjer kartlegging sett i forhold til syklusen for tunneldrivingen etter lasting og før boring. Kartleggingen kan gjerne skje i forbindelse med rensk, da piggemaskinen vil sørge for at det er god belysning på stoff samtidig som responsen fra selve piggingen kan tolkes med tanke på bergmassens reaksjon. Dette kan dreie seg om mye gnister, lite gnister mellom hammer og berg, eller hvor lett biter av berget løsner ved pigging. (Haga, 2022)

I tillegg til Q-verdien er det nødvendig å beregne verdien for spennvidden eller høyden av bergrommet målt i meter dividert på ESR (Excavation Support Ratio) for å bestemme sikring. ESR bestemmes ut fra hvilken type underjordsanlegg som skal etableres og settes som hovedregel til 1,0 for veitunneler slik som i denne oppgaven. Grunnen til at det her er enten spennvidde eller høyde er at det kan være en sikring på vederlag og heng, og en annen sikring for vegger. Når det skal bestemmes sikring for vegg brukes høyden på veggen, mens spennvidden brukes for å bestemme sikring i heng og vederlag. Når disse faktorene er beregnet kan man gå inn i sikringsdiagrammet og lese av hvilken sikring som anbefales basert på erfaringstall fra databasen. (NGI, 2015)



FIGUR 6: BRUK AV Q-SYSTEMET (NGI, 2015)

Bruk av klassifiseringssystemer slik som Q-systemet krever erfaring, og at man bygger seg opp en referansebank for å bestemme de ulike parameterne som inngår på riktig måte. Det kan ta flere år å bli god på dette, da små utslag i en eller flere parametere vil kunne ha stor innvirkning på den beregnede Q-verdien. I denne oppgaven kommer data for Q-verdi til å bestemmes av ingeniørgeolog Torbjørn Sletten Haga som er ansatt i Skanska og har en master i geologi ved Universitetet i Bergen med påfølgende to års erfaring som geolog på ulike tunnelprosjekter. (Haga, 2022)

2.3.2 Sikring

Q-systemet omfatter også en anbefaling for permanent sikring ut fra hvilken sikringskategori diagrammet gir, men for vegtunneler i Norge brukes i hovedsak sikringsanbefalingene fra N500 som har noe strengere krav til sikring, men også her brukes sikringskategoriene fra Q-systemet. Dette gjelder spesielt med tanke på sprøytebetong som stort sett brukes uansett sikringsklasse. Ulike typer sikring vill bli spesifisert nærmere under kapittel 2.8.

2.3.3 Tunnelgeologi

Den geologiske rapporten for Kroatunnelen ble bygget på tidligere utarbeidet rapport fra Statens vegvesen. Ved utarbeidelse av rapporten er det lagt til grunn kravene for Håndbok N500 Vegtunneler. Tunneler i Norge skal bygges og kontrolleres etter kravene fra Eurokode 7. Berggrunnen i kartleggingsområdet er migmatitt, granittisk gneis og amfibolitt med rester av overflatebergarter (SWECO, 2021). Ifølge geolog Haga Sletten er det i Kroatunnelen hovedsakelig båndgneis, som kan sees langs skjæringer som en båndstruktur med lyse og mørke bånd. (NGU, 2015) Det er en metamorf bergart som hovedsakelig er veldig fin å drive tunnel i. Bergarten er hard, massiv og ikke noe spesielt oppsprukket. Bergarten har medium til god sprengbarhet og medium til god borbarhet, noe som i teorien gir mindre overberg og utfall enn om det var dårlig sprengbarhet. Dette medfører mindre behov for sikring og trenger da eksempelvis ikke å legge av mer plass til tung sikring. Slik oppnås mindre forbruk av sprøytebetong, bolter og betongbuer (Haga, 2022). De områdene som er mest kompliserte og

kritiske ved driving av Krokatunnelen er antakelig påhuggsområdene med forholdsvis høye forskjæringer med omkring 30 meter, men også passeringen under et parti ved profil 5880-5900 hvor bergoverdekningen er ned mot ni meter (SWECO, 2021).

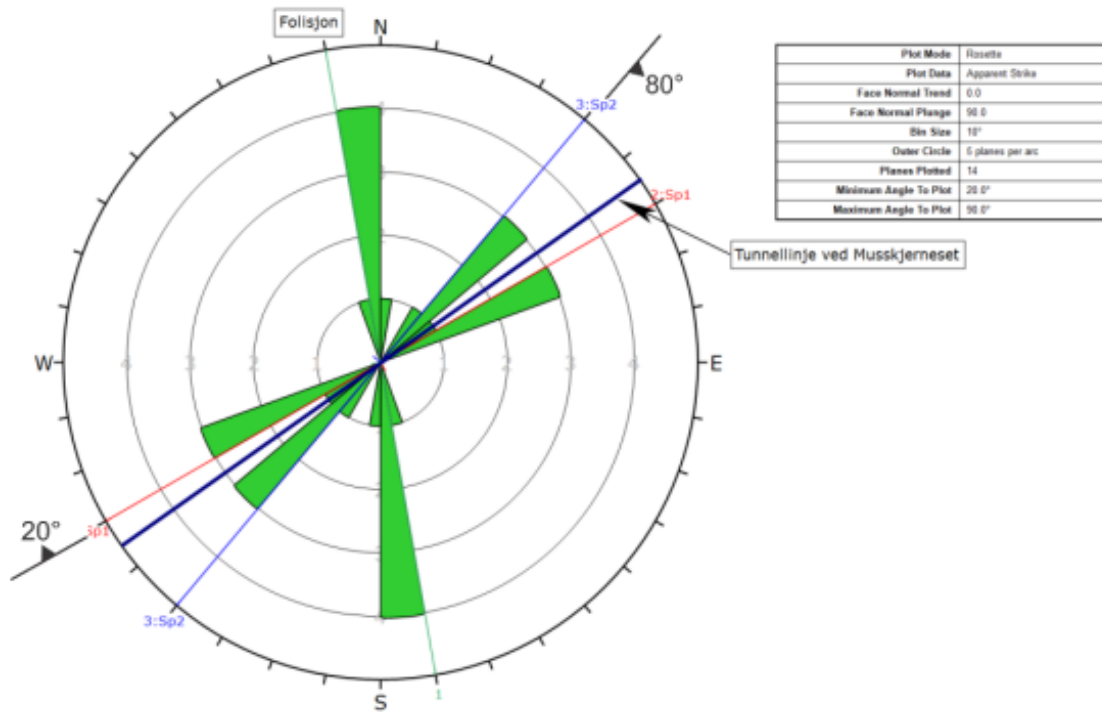
Når det gjelder geologi er det som gir størst påvirkning på om det oppstår utfall hovedsakelig fjellet, orientering av sprekkeseett, frekvensen av hvor mang sprekker og hvor oppsprukket det er. Er det fjell uten sprekker (som er veldig sjelden), og med perfekt boring skal man i teorien ikke få noe utfall (Haga, 2022).

2.3.4 Oppsprekking

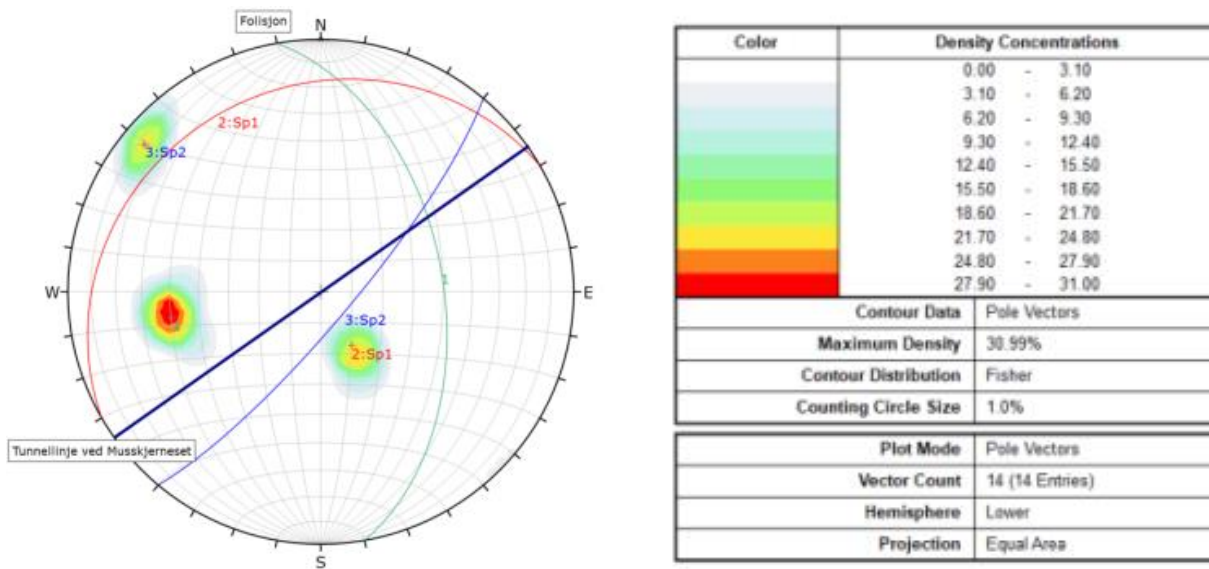
Samtidig som det ble skrevet geologisk rapport for reguleringsplanen, ble det for gjennomført kartlegging og sprekkemålinger langs tunneltraseen. Bergmassen framstår som kompakt og med lite sprekker. I de målte orienteringene av hovedsprekkesettet ved to av de påhuggsområdene er det liten variasjon. Hovedsprekkesettet måles til å ha et fall på 50-60° mot ØNØ som blir vist i tabell 1. Det er observert to andre betydelige sprekkeseett ved de to påhuggene som har glatt og bølgete sprekkflate, men de har forholdsvis stor avstand. Figur 7 og 9 viser sprekkeroser fra de to stedene (SWECO, 2021). Stabilitet i tunneler er avhengig av sprekkeparametere som ruhet, utholdenhet, orientering (strøk og fall), sprekkeavstand og innhold av sleppemateriale. (Nilsen, 2016).

TABELL 1: SPREKKEMÅLINGER FRA BERGSKJÆRINGER I NÆRHETEN AV PÅHUGGSOMRÅDET (SWECO, 2021).

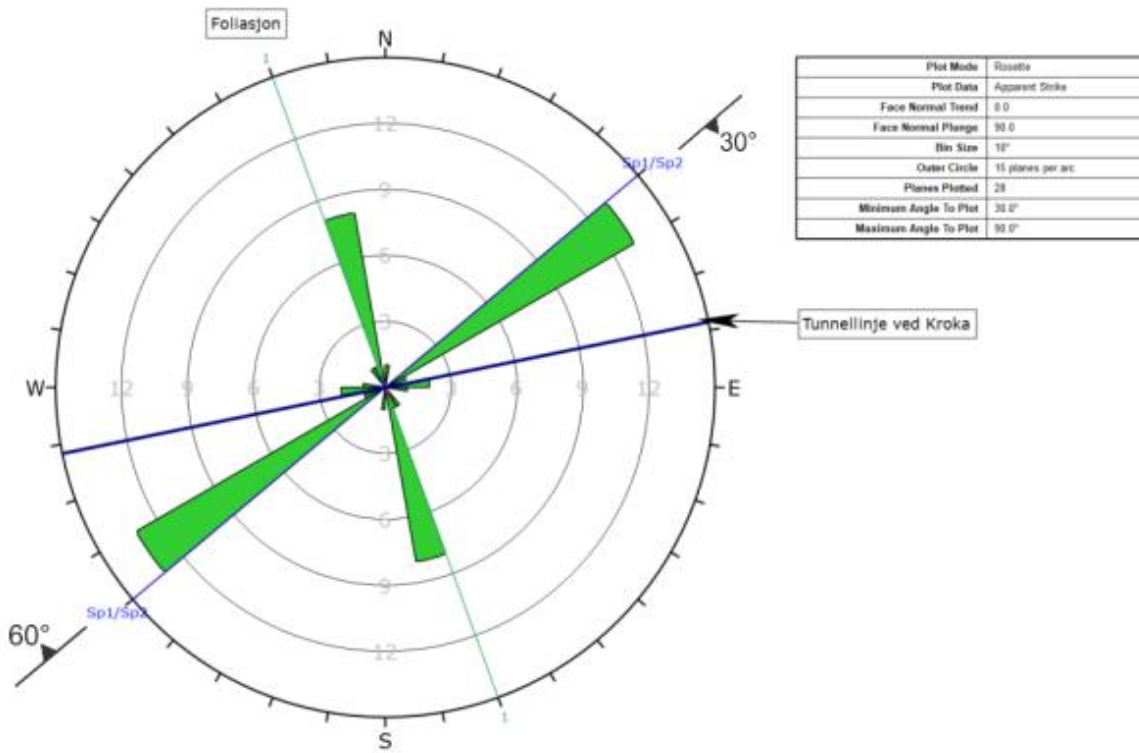
Lokalitet	Sprekkesett	Orientering (strøk/fall)	Sprekkeavstand	Sprekkeruhet
Musskjerneset	Foliasjon	350/50°	0,5-0,7 m	Glatt/bølgete
Musskjerneset	Sprekkesett 1	240/20°	0,8-0,9 m	Glatt/bølgete
Musskjerneset	Sprekkesett 2	040/80°	1-2 m	Glatt/bølgete
Kroka	Foliasjon	340/60°	0,3-0,5 m	Glatt/bølgete
Kroka	Sprekkesett 1	230/60°	0,8-1 m	Glatt/bølgete
Kroka	Sprekkesett 2	050/30°	1-2 m	Glatt/bølgete



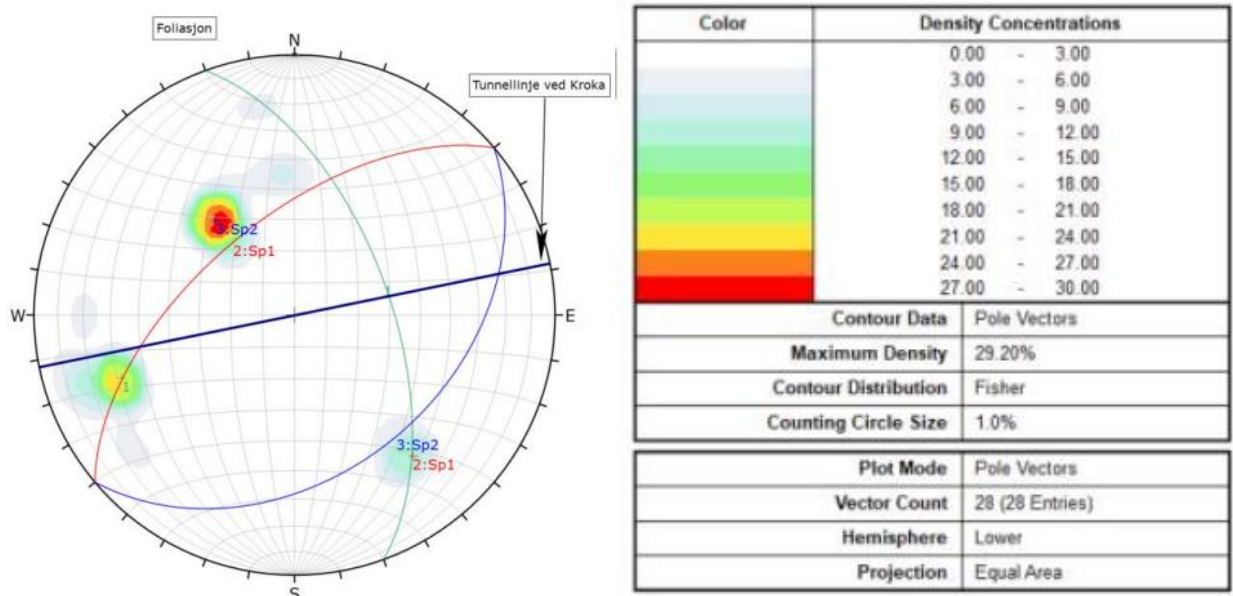
FIGUR 7: SPREKKEROSE MED STRØK OG FALL PÅHUGGSOMRÅDET VED MUSSKJERNESET (SWECO, 2021)



FIGUR 8: STEREOGRAFISK PROJEKSJON PÅHUGGSOMRÅDET VED MUSSKJERNESET (SWECO, 2021).



FIGUR 9: SPREKKEROSE MED STRØK OG FALL PÅHUGGSOMRÅDET VED KROKA (SWECO, 2021).



FIGUR 10: STEREOGRAFISK PROJEKSJON PÅHUGGSOMRÅDET VED KROKA (SWECO, 2021).

Det som vil være avgjørende om utfall vil kunne forekomme er retningen og friksjonsforholdene langs sprekker og sletter. Friksjonsforholdene vil være mest avhengig av ruheten og eventuelt sleppemateriale. Kloritt, leirmineraler og grafitt vil være de mest ugunstige sleppematerialene.

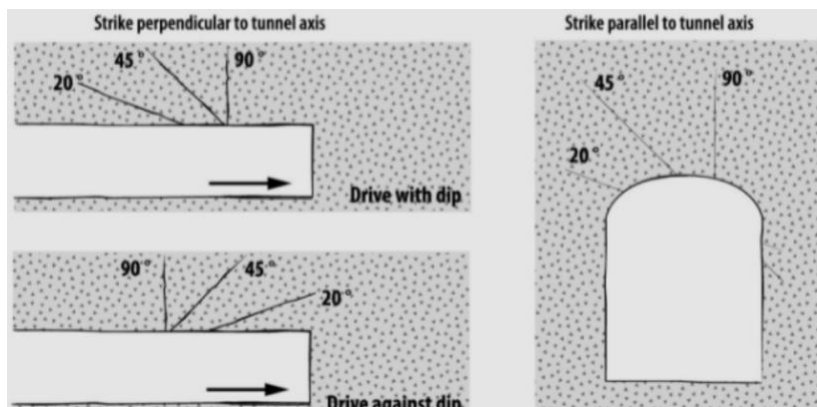
Ved svakhetssoner som tidligere har blitt utsatt for skjærbevegelse finner vi skjærbruddsoner. De representerer ofte en spesiell fare for stabiliteten, da de har liten ruhet på grunn av de tidligere bevegelsene og dermed får liten skjærfasthet (Nilsen, 2016).

2.3.5 Sprekkes orientering

Orientering av sprekkesett i forhold til tunnelaksen er en geologisk parameter som ikke inkluderes i Q-systemet, men vil kunne ha en stor betydning for mengden av utfall. Orientering av sprekkesett inkluderes derimot i RMR-systemet, men dette brukes ikke i særlig grad i norsk tunneldrift. (Nilsen, 2016)

B. Tunneling						
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis		Irrespective of strike
Drive with dip		Drive against dip		Dip	Dip	
Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip
45°–90°	20°–45°	45°–90°	20°–45°	45°–90°	20°–45°	0°–20°
Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very unfavorable	Fair	Fair

FIGUR 11: EFFEKT AV DRIVERETNING I FORHOLD TIL STRØK OG FALL (SCIENCEDIRECT, 2001)

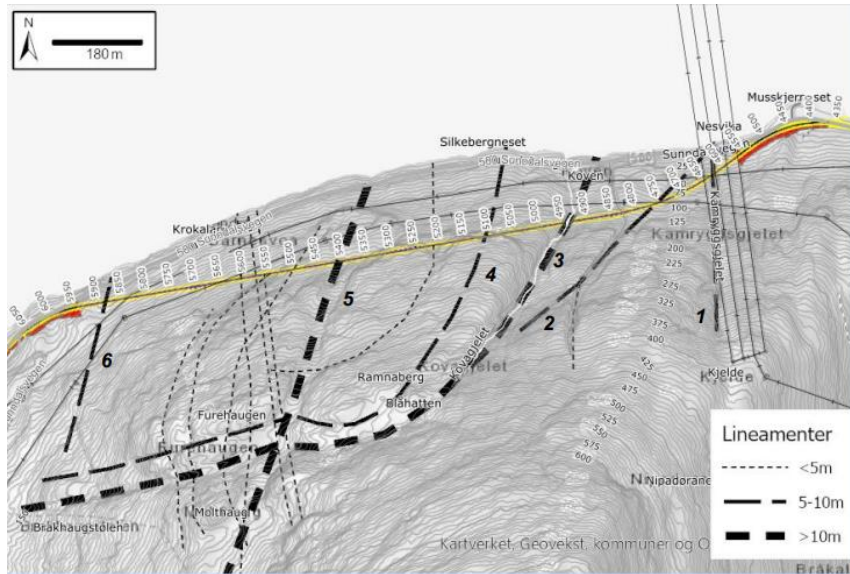


FIGUR 12: SPREKKEORIENTERING (SKRETTING, 2021)

På figur 12 vises det hvordan ulike retninger på strøk og fall vil spille inn i forhold til akse og retning på drivingen av tunneler. Det er svært gunstig å drive med retningen på fallet, slik som vist i figur 11. I RMR- systemet vil denne faktoren inngå i systemet som gir den totale poengscoren til slutt. Denne parameteren kommer ikke til å bli beregnet i oppgaven, men vil inngå som en usikkerhet i oppgaven.

2.3.6 Svakhetssoner

Tykkelsen på en svakhetsone kan variere fra noen centimeter til flere hundre meter. Fra feltundersøkelser i terrenget over tunnelen og ved bruk av kartdataverktøy har geologene funnet til sammen 13 stykker. Svakhetssonene er delt i tre grupper, basert på lineamentets bredde på overflaten. Seks av de 13 svakhetssonene er tydelig i tunnelens trase. To lineament (nr. 3 og 5) er vurdert i den mest markante klassen, større enn ti meter. Fire av lineamentene er klassifisert å være mellom fem og ti meter, de mindre tydelige svakhetssonene (nr. 1, 2, 4 og 6) er tegnet med tynn strek. Svakhetsone nummer syv vurderes å tilhøre den mindre markante klassen, mindre enn fem meter. De tydeligste svakhetssonene har orientering NV-SØ. Tunnelen har orientering ØN-VS som betyr at tunnelen vil krysse tilnærmet vinkelrett på noen av svakhetssonene. (SWECO, 2021). De to gruppene som er tydeligst markert, er de som angivelig har størst innvirkning på forholdene i tunnelen. Disse er nummerert og ligger presentert i figur 13. Betydningen av svakhetssoner under tunneldriving er at de normalt forekommer langs 1 til 15 prosent av total tunnellengde. Svakhetssoner er viktige å ta hensyn til under tunneldriving i berg. Dette kan være avgjørende for en sikker gjennomføring av prosjekter. Svakhetssoner er soner der bergmassen er betydelig dårligere enn omkringliggende bergmasse. (Sabri, 2021) Dersom det påtreffes svakhetssoner under drivingen ventes det å gi store utslag med tanke på utfall eller at det vil bli betydelige tilpasninger i forhold til normalprofil ved bruk av tung sikring.



FIGUR 13: SVAKHETSSONER KARTLAGT UT FRA TOPOGRAFISKE STRUKTURER OG TERRENGMODELLER (SWECO, 2021).

Ifølge geolog Torbjørn Haga Sletten skal man i utgangspunktet følge en bestemt fremgangsmåte ved passering av svakhetssoner, men denne kan være vanskelig å følge helt etter planen. Det er viktig å være oppmerksom under driving når det mistenkes at en svakhetszone nærmer seg. Spesielt er det viktig å legge merke til om det oppstår endringer i fjellet. Det kan legges merke til ved boring og endringer i bergmassens oppførsel. (Haga, 2022) Det antas at målinger av overberg og utfall for svakhetssoner vil kunne gi såpass store utslag at det ikke vil danne et representativt utvalg for undersøkelsene i oppgaven. Antas at det her vil etableres forspiling slik at dataene allikevel ikke vil være grunnlag for undersøkelse av sammenheng.

2.4 Arbeidsoperasjoner som kan ha innvirkning på resultatet av undersøkelsen

For undersøkelsene i oppgaven er det en lang rekke variabler som kan virke inn som forstyrrende elementer. I dette avsnittet vil noen av disse bli nevnt. I forhold til overberg, vil antageligvis unøyaktighet ved boring gi størst innvirkning på resultatet og med stor sannsynlighet være en

betydelig feilkilde. Det kan antas at mengden overberg per salve kan variere som følge av hvilket skift som boret og ladet. Det kan også forventes svingninger i mengden overberg for ulike parseller, selv om Q-verdien skulle være den samme. Felles for alle disse feilmarginene er at det forventes at de vil utjevnes ved et stort nok utvalg målt i lengdemeter tunnel. Ideelt sett burde det inkluderes data fra flere tunnelprosjekter.

2.4.1 Bruk av tenningsystem

NONEL LP-systemet er tenningsystemet som hovedsakelig brukes i tunneldrift. Det er det mest brukte ikke-elektriske tennmiddelet som brukes i dag. Sammenlignet med elektroniske system er det billig og gir tilstrekkelig forsinkertid mellom sprengningsintervallene, slik at fjellet blir sprengt ut og man oppnår en god røys. Initiating av NONEL skjer momentant, men tennene har egen individuell forsinkelse med ulike intervallnumre. Ved bruk kobles NONEL-slangene sammen i bunter på maks 20 stykk og bindes til en detonerende lunte som antennes. (Olsen, 2002b)

Elektroniske tennere er ikke like mye brukt i tunneldrift, mest på grunn av høy kostnad og et mer komplisert system kontra ikke-elektroniske tennere. En elektronisk tenner er ulik en NONEL-tenner ved at den har en mikroprosessor istedenfor en pyroteknisk forsinkersats. Det gjør den mer enn 100 ganger mer presis og nøyaktig (NFF, 2019).

Enkelte prosjekter der det er hensiktsmessig å bruke elektroniske tennere, kan være lokasjoner hvor det stilles strenge krav til rystelser eller hvor tunnelmassen skal utnyttes, og det er streng regulering for hvor mye plast tunnelmassen kan inneholde. Kroatunnelen er et prosjekt der det vurderes å benytte elektroniske tennere der tunnelmassene skal brukes til fyllmasse i sjøen. Det er hovedsakelig på grunn av reduksjon av plast i tunnelmassen elektroniske tennere ble vurdert, da NONEL-slangenes plasthylse vil bli gjenværende i røysa etter sprenging.

Elektroniske tennere gir også en bedre sikkerhet under skyting. Det blir mulighet for å gjennomføre avfyring fra et sikkert sted, og det oppnås full kontroll over det øyeblikket skytingen skal foregå. (Sabri, 2019).

For å få minst mulig overberg er det mest hensiktsmessig å bruke elektroniske tennere på grunn av tennernes nøyaktighet. Det påvirker hvor fin konturen blir og minsker risikoen for utfall. Tennernes nøyaktig og fleksibilitet gjør også at tenntidspunktene kan fordeles slik at man får en lavere maksimal svingehastighet (mm/s) for rystelser. Dette kan og bidra til å redusere utfall.

2.4.2 Lademengde

For å få en god kontur og vellykket sprengning vil lademengde ha en betydning. Det finnes flere ulike sprengstoff, det mest brukte i tunnel er emulsjon. Ved lading av konturhull brukes mindre sprengstoff. En tommelfingerregel er at første kontur lades med 25 prosent mengde og andre kontur lades med 50 prosent mengde sett i forhold til fulladede hull ved 48 mm hulldiameter. Ved å lade for lite emulsjon i borehullet kan det skje at røysa ikke kommer ut eller at det ikke blir tilstrekkelig fraksjonering av røysa. Bruk av for mye emulsjon vil være lite økonomisk, både med tanke på at en større eksplosjon gir dårligere kontur, større sjanse for utfall og mer overberg. I tillegg til kostnaden det ekstra forbruket medfører. Orica har utviklet et system som skal redusere risikoen for unøyaktig lading i kontur ved bruk av automatisk slangetrekk. Dette muliggjør strenglading av emulsjon med redusert ladning. Tidligere ble det brukt mye patronerte produkter i ligg og grøft grunnet vannproblemer, men emulsjon har i senere tid fått en mye større vannbestandighet (Orica, 2019).

2.4.3 Spiling/forbolting

Hensikten med forbolting er å i så stor grad som mulig bevare det tilsiktede sprengningsprofilen frem til permanent sikring er etablert. Forbolting kan dermed i all hovedsak betraktes som midlertidig arbeidssikring. Den permanente sikringen som etableres etter dette kan være sprøytebetong, radielle bolter, sprøytebetongbuer og eventuell full utstøping av tverrsnittet (NFF, 2008). Forbolting er det enkelttiltaket som vil ha størst innvirkning på stabiliteten, og dermed også graden av spesielt geologisk betinget utfall (Haga, 2022). Derfor forventes det her å finne noe mindre utfall sett i forhold til Q-verdi enn i partier som ikke er forboltet. Effekten av forbolting kommer til å bli sett nærmere på i oppgaven.

Forbolting utføres ved at kamstålbolter føres inn i bergmassen og forankres med ekspanderende mørtel. Boltene føres inn i berget slik at omtrent én meter av boltens lengde stikker ut og kan benyttes til oppheng i bakkant. Boltene føres inn med en vinkel på mellom 10 og 15 grader i forhold til tunnelaksen, og settes som en tommelfingerregel med en avstand på 0,3 meter (NFF, 2008)

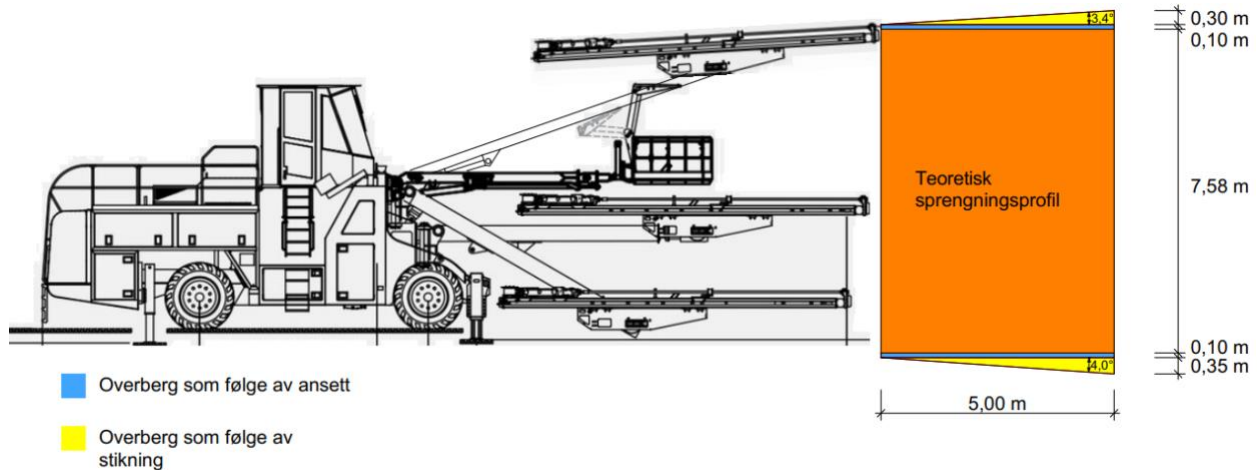
2.4.4 Boring

Boring utføres med tunnelborerigg egnet for tunnelens tverrsnitt. Borehullslengde er om lag fem meter og antall hull varierer ut fra størrelse på tunneltverrsnitt. Boring er den arbeidsoperasjonen som vil være mest krevende å få til nøyaktig og dermed ha størst betydning for konturkvalitet og derfor også overberg. Boringen må tilpasses til prosjektets geologiske lokasjon. Dette skjer ved at man prøver seg frem med ulike boreplaner og borediametere for å se hva som fungerer best, med tanke på kvalitet på gjenstående kontur og røysas befatning etter sprengning. Tilpasningen gjøres i hovedsak gjennom en dialog mellom bas og stikker på prosjektet for å finne en god løsning. Eksempelvis vil det ofte forsøkes å bore med 64 mm krone, da det tar omtrent like lang tid å bore ett hull med 48 mm som med 64 mm, men det kan redusere antall borehull (Steinehaugen, 2022). Reduksjonen i antall hull skyldes at det kan lades mer sprengstoff per hull. Det kan også være aktuelt å bruke borediameter på 56 mm.

2.4.5 Stikning

Stikning er forskjellen mellom avstanden til tunnelens senterlinje ved borehullets start sett i forhold til avstanden til senterlinjen ved borehullets slutt. For Kroatunnelen planlegges det en stikning på 30 cm for konturen, det vil si at boremaskinen ved en salvelengde på fem meter må ansettes mot stuffen med en vinkel på omtrent 3,4 grader sett i forhold til tunnelaksen som vist på figur 14. For liggen planlegges det med en stikning på 35 cm som vil si at boremaskinen må innrettes med en vinkel på omtrent 4,0 grader i forhold til tunnelaksen. Tallene for stikning er hentet fra prosjektets boreplan i Bever team. Stikning er nødvendig for å ha nok plass å jobbe på

ved boring av neste salve og for å få tilstrekkelig plass til å ansette boremaskin med noe justeringsmulighet ved neste salve.



FIGUR 14: STIKNING OG ANSETT FOR KONTUR MED AMV TUNNELRIGG FOR ILLUSTRASJON (AMV, 2022)

2.4.6 Ansett for konturhull

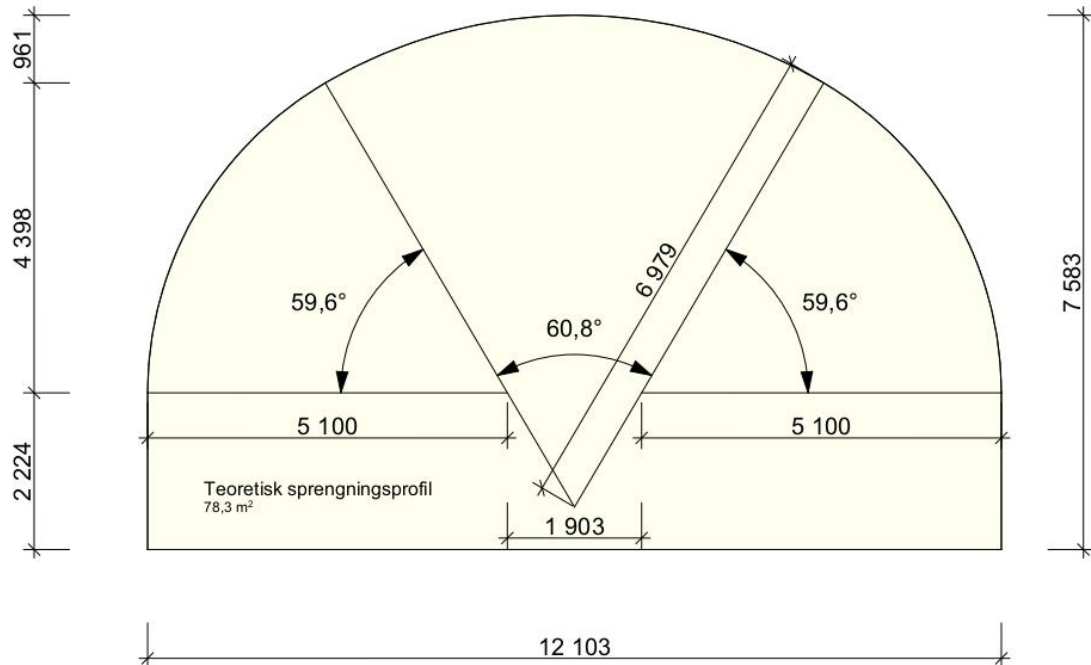
Ansett for konturhullene er viktig med tanke på å oppnå en god kontur og vil ha betydning for mengden overberg. «Konturhull skal ansettes med en nøyaktighet på 100 mm og ikke innenfor prosjektert kontur.» (Statens vegvesen, 2018, p. 99). Planlagt ansett for Krokatunnelen er 100 mm fra det teoretiske sprengningsprofilet. Dette gjør at selv om ansett er helt på grensen til tillatt nøyaktighet vil det allikevel oppnås et godkjent ansett i forhold til Håndbok R761 (Statens vegvesen, 2018).

2.4.7 Planlagt overberg

Siden det for denne oppgaven kun lar seg gjøre å måle overberg for vegg og heng gjøres en egen beregning for planlagt overberg her. For å finne denne må først buelengden for sprengningsprofilet beregnes.

Buelengde:

Vinkelen for sektorene med ulike radier er målt ved hjelp av ArchiCad programvare og vises i figur 15. Inndata for tverrsnittet vil bli vist i senere kapittel for teoretisk sprengningsprofil.



FIGUR 15: TUNNELPROFIL MED GEOMETRISKE MÅL. ILLUSTRASJON: A.N

Buelengde for vegg definert av veggradier:

$$2 \cdot \pi \cdot 5,100 \cdot \frac{59,583^\circ}{360^\circ} = 5,30395 \text{ m}$$

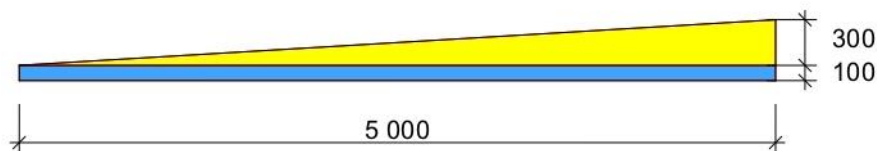
Buelengde for heng definert av hengradie:

$$2 \cdot \pi \cdot 6,979 \text{ m} \cdot \frac{60,834}{360} = 7,40998 \text{ m}$$

Total «buelengde» inkludert horisontale vegger:

$$2 \cdot 2,224 + 2 \cdot 5,30395 + 7,40998 = 22,46588 \approx 22,47 \text{ m}$$

Får en noe forenklet, men god nok beregning ved å anta at hele «buelengden» brettes ut på en flate.



FIGUR 16: VIDERE BEREGNING AV BUELENGDE. ILLUSTRASJON: A.N

Vi kan se for oss at buelengden her står vinkelrett på planet og gjør en beregning ut fra dette. Gult representerer planlagt overberg ut fra planlagt stikning og blått representerer planlagt overberg ut fra planlagt ansett.

Planlagt overberg for vegg og heng per salve:

$$22,74 \cdot 5,00 \cdot 0,10 + 22,74 \cdot \frac{5,00 \cdot 0,30}{2} = 28,425 \text{ m}^3 \approx 28,43 \text{ m}^3$$

Per meter tunnel:

$\frac{28,425}{5} = 5,685 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$ eller $5,685 \text{ m}^2$ målt i areal. Denne verdien vil bli brukt senere for å sammenligne med gjennomsnittlig overberg per profilnummer.

Planlagt overberg for ligg per salve med stikning 350 mm og ansett 100 mm fra profillinje:

$$12,103 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} + \left(12,103 \text{ m} \cdot \frac{0,35 \text{ m} \cdot 5 \text{ m}}{2} \right) = 16,64 \text{ m}^3$$

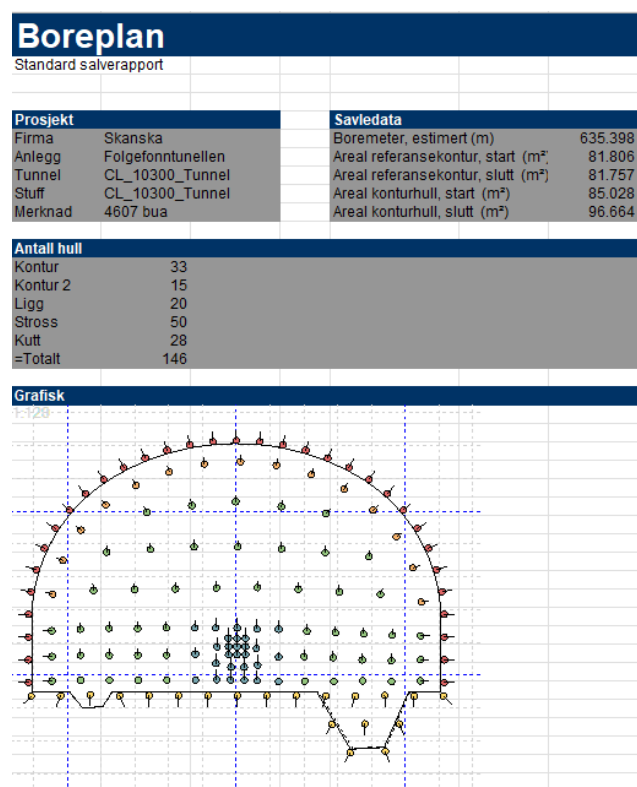
Finner ut fra denne fremgangsmåten totalt planlagt overberg til $28,43 + 16,64 = 45,07 \text{ m}^3$ per salve. Dette gir $\frac{45,07}{5} = 9,01 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$

Når mengden av overberg skal betraktes vil det være hensiktsmessig å se på hvor mye overberg det er planlagt med i forhold til boreplan. På figur 17 kan det sees rapport fra en standard boreplan for normalprofil i Krokotunnelen. Tatt i betraktning en salvelengde på fem meter gir det en total mengde planlagt overberg på:

$$5 \cdot \left(\frac{85,028 + 96,664}{2} \right) - 5 \cdot \left(\frac{81,806 + 81,757}{2} \right) = 45,32 \text{ m}^3$$

Dette gir et gjennomsnittlig planlagt overberg målt i areal på $\frac{45,32 \text{ m}^3}{5 \text{ m}} = 9,06 \text{ m}^2$

Beregningen gjort ut fra data hentet fra Bever team vil gi et noe bedre anslag av den totale mengden overberg sett for hele tverrsnittet siden den også inkluderer grøft selv om dybden av grøfta vil variere med pelnummer.



FIGUR 17: BOREPLAN FRA BEVER TEAM

Grunnen til at det planlegges med en bestemt mengde overberg er fordi det er ønskelig å ha en margin i forhold til avvik ved boring og andre faktorer som er vanskelige å kontrollere. Ved å utvide profilet noe oppnås med større sannsynlighet et godkjent profil, og det unngås å måtte gjøre tilpasninger i form av pigging eller å bore og lade på knøler i forbindelse med neste salve. Dette kan ta mye ekstra tid i motsetning til å oppnå et godkjent profil med en gang. I denne boreplanen er ansett for konturhull satt til 100 mm avstand fra det teoretiske sprengningsprofilet, stikning er satt til 300 mm for konturhullene, 350 mm for ligg, resterende hull har varierende stikning.

2.4.8 Boreavvik

Krav til borenøyaktighet, det vil si avvik fra teoretisk hullretning og endepunkt, er avhengig av hva borehullet skal brukes til. Det er for eksempel ulike krav til borenøyaktighet i tunnel og ute i dagen. For å undersøke årsaker til boreavvik er det en fordel å først dele inn i ulike former for avvik. Grovt sett deles boreavvik inn i utsettingsavvik, ansettavvik, innrettingsavvik, avbøyningsavvik og dybdeavvik. Utsettingsavvik skyldes unøyaktighet av stikker eller måleinstrument. Ansettavvik kan knyttes opp mot unøyaktighet av boreoperatør og borerigg. Innrettingsavvik dreier seg om unøyaktighet av boreoperatør og siktemulighetene på boreutstyret. Avbøyning forårsakes av en kombinasjon av en rekke ulike faktorer som grovt sett deles inn i boreparametere, hullutforming, boreutstyr, geologi og anlegg. (Olsen, 2011).

Dybdeavvik er avvik i forhold til tiltenkt planum for en salve, ved at det enten er boret for langt eller for kort. Dette kan skyldes unøyaktighet av boreoperatør ved at man eksempelvis borer ut hele lengden av siste stang, eller det kan komme som en konsekvens av avbøyning, spesielt ved pallsprenging. Dybdeavvik er generelt sett ikke et stort problem ved tunneldrift sett opp mot de andre avvikene, grunnet relativt kort borelengde, men har en viss betydning for få en stuff som gir et godt ansett for neste salve. Angående krav til boreavvik er det beskrevet en hovedregel som sier at retningsavvik ved ansett og ut til den første boremeteren ikke skal overstige tre prosent (Statens vegvesen, 2018).

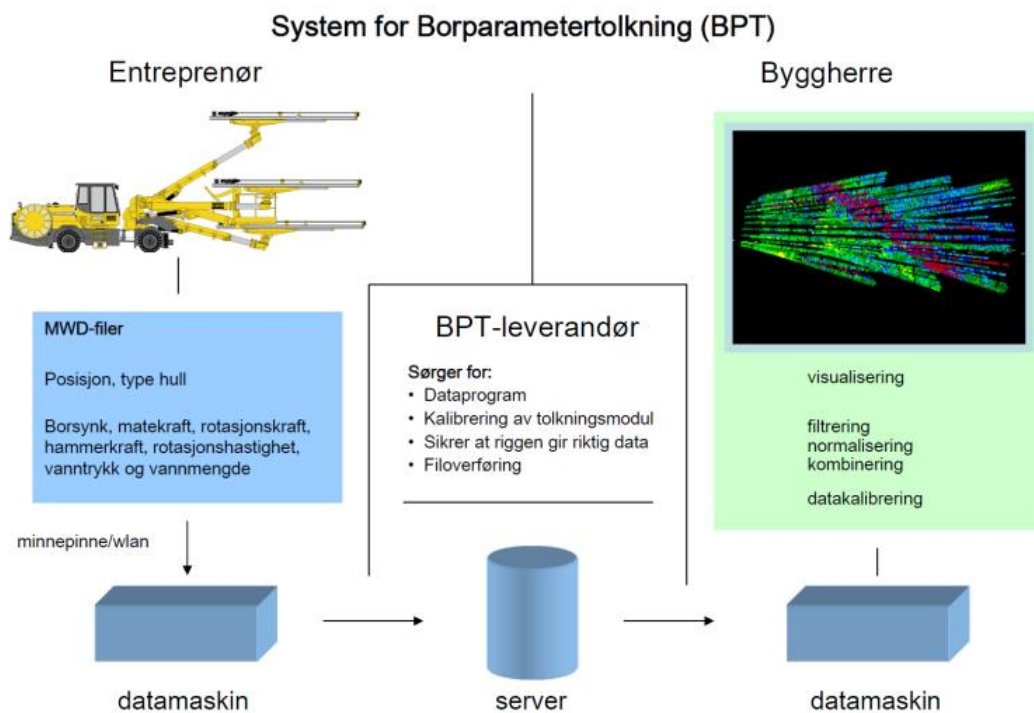
Ved boring av konturen og andre kontur er nøyaktig boring ekstra viktig. I tillegg til nøyaktighet i forhold til ansett, stikning og innretting er det viktig at de to ytterste rastene bores parallelt. (Statens vegvesen, 2018). Konsekvensene av borehullsavvik og unøyaktig boring ved tunneldrift er økt mengde av overmasse, utfall, økning i antall boremeter per kubikk utsprengt masse, økt sprengstofforbruk, økt falltap for tilløpstunneler, dårlig sprengningsresultat, mer rensk og sikring.

2.4.9 Tilpasning utover boreplan

Ofte vil boreoperatør gjøre tilpasninger utover boreplan, dette skyldes lagdelinger i bergmassen som forårsaker avbøyning av borestrengen. Denne avbøyningen gjør at det må kompenseres for stikning og ansett både av konturen og resterende hull. Dette fører til større mengde av overberg. Tendensen er at boreoperatør heller borer en litt for stor kontur enn for liten, for å sikre god fremdrift i tunneldrivingen og unngår å gni boremaskinen langs fjellet (Steinehaugen, 2022)

2.4.10 MWD (Measurement While Drilling)

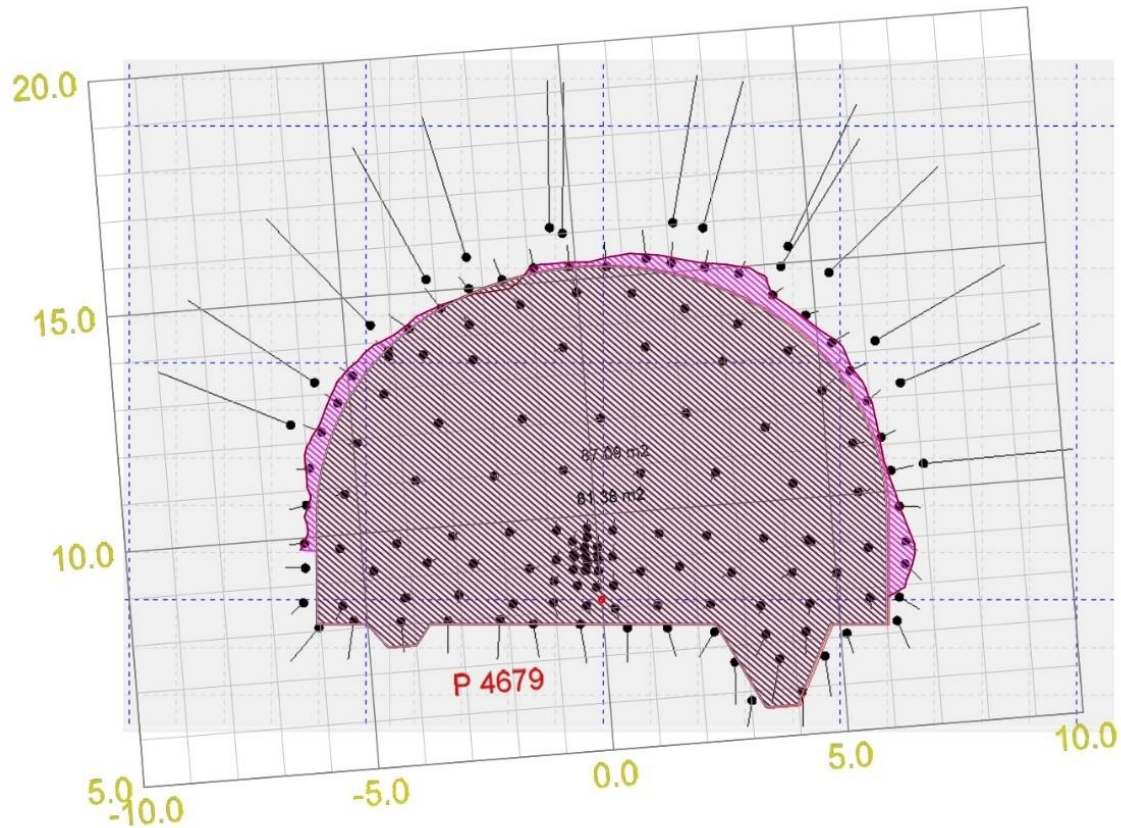
MWD kan oversettes til boreparametertolkning på norsk. Ved boring er det nødvendig med borerigger som har automatisk logging av MWD ettersom byggherre kan kreve slik dokumentasjon. MWD brukes i de fleste tunnelprosjektene som er under driving i Norge. Systemet bruker responsen fra boreprosessen til å tolke hardhet og oppsprekking. Med MWD-teknologi hentes det ut data fra boreoperasjonen mens det utføres boring. Det finnes flere leverandører av boreparametertolkning for tunneldrift, og de mest anvendte er Rockma, Sandvik og Bever Control. Alle hull som bores, logges for ulike parametere. Dette er blant annet borsynk, matetrykk, rotasjonskraft, slagtrykk og vannmengde. I MWD-målinger inngår parametere som er visualisert og vist på figur 18. (Jakobsen & Oosterhout, 2018)



FIGUR 18: VISUALISERING AV MWD-TEKNOLOGI (JAKOBSEN & OOSTERHOUT, 2018).

For veitunneler stilles det krav til MWD-logging. Kravene retter seg blant annet mot logging av hvilken, borerigg, borhammer, borkrone (diameter) som er anvendt og hullenes formål.

En mulig korleksjon for å redusere effekten ulike bore mønstre har på overberg er å se på overberg utenfor den borede konturen ved hjelp av MWD-teknologi. I figur 19 vises et utklipp hvor skanning er kombinert med data fra Bever team og som viser dokumentasjon på borehull både for selve salven, men også borehull for montering av radielle bolter for sikring. Data registreres i boreriggen og visualiseres i programmet Bever team. Hullene for de radielle boltene til sikring kan kjennes igjen ved at de har en mye lengre visualisert stikning sett fra et tversnittsperspektiv. Boltene monteres tilnærmet normalt på tunnelaksen og ut fra rutenettet er det boret anslagsvis mellom tre og fire meter lange hull til disse. Ansett for boltehullene er på boreloggen logget litt utenfor konturen, mest sannsynlig for å unngå overlapp i visningen, mens de i realiteten står i konturen. Dette utsnittet viser hull boret for hele salven og det fremgår derfor ikke av figur 19 hvor i salven boltene er montert, selv om dette er data som er logget i MWD. Når det gjelder konturen kan det tydelig sees av figur 19 sammenheng mellom boret kontur og skannet kontur og dermed også overberg.



FIGUR 19: BORELOGG FRA BEVER TEAM, PEL 4678,900 OG SCANNING AV PEL 4679

2.4.11 Sondering av fjell

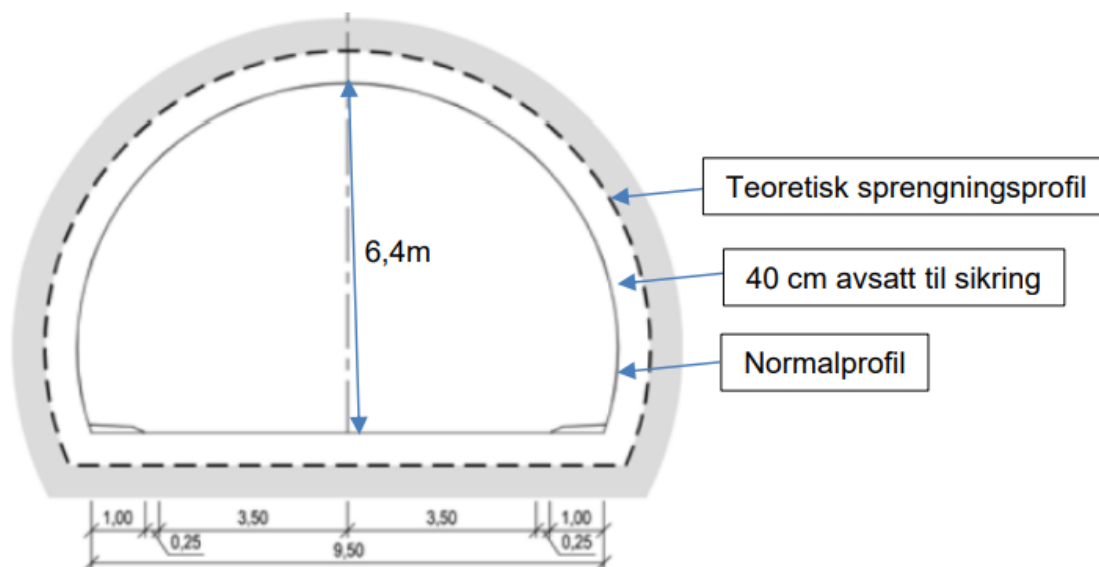
Underveis i tunneldriving kan det være aktuelt å gjennomføre sondering for å undersøke hvilke bergforhold tunnelen forventes å komme inn i. Sondering vil gi et estimat for hvor godt/dårlig fjell man kommer til å møte. Dette gjør det mulig å ta forhåndsregler ut ifra foreliggende opplysninger, som for eksempel å sette spiling der det forventes dårlig fjell. På denne måten vill man kunne forhindre utfall og redusere overberg. (NGU, 2018)

Sonderingen utføres ved slaghammerboring før boring av påfølgende salve for å gi en indikasjon på inndrift, borevansker, spylevannsfarge, vanninnbrudd og registrering av utlekkasje for hvert hull. Sondering kan også gjøres ved kjerneboring. Kjerneboring har lik hensikt som slaghammerboring, men kjernen blir tatt vare på for videre laborietester (Statens vegvesen, 2018).

2.5 Tunnelprofiler

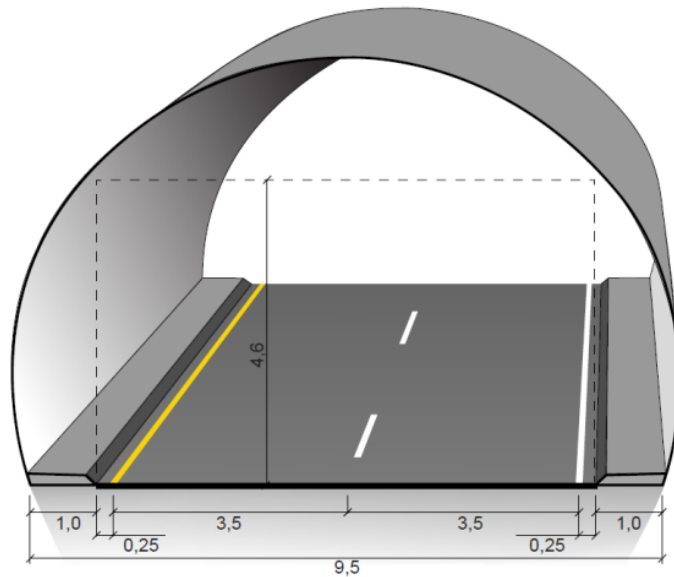
2.5.1 Håndbok N500

N500 er det som danner grunnlaget for hvordan tunnelprosjekter skal utføres og dermed også hvor mye bergmasse som må tas ut ved tunneldrift. Håndbok N500 Vegtunneler viser frem forhold knyttet til planlegging, prosjektering og blant annet krav til utforming og design av tunnelverrsnitt i ulike dimensjoner. Tunnelverrsnittet bestemmes ut ifra tunnelklasse som igjen er basert på trafikkmengde (ÅDT) og tunnellengde. «Tunnelklassen bestemmer kravene til sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning i tunneler med lengde over 500 m. Dette gjelder antall tunnellop, behov for havarinisjer, snunisjer, nødutganger samt sikkerhetsutrustning» (Statens Vegvesen, 2021b, p. 32). Tunnelen utformes med tunnelprofil T9,5 og vegstrekningen i prosjektet er beregnet til en ÅDT på ca. 1500 fram til år 2045, dette er kravene til tunnelklasse B (ÅDT 300-4000, lengde 0,5-10 km). (Statens Vegvesen, 2021b) For tunnelverrsnitt i klasse T9,5 oppnås en totalhøyde på 6,8 m mellom vegbanen og teoretisk sprengningsprofil dersom det settes av 40 cm til sikring som vist på figur 20 (SWECO, 2021).

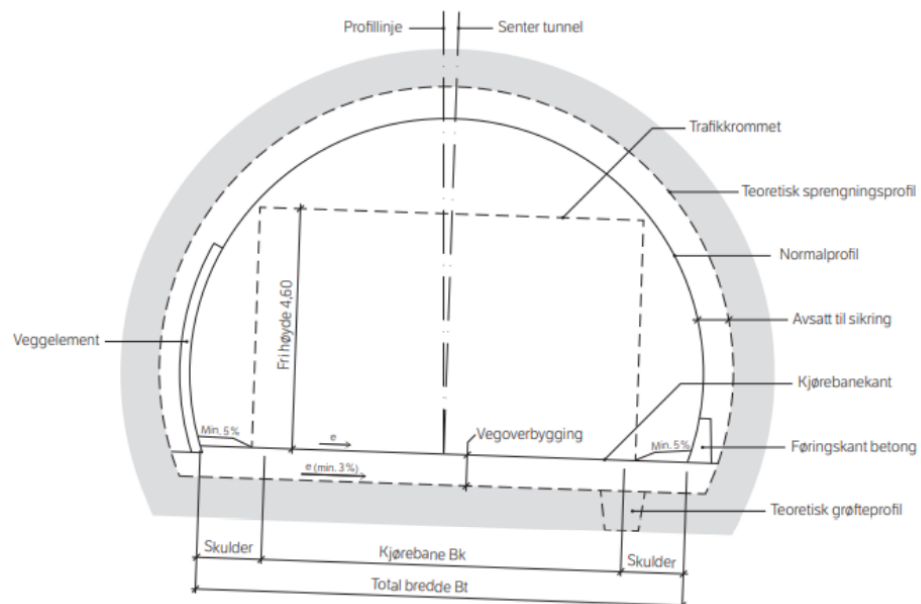


FIGUR 20: TUNNELPROFIL T9,5 (SWECO, 2021).

Figur 22 viser skisse med begrepsforklaring til ulike komponenter og geometriske størrelser som kan inngå i et tunneltverrsnitt. Figur 21 viser bredder for tunneler i klasse T9,5.



FIGUR 21: TUNNELPROFIL T9,5 FOR TOLØPSTUNNEL (STATENS VEGVESEN, 2021A).



FIGUR 22: TUNNELPROFIL (STATENS VEGVESEN, 2021B)

Geometriske mål og arealer er standardisert for ulike tverrsnitts størrelser. De geometriske størrelsene for tverrsnittstypene T9,5 til T14 fremgår av N500 og er presentert i figur 23 og 24.

Tunnelprofil	Teoretisk sprengningsprofil		Normalprofil	
	Areal A_S	Buelengde, B_S	Areal A_N	Buelengde, B_N
	m ²	m	m ²	m
T4	20,32	12,31	13,57	9,85
T5,5	39,10	17,12	29,72	14,55
T8,5	61,92	20,56	49,66	17,99
T11,5	85,92	23,75	70,89	21,18
T7,5	51,56	18,88	40,46	16,30
T9,5	66,62	21,04	53,61	18,46
T10,5	74,59	22,13	60,64	19,55
T12,5	91,32	24,32	75,49	21,73
T13	95,69	24,86	79,39	22,28
T13,5	100,52	25,46	83,73	22,88
T14	104,58	25,96	87,35	23,88

Data avhenger av valgt vegoverbygning og plass avsatt for sikring. I tabellen er følgende lagt til grunn:

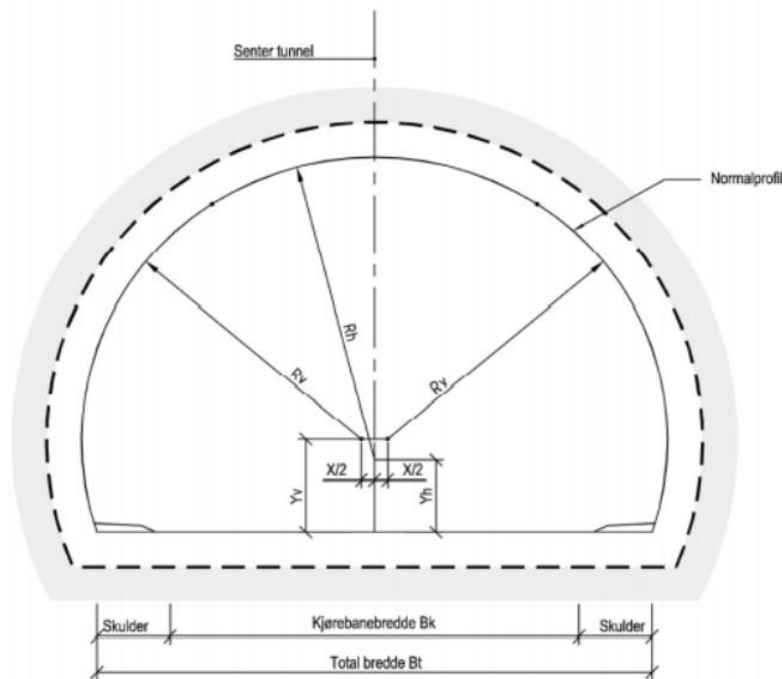
A_S = Areal regnet etter teoretisk sprengningsprofil. I verdiene i tabellen er det forutsatt 0,5 m vegoverbygning og 0,4 m avsatt til sikring.

A_N = Areal regnet etter normalprofilen over kjørebane og sideareal, forutsatt 5 % fall på skulder.

B_S = Buelengde regnet etter teoretisk sprengningsprofil ned til nivå for planum forutsatt 0,5 m vegoverbygning og 0,4 m avsatt til sikring.

B_N = Buelengde regnet etter normalprofil ned til nivå for kjørebane.

FIGUR 23: TVERSNITTSDATA (GEOMETRISKE MÅL) FOR ULIKE TUNNELPROFILENE (STATENS VEGVESEN, 2021B).

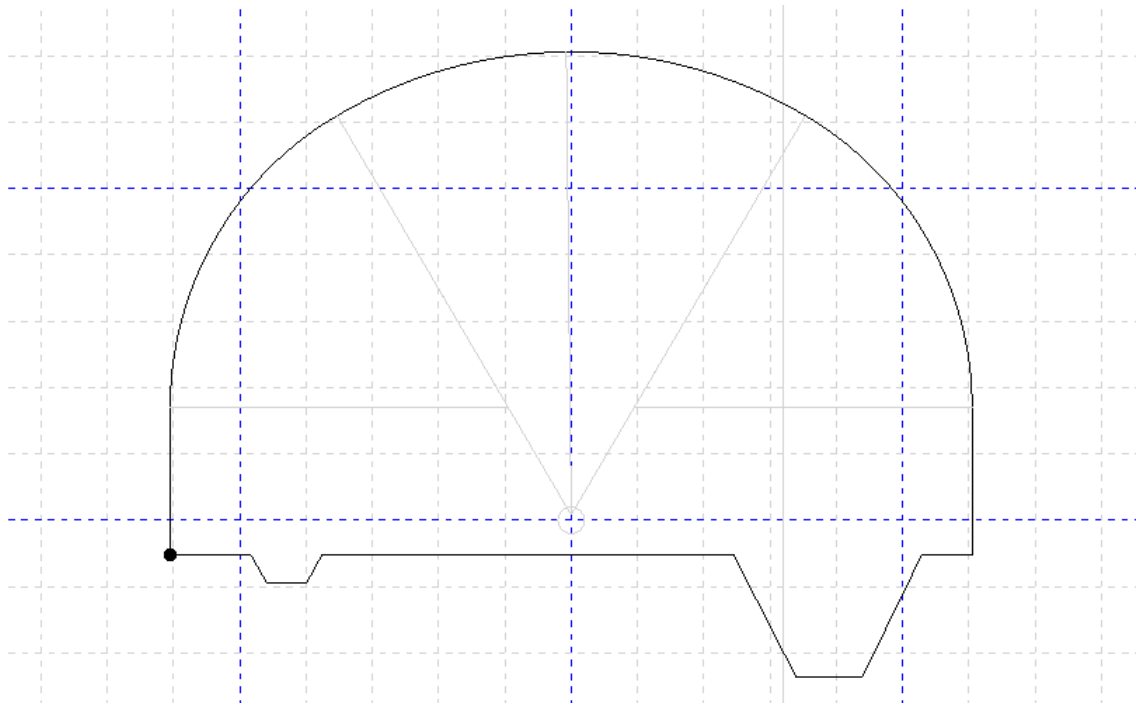


FIGUR 24: GEOMETRISKE MÅL FOR T9,5-14 (STATENS VEGVESEN, 2021B)

N500 danner grunnlaget for mengden av bergmasse som må tas ut i tunnelprosjekter. Disse faktorene kan i utgangspunktet ikke gjøres noe med av prosjekterende og entreprenører utover å gi tilbakemelding til fagfolkene i vegvesenet som jobber med å utforme standarden.

2.5.2 Teoretisk Sprengningsprofil

Tunnelprofilet som etableres for Krokatunnelen er et noe modifisert tverrsnitt i forhold til standard for tunneler i T9,5 og som forutsatt i den geologiske rapporten for prosjektet. Dette skyldes endringer gjort under prosjekteringsfasen, med tanke på å sette av plass for trekkerør og andre installasjoner som skal følge vegtraséen. Geometrisk sett er tverrsnittet for det teoretiske sprengningsprofilet bygd opp av ei grunnlinje på 12,103 meter, loddrette vegger med høyde 2,224 meter, veggradier på 5,100 meter, senteravstand mellom veggradier er 1,903 meter, og hengradius på 6,979 meter for sprengningsprofilet. Figur med disse parameterne påført kan sees i kapittel for planlagt overberg. Disse parameterne er hentet ut fra den definerte konturen i Bever team fra filer som prosjektgruppen har fått tilgang. Grøfter kommer i tillegg. Den lille grøften som vises til venstre på figur 25 er en drengrøft som kun kommer til etablering dersom det viser seg å være behov. Ved prosjektbesøk var denne ikke enda blitt etablert grunnet lite innsig av vann så langt. Arealet av det teoretiske sprengningsprofilet vil grunnet grøftene endre seg noe i tunnelens lengderetning på grunn av fallet disse skal ha.



FIGUR 25: SPRENGNIGSPROFIL FRA BEVER TEAM

2.5.3 Utført Sprengningsprofil

Utført sprengningsprofil vil si det tverrsnittet av bergmasse som er fjernet etter utførte salver og rensk. Kravet til det utførte sprengningsprofilet er i all hovedsak at det ikke skal være noe gjenværende bergmasse innenfor det teoretiske profilet. «Berg som stikker innenfor teoretisk sprengningsprofil skal fjernes» (Statens vegvesen, 2018, p. 99). Det er derfor viktig å utføre kontroll av det utførte sprengningsprofilet.

2.5.4 Kontroll av tunnelprofil

Det stilles krav til laserskanning av tunnelprofilet som dokumentasjon på utført arbeid. I prosesskode 1 lyder dette kravet slik:

Profilkontroll skal utføres som laserskanning etter rensk. Profilkontroll skal skje så nær stuff at innstikkene knøler kan fjernes sammen med tunnelsprengningen. Bergets beskaffenhet og utført permanent sikring skal registreres, dokumenteres og overleveres byggherren fortløpende. All dokumentasjon skal leveres på åpent lesbart format. (Statens vegvesen, 2018, p. 99).

Selve laserskanningen vil bli nærmere omtalt i delkapittel 3.1.2. I praksis vil dette si at stikningsingeniør på prosjekt utfører profilkontroll av tverrsnittet, og markerer knøler som stikker inn i profilet slik at disse kan sprenges bort sammen med en tunnelsalve.

2.6 Økonomi, utvikling og innovasjon i tunnel

2.6.1 Kontrakt

I en kontrakt mellom byggherre og entreprenør blir det alltid regnet faste kubikkmeter fjell innenfor teoretisk sprengningsprofil. På denne måten blir det et rettfærdig konkurransegrunnlag, og det gir alle aktørene like forutsetninger til å beregne pris. Da kan hver enkelt entreprenør selv ta hensyn til hvor mye overberg som må sprenges ut, for å få plass til å jobbe komfortabelt ved ansett til ny salve (Fiskum, 2022).

Det er ikke noen kompensasjon for å ta ut ekstra fjell mellom det teoretiske sprengningsprofilen og 50 cm utenfor det teoretiske sprengningsprofilen. Masser 50 cm utenfor teoretisk sprengningsprofil kan bli økonomisk kompensert basert på kubikkmeter, dette blir betegnet som utfall og er i de aller fleste tilfeller geologisk betinget (Statens vegvesen, 2018).

I prosjektet Fv. 500 Folgefonntunnelen - Årsnes er det benyttet samspillskontrakt, det er en kontraktsform som de på prosjektet sjelden bruker i tunnelprosjekter. I en samspillskontrakt er målet å få den utførende delaktig i prosjekteringsfasen. Det gir entreprenør mulighet for å komme med innspill på praktiske løsninger i en tidlig fase, og forebygger prosjektering av løsninger som ikke kan gjennomføres. Det vil også bidra til innovative løsninger dersom deltakerne i samspillgruppen kan kombinere sine ressurser og kompetanse (Entreprenørforeningen - Bygg og Anlegg, 2021).

2.6.2 Økonomisk og miljømessig besparelse

Kostnadsbesparelse i tunneldriving kan oppnås ved å se på mange ulike parametere. En mulighet for besparelse er å sørge for mindre overberg, og på den måten senke kostnadene på flere ulike arbeidsoperasjoner i et prosjekt. Dersom effektivisering av tunneldriving skal skje gjennom å ta ut mindre mengder fjell, vil flere deler av syklusen bli påvirket. For å ta ut mindre fjell er det viktig å bore nøyaktig og få en god kontur. Ulempene med å ta ut mindre fjell er at det blir mindre plass for å manøvrere bormaskinen og få et godt ansett. Da tar det lengre tid å bore og det vil gå ut over fremdriften. Men når det blir mindre masse å ta ut vil det også gå raskere med utkjøring. Erfaringsmessig vil det ta lengre tid med manøvrering av bormaskin for ansett enn det vil ta å kjøre ut noen lass med ekstra masse. Det avhenger selvfølgelig hvor mye masse, men i et tverrsnitt vil det være begrenset hvor mye ekstra som blir tatt ut også. Det er av interesse å holde profilen så nært teoretisk sprengningsprofil som mulig.

Å redusere overberg i tunneldriving sett fra et miljøperspektiv, gir fordeler i flere ledd av drivingen. Når målet er å redusere utsprengt masse vil det automatisk redusere sprengstoff som benyttes. Det vil i hovedsak gjøre at det blir mindre klimagassutslipp ved boring, sprengning og lasting. For masse transportert ut, vil det utgjøre færre sykluser med hjullaster og dumper, som igjen reduserer forbruk av diesel og gir en besparelse for miljøet. Resultatene av dette vil også gi en kortere syklustid slik at det er mulig å drive mer effektivt.

For en mer bærekraftig utvikling i tunnelbransjen, vil reduksjon av overberg kunne bidra til en positiv utvikling. Prosjekter frem i tid vil ha større fokus på bærekraft, og vil i større grad bli vurdert på linje med pris i en kontrakt. Dokumentasjon på uttak av mindre overberg, som gir en direkte miljøbesparelse vil kunne bli kompensert og vurdert på lik linje med tilbud som er lavere. En prognosemetode for å forutsi hvor mye overberg som blir tatt ut, basert på blant annet Q-verdien av fjellet, vil være en spennende utvikling innenfor tunnelbransjen. En metode som dette gjør det mulig å i større grad oppnå gode anslag av mengden overberg som kan forventes for prosjekter. Sammenligninger opp mot en slik modell vil også kunne gi indikasjoner for hvordan hvert enkelt arbeidslag gjør det. Det kan være individuelt hvordan man løser flere aspekter ved boring i tunnel, derfor vil det av en god prognosemodell kunne fremgå hvilke metoder som

fungerer bra, med hensyn til overberg ut fra hvilke Q-verdier man opererer i (Steinehaugen, 2022).

2.6.3 Innovasjon

Det forskes kontinuerlig på nye innovative produkter og løsninger, samtidig som det også foregår arbeid med å forbedre og utvikle nåværende produkter og løsninger. I tunnelbransjen har det lenge blitt brukt betong for beskyttelse av brann og personsikring. PE-skum har lenge blitt brukt som vann og frostsikring (Statens Vegvesen, 2021b).

Foamrox er et produkt som er utviklet for å kunne fungere i miljøer med stor påkjenning og benyttes i anleggsbransjen. Det er i senere tid også blitt testet som sikring og for beskyttelse mot brann, vann og frost i tunnel. Fordeler med produktet er lav vekt og lavt klimagassutslipp, spesielt sammenlignet med betong. Hovedbestanddelen av produktet er laget av resirkulerbart glass som verken krymper eller ekspanderer, og gjør produktet vedlikeholdsvennlig og håndterbart (Foamrox, 2022). Dersom det er mulig å erstatte betong som har et stort miljøavtrykk, med et produkt som er resirkulert blir det en mer bærekraftig løsning. Siden produktet vil få en 2- i 1 funksjon sett opp mot bruk av PE-skum og sprøytebetong kan det samtidig være en mulighet for å redusere nødvendig plass avsatt til sikring mot dagens standard på 40 cm fra teoretisk sprengningsprofil. Ved å bruke det nye produktet, vil det kunne oppnås ytterligere fordeler med tanke på å redusere uttatt bergmasse.

2.7 HMS ved tunneldriving

Ved tunneldriving er det stort søkelys på helse, miljø og sikkerhet. Senior produksjonsleder for tunnel Arne Dokken har jobbet i tunnelbransjen siden 1986. Han forklarte under intervju at det som har utviklet seg mest i tunnelbransjen fra da og frem til i dag, er HMS og teknologien som brukes i maskiner. HMS handler om å systematisk identifisere ulike risikoer og sette inn nødvendige tiltak (Dokken, 2022).

Organisasjoner som Skanska med flere, har en visjon om at alle skal komme hjem fra jobb i like god forfatning både fysisk og psykisk som når dem dro på jobb. For å nå målet er god struktur i HMS-arbeid en viktig faktor, slik at både funksjonærer og fagarbeidere kan føle seg trygge og ha et godt miljø på jobb (NFF, 2016).

Ved tunneldriving er man spesielt utsatt for støv og støy. Støv er en samlebetegnelse for alle partikler i luften. Det som avgjør hvor skadelig støvet er å inhalere bestemmes av dets kjemiske sammensetning, partikkelstørrelse og konsentrasjon. Støy blir ofte oppgitt som den mest belastende miljøfaktoren ved arbeid under jord. Nesten halvparten av tunnelarbeiderne befinner seg i et miljø med støybelastning på 85 DbA i mer enn fem timer hvert skift. Når støybelastningen blir så stor, er det en fare for varig hørselskade (Bruland, 2013).

Tiltak for å gjøre arbeid i tunnel tryggere og mer behagelig:

- God ventilasjon, bidrar til å få frisk luft inn i tunnelen og få ned mengden av støv og gasser. Det er også viktig å ta hensyn til at ved for mye lufttilførsel vil det bli trekk, uttørking og oppvirvling av støv inne i tunnelen.
- Vedlikehold av maskiner og utstyr vil holde utslipp og forurensninger på et mindre nivå
- Godt veidekke øker kjørekomfort og reduserer vibrasjoner, utslipp av støv og gasser.
- Gode arbeidsrutiner ved å bruke godkjent verneutstyr og legge mest mulig til rette for å redusere støy (Bruland, 2013).

Det er et stort press på tunneldrivere for å være effektive, det er en kultur for å jobbe raskt og oppnå god inndrift. Når det blir gitt insentiv for å ta ut mindre overberg og forhindre utfall vil det kunne gå på bekostning av tid. Det vil oftere oppstå farer og ulykker under stort tidspress og ved

stort fokus på å jobbe raskt. Under arbeid på stuff med å sette bolter kan det raskt oppstå farer ved uoppmerksomhet. Spesielt om flere operasjoner skal foregå samtidig er det større sjanse for at noe skal skje. Å sette bolter og lade, samtidig som man borer på stuff er ofte ønskelig fra borelagets side, med bakgrunn i å oppnå raskere syklustider. Det er av enkelte byggherrer grunnet HMS-hensyn nå innført tiltak mot dette, ved å forby jobbing foran bomfeste mens det pågår boring på stuff. Fra entreprenørers ståsted argumenteres det mot denne regelen med at man under boring vil ha god tid til å utføre arbeidsoppgaver på stuff, og dermed får gjort dette trygt og nøyaktig (Fiskum, 2022).

2.8 God kontur og sikring

2.8.1 Sikringsmetoder

Det skjer stadig teknologisk utvikling innenfor feltet om bergsikring. Dette medfører at det stadig blir bedring av kapasitet og kvalitet for grunnleggende sikringsmetoder, og utvikling av nye sikringsmidler og metoder. De mest vanlige sikringsmetodene som brukes i Norge er rensk, bolter, sprøytebetong, full utstøpning, injeksjon, frysing og armerte sprøytebetongbuer (Nilsen, 2016). Sikringsinstallasjoner skal sørge for trygg bruk av tunneler gjennom prosjektert levetid som er 100 år brukstid for tunnelkonstruksjoner. Sikringsklasser, med sikringsomfang og sikringsmetoder, skal bestemmes fra tabell 6.1 i N500 ved hjelp av bergmasseklasser i henhold til Q-metoden som vist i figur 26 (Statens Vegvesen, 2021b). Uavhengig av bergmassekvalitet, er det ønskelig å kunne utnytte bergets evne som bærende element. Sikringen skal kunne forsterke eller supplere bæreevnen til bergmassen (NFF, 2008). Ved problemer med utfall, vil spiling være det beste tiltaket for å forhindre dette og oppnå et godt profil. For godt fjell derimot ville kostnadene ved å bruke spiling for å redusere overberg blitt alt for dyrt med tanke på inndrift (Fiskum, 2022). De sikringsmengder og metoder som er planlagt for Krokatunnelen er gitt i tabell 2.

TABELL 2 SIKRINGSMENGDER FOR KROKATUNNELEN (SWECO, 2021).

Sikringsmiddel	Anslått mengde	Pr. løpemeter tunnel
Bolter (stk.)	6358	4,65
Sprøytebetong E700 og E1000 (m ³)	3795	2,77
Armerte sprøytebetongbuer (stk.)	10	0,01
Forbolter (stk.)	595	0,43

Bergmasse klasse	Bergforhold Q-verdi (sprengt berg)	Sikringsklasse Permanent sikring
A/B	Lite oppsprukket bergmasse. Midlere sprekkavstand > 1m. Q = 100 – 10	Sikringsklasse I - Spredt bolting - Sprøytebetong B35 E700, tykkelse 80 mm
C	Moderat oppsprukket bergmasse. Midlere sprekkavstand 0,3 – 1 m Q = 10 – 4	Sikringsklasse II - Sprøytebetong B35 E700, tykkelse 80 mm - Systematisk bolting c/c 2 m
D	Tett oppsprukket bergmasse eller lagdelt skilrig bergmasse. Midlere sprekkavstand < 0,3 m. Q = 4 - 1	Sikringsklasse III - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 100 mm - Systematisk bolting c/c 1,75 m
E	Svært dårlig bergmasse. Q = 1 - 0,2 ----- Q = 0,2 - 0,1	Sikringsklasse IV - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150 mm - Systematisk bolting, c/c 1,5 m ----- - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150 mm - Systematisk bolting, c/c 1,5 m - Armerte sprøytebetongbuer. Buedimensjon E30/6 ø20 mm, c/c buer 2–3 m, Buene boltes systematisk, c/c bolt = 1,5 m, boltelengde 3–4 m - Sålestøp vurderes
F	Ekstremt dårlig bergmasse. Q = 0,1 - 0,01	Sikringsklasse V - Sprøytebetong B35 E1000, tykkelse 150–250 mm - Systematisk bolting, c/c 1,0 – 1,5 m - Armerte sprøytebetongbuer Buedimensjon D60/6=4, ø20 mm, c/c buer 1,5–2 m Buene boltes systematisk, c/c 1,0 m, boltelengde 3–6 m Doble buer kan erstattes med gitterbuer. - Armert sålestøp, pillehøyde min. 10 % av tunnelbredden
G	Eksepsjonelt dårlig bergmasse, stort sett løsmasse, Q < 0,01	Sikringsklasse VI - Driving og permanent sikring dimensjoneres spesielt

Kommentarer til tabell 6.1:

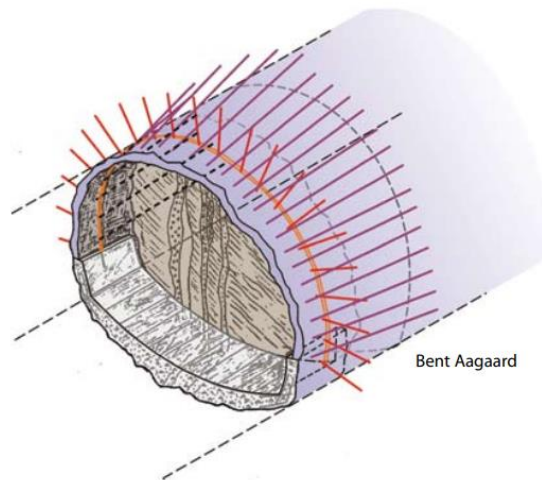
- Sikringsangivelse i tabellen gjelder utsprengt tunneltverrsnitt for T8,5 – T12,5. Bergsikring i andre tverrsnitt skal dimensjoneres spesielt.
- Salvelengden skal reduseres senest fra og med sikringsklasse IV.
- Det skal ved driving inn mot svakhetssoner og andre kritiske partier etableres en sikringszone foran sonen. Avstanden til sonen fra stoff bestemmes på grunnlag av tilgjengelig informasjon og grad av usikkerhet, minimum 8-10 m.
- Minimum tykkelse på sprøytebetong i saltvannssoner skal være 100 mm.
- I sikringsklasse I kan behovet for systematisk bruk av sprøytebetong vurderes. Sprøytebetong skal sprøytes ned til minimum kjørebanelivå.
- For beskrivelse av stabilitetssikring, se håndbok V520 [4].

FIGUR 26: SAMMENHENGEN MELLOM BERGMASSEKLASSER (Q-SYSTEMET) OG SIKRINGSKLASSER (STATENS VEGVESEN, 2021C).

2.8.2 Bolting

Boltesikring har i lang tid vært blant de vanligste metoder for bergsikring, og det utføres generelt etter en av to hovedprinsipper. Enten ved spredt bolting for sikring av ustabile enkeltblokker, eller ved systematisk bolting av en tunnelstrekning eller et parti av bergrommet etter et forhåndsbestemt mønster (NFF, 2008). Ved de fleste fjellforhold er bolter den mest brukte og billigste metoden som utnyttes. Fjellbolting er sett på som en rask, økonomisk og praktisk sikringsmetode. I de fleste tilfeller brukes bolter med diameter på 20 mm med flytegrense på omtrent 120 kN, det finnes andre dimensjoner som 25 og 32 mm som kan benyttes i spesielle tilfeller under bolting. Boltelengder ligger vanligvis mellom 1,5 og 6 meter. Riktig lengde bestemmes ut fra geometrien og størrelse på tunneltverrsnitt. I noen tilfeller benyttes spesielle bolterigger ved innsetting av bolter, spesielt ved systematisk bolting (Nilsen, 2016). For en tunnel med tverrsnitt T9,5 bør det benyttes boltelengde på fire meter fra vederlag til vederlag og tre meter i vegger (SWECO, 2021). De forskjellige bolttypene har som regel ulike bruksområder

og har dermed også forskjellige sterke og svake sider. Bevegelser i fjellet reduseres ved at sikringsmetoden tvinges til å måtte støtte seg selv, fordi boltene binder sammen diskontinuiteter i fjellet. Hvis en bergforsterkning i form av bolting skal kunne gi en lang og stabil situasjon, er det forutsatt at den stedlige bergmassen er stivere enn sikringskonstruksjonen. Dette er avgjørende for at boltene skal få tilstrekkelig forankring og kunne stanse deformasjoner. For eksempel på bruk av forbolter i tunnelen. Se figur 27 (Nilsen, 2016) .



FIGUR 27: EKSEMPEL PÅ BRUK AV FORBOLTER I KOMBINASJON MED SPRØYTEBETONGRIBBER OG SÅLESTØP (EKSEMPEL FRA BJORØYTUNNELEN) (NFF, 2008)

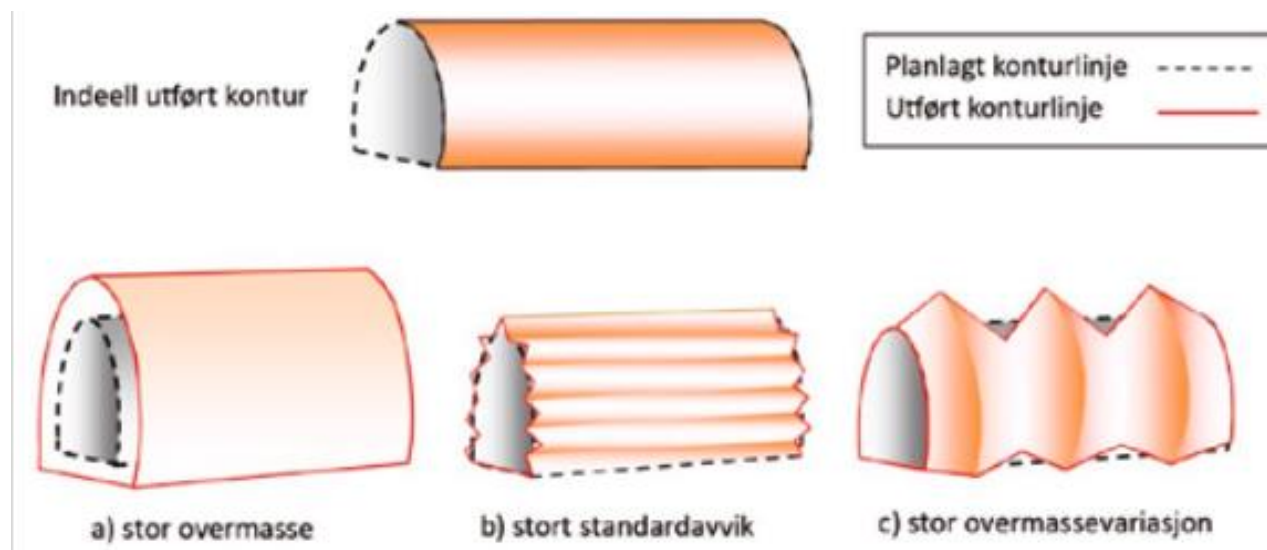
For bolting generelt gjelder i aller størst grad at effekten av utført sikring er avhengig av kvaliteten av arbeidene som utføres. De mest normale feilene som kan ødelegge effekten av utført boltesikring er eksempelvis at boltehullet er boret i feil vinkel, spesielt når tunnelriggen benyttes for boring av boltehull i små tunnelverrsnitt. En annen klassisk feil kan være at boltehullene er for korte til å nå gjennom sprekken eller sleppeflaten (Nilsen, 2016).

2.8.3 TCI- Tunnelkonturindeks og Nordtugindeksen

TCI eller tunnelkonturindeks er en metode utviklet for å skaffe en oversikt over tunnelkonturkvaliteten basert på fem forskjellige tunneler rundt i Norge. Til sammen 11 kilometer med tunnel ble undersøkt. TCI er en objektiv indeks som definerer konturkvaliteten basert på overmasse og ujevnheter i konturen. Fra den utførte konturen tar TCI inn parametere fra tunnelen. Parameterne hentes ut ved å utføre laserskanning underveis i drivingen. Denne

tunnelkonturkvalitetsindeksen er ment for å kvantifisere konturkvaliteten etter sprengning, for å sammenligne konturkvalitet effektivt mellom tunneler og for å kunne analysere hvordan de forskjellige faktorene påvirker TCI mer systematisk. Det er funnet ut at jo høyere TCI, desto lavere er kostnaden. Når det oppnås god kontur kreves det mindre sikring og mindre sprøytebetong. TCI kan også brukes av byggherren til å sikre konturkvalitet (NFF, 2012).

Det er testet ut en kontinuerlig beregningsmetodikk for TCI_T som bruker alle de skannede dataene i en tunnel og ikke skiller mellom salver. Dette gjør det lettere å bruke indeksen i praksis. Ved å bruke en bestemt ligning kan man finne kvaliteten på konturen. TCI beregnes ut fra avviket mellom ideell og utført kontur. Avviket deles inn tre grupper, stor overmasse, stort standardavvik og stor overmassevariasjon. Disse er illustrert i Figur 28 (NFF, 2012).



FIGUR 28: EKSEMPLER PÅ ULIKE TYPER AVVIK FRA IDEELL KONTUR (NFF, 2012).

Formelgrunnlag beregning av TCI:

$$TCI_T = \frac{C_T}{W_1 \cdot C_1 \cdot \bar{O}_v + W_2 \cdot C_2 (1 + 0.001 \cdot \bar{S}_d + 0.001 \cdot \bar{O}_v) + W_3 \cdot C_3 \cdot V_0}$$

$$TCI_T = \frac{300}{W_1 \cdot 0.006 \cdot \bar{O}_v + W_2 \cdot 0.8 \cdot (1 + 0.001 \cdot \bar{S}_d + 0.001 \cdot \bar{O}_v) + W_3 \cdot 0.02 \cdot V_0}$$

eller

$$TCI_T = \frac{300}{W_1 \cdot 0.006 \cdot \bar{O}_v + W_2 \cdot 0.8 \cdot (1 + 0.009 \cdot \bar{D}_d + 0.001 \cdot \bar{O}_v) + W_3 \cdot 0.02 \cdot V_0}$$

$$W_1 : W_2 : W_3 = 4.5 : 4.5 : 1$$

\bar{O}_v = Gjennomsnittlig overmasse for hele tunnelen

\bar{S}_d = Gjennomsnittlig standardavvik for hele tunnelen

V_0 = Variasjon i overmasse i lengderetningen

D_d = Variasjon i pilhøyde mellom snitt langs konturen

C_T = Kalibreringsfaktor = 300

TCI er definert som en kombinasjon av tre faktorer som hver tar hensyn til de tre avvikene fra den ideelle konturen. TCI er utarbeidet av Yangkyun Kim, som en doktorgradsavhandling i 2009. Den perfekte tunnelen vil ha en TCI på 83. Dette betyr null overmasse og at konturen er helt glatt. Hvor normalområdet regnes til å være mellom 39 og 62. Desto høyere indeksen er, jo bedre er konturen. Tunneler i Norge ligger i dag opp mot den øvre grensen. TCI kan også beregnes for et enkelt snitt, den betegnes da som TCIr, og har en øvre grense på 83 (NFF, 2012).

For at TCI skal bli en mer effektiv indeks for evaluering av konturkvalitet, er det nødvendig med analyser av TCI-fordeling i henhold til ulike typer tunneler. I intervjuene med Skanska ble det stilt spørsmål om TCI, det var generelt lite kjennskap til metoden.

TCI tar hensyn til de ulike konturene, men viser ikke hvordan boringen er utført. Dermed innføres Nordtugindeksen som Alekander Korssund Andrianopoulos utarbeidet i 2012, i sin masteroppgave «Ny klassifiseringsmetode for tunnelkonturen av definisjon, analyser, kriterier og påvirkning» ved NTNU. Meningen med Nordtugindeksen (F) er at den skal vise sammenhengen mellom den utførte konturen og boreplanen. Nordtugindeksen innføres slik at boreplanens

innvirkning på konturen lettere kan visualiseres. Den gir en beskrivelse på faktisk utført kontur og boret areal. Nordtugindeksen beregnes ut fra to forskjellige faktorer. O som overmasse i snitt, og B som er boret overareal (boret areal minus teoretisk kontur), (NFF, 2012). Indeksen F regnes ved:

$$F = 10 \cdot \text{Log} (B^2 \cdot O)$$

Jo mer overmasse og boret overareal, jo større blir F . Slik finnes sammenhengen mellom boring og avviket fra teoretisk kontur. Prosjektgruppen erkjenner at disse indeksene gir bedre mål på hva som er god kontur. Dette fordi de tar hensyn til flere parametere, enn bare mengden av overberg. Samtidig ser det ut til at disse metodene er lite brukt blant aktører i bransjen. For praktiske formål mener prosjektgruppen det er nyttig å bruke overberg målt i kvadratmeter, eller kubikkmeter per meter tunnel som parameter på konturens kvalitet. Da dette er relativt lett tilgjengelige tall og det stilles uansett krav til skanning. Disse tallene kan videre relateres direkte til kostnader for ulike arbeidsoperasjoner under tunneldrifta.

3 Metode

En metode er noe som skal fortelle hvordan man skaffer den informasjon og kunnskap som trengs for en utvalgt oppgave. Bakgrunn for å velge metode ble gjort ut fra hvordan gruppa på best mulig måte skal kunne svare på problemstillingen og hva som gir best datagrunnlag (Dalland, 2007).

Prosjektgruppa har kommet frem til at det skal fokuseres på kvantativ metode gjennom innsamling av data, der det brukes mengder og tall fra tunneldrivingen som er utført.

Prosjektgruppa har valgt å benytte en liten del kvalitativ metode ved å gjennomføre intervju av fagfolk under prosjektbesøk. Dette for å få flere synspunkt og observere erfaringer gjort i praksis, slik kan det tas hensyn til individuelle ulikheter. Dersom det er de samme operasjonene som blir gjennomført, kan det være flere ulike måter å løse dette på, derfor er det av interesse å se om det kan ha betydning for vår oppgave.

3.1 Datainnsamling

Data kommer i hovedsak til å bli samlet inn under prosjektbesøk hos Skanska på prosjektet Fv. 500 Folgefonntunnelen - Årsnes. Grunnet prosjektets fremdrift og utsettelse av tunneldrivingen blir datainnhenting gjort i to omganger. Det kan da gjøres enkelte betraktninger for videre fremdrift med problemstillingen før alle dataene er hentet ut. Data gruppa får tilgang til fra Skanska er Excel-fil med salvelogg, som beskriver profilnummer i tunnelen og hvilke tiltak som er gjort. Dette er informasjon som for eksempel utvidet profil, sikringsklasse, spiling, salvelengde, Q-verdi og hvem som var bas under boring og skyting av salve. Andre tilgjengelige data er PDF-filer hvor det fremgår profilnummer, tunnelverrsnitt og overberg angitt i kvadratmeter for hver hele profilnummer.

Første periode med innhenting av data foregår under prosjektbesøk, dette gir bakgrunn for praktiske erfaringer og mulighet for bedre forståelse av de utvalgte dataene. Dette gjøres for å kunne starte prosessen med å bearbeide data så tidlig som mulig. Deretter er planen å få tilsendt

flere data i etterkant av prosjektbesøk for å kunne ha ett større grunnlag til å sammenligne ulike parametere og få med en lengre del av tunnelen i datagrunnlaget.

Ved bruk av skanning har Skanska rutine for å dokumentere utført profil underveis i tunneldrivingen. Siden Kroatunnelen ikke blir ferdig under oppgavens tidshorisont er det nødvendig å se til et annet prosjekt for utfall. Da har Skanska stilt data fra Skarvberg tunnelen til disposisjon, denne tunnelen hadde gjennomslag i mai 2021. Dataene omfatter Excel-fil med profilnummer, salvelengde, profil, Q-verdi, sikringsklasse, spiling, bas, sonderboring/injeksjon. For å kunne sammenligne dette er det også gitt tilgang til PDF-filer med profilnummer for hvert profilnummer i hele meter, med scannet antall kvadratmeter i utfall.

3.1.1 Datainnsamling for Q-verdi

Q-verdi er noe som kartlegges for alle salver som gjennomføres i tunnelprosjekter og brukes kontinuerlig for å bestemme sikring i prosjektene. Dette gjør innhenting av Q-verdi bestemt av geolog underveis i tunneldrivingen til lett tilgjengelig informasjon for de fleste tunnelprosjekter. Q-verdi og sikring blir loggført i salveplan sammen med en del annen informasjon om salvene, slik som utført sikring.

3.1.2 Datainnsamling for overberg og utfall

Ideelt sett kan mengden overberg beregnes ved å se på volumet mellom en BIM-modell av den prosjekterte tunnelen, og skanning av den utførte tunneloverflaten for hver salve. Dette volumet kan deretter kobles opp mot salvene det er oppgitt Q-verdi for i salveloggen. Mengden av overberg kan beregnes ved differansen mellom arealet til det teoretiske sprengningsprofilen og det utførte sprengningsprofilen. Dette gjøres fra et systematisk sett av flere påfølgende profiler, eksempelvis for hver meter slik som for hvert profilnummer i heltall.



FIGUR 29: TUNNELRIGG I KROKATUNNELEN UNDER BORING AV KONTUR MED ANTYDET TEORETISK SPRENGNINGSPROFIL, I FORGRUNNEN KAN VI SKIMTE LASERSKANNEREN. BILDE OG ILLUSTRASJON: A.N

Skanningen utføres med laserskanner som kan rotere 360° og automatisk registrere overflaten av tunnelen ved å måle avstand og vinkel i forhold til oppstillingen. En slik laserskanner kan skimtes til venstre på figur 29. Det dannes en elektronisk punktsky som gjøres om til en tredimensjonal modell med BIM-programvare. Skanska benytter seg av Gemini Terrain programvare til dette.

Det forventes en viss usikkerhet ved målingene, i forhold til tilgjengelige data på skanning før sprøytebetong er påført, da dette sprøytes kontinuerlig under driving for å fungere som arbeidssikring. Dersom dette er tilfellet vil det sannsynligvis være hensiktsmessig å gjøre en forenkling ved å anta at tykkelsen av sprøytebetongen er lik det som er loggført i salveplan, dersom det ikke er loggført nøyaktig forbruk sett opp mot profilnummer. Merforbruk av sprøytebetong vil beregnes ut fra tykkelse av betongen og buelengde for profilet.

Undersøkelser av sammenhengen mellom overberg og Q-verdi vil i sin helhet baseres på data fra Krokattunnelen der det gjøres spesifikke beregninger for prosjektoppgaven.

For undersøkelser av sammenhengen mellom utfall og Q-verdi vil det her brukes data fra Skarvberg-tunnelen. Det er en vegtunnel drevet av Skanska med gjennomslag 4.mai 2021 (Skoglund, 2021). Dette var et prosjekt med spesielt utfordrende geologi og mye utfall. Dataene prosjektgruppa har fått tilgang til er en del av dokumentasjonen fra entreprenør til byggherre Statens vegvesen, på mengden utfall som skal godtgjøres i henhold til Håndbok R761 Prosesskode 1 kapittel 7.6. Denne sier at geologisk betinget utfall betegnes som bergmasse som faller ut, 50 cm fra sprengningsprofilen eller mer (Statens vegvesen, 2018).

3.1.3 Databehandling og analyse

Alta av data vil bli ført manuelt inn i Excel-regneark for å kunne gjøre ulike analyser av tallmaterialet. Ved å systematisere dataene i Excel muliggjør dette å utføre analyser og beregninger både i Excel, men også å hente ut verdier for plotting i andre programmer som GeoGebra og RStudio. GeoGebra vil bli brukt til å utføre regresjon for å undersøke sammenhenger underveis i undersøkelsene og RStudio vil bli brukt for sluttberegning av signifikans for resultatene.

3.2 Intervju

Under prosjektbesøk i Mauranger vil det bli gjennomført intervju av personell på prosjektet. Intervjuobjektene har ulike arbeidsoppgaver i forbindelse med bygging av Krokattunnelen. Bakgrunnen for å gjøre intervju, er å få et større innblikk i praksisen rundt tunneldriving. På den måten kan praksis for tunneldriving settes opp mot det teoretiske, for å få et mer nyansert bilde av forholdene som vil ha en innvirkning på resultatene av undersøkelsene som gjennomføres.

Spørsmål som det ønskes svar på gjennom intervju er stort sett knyttet til de data som skal hentes ut for oppgaven, hvordan de hentes ut og hva som kan gjøres i praksis for å redusere overberg. Det er også av interesse å få svar på hvordan tunneldriving foregår i praksis. Hvordan hver enkelt

operasjon løses, og hvor stor differanse er det på ulike skift rundt ulike operasjoner. Alle intervjuobjekter har jobbet eller jobber i tunnelen. Alle intervjuene legges som vedlegg til oppgaven.

3.3 Hypotesetesting

Etter at alle dataene er samlet inn kommer det til å bli utført hypotesetesting for å undersøke sannsynligheten for ulike sammenhenger i tallmaterialet. Hypotesetesting går ut på å definere en nullhypotese H_0 som er det motsatte av den alternative hypotesen H_1 . I tilfellet med hypotesetesting av oppgavens hypotese for korrelasjon mellom Q-verdi og overberg vil nullhypotesen være at det ikke er noen sammenheng mellom de to parameterne. Dersom det viser seg at nullhypotesen kan forkastes, vil det med større sannsynlighet kunne fastslås at hypotesen er riktig. (Bjørnstad, 2018)

4 Resultat

4.1 Sammenheng mellom Q-verdi og overberg

Statistikk for undersøkelse av sammenheng mellom overberg og Q-verdi for Kroatunnelen. Skanningene gjort for Kroatunnelen er gjort etter at sprøytebetong er påført vegg og heng. Derfor må volumet av betongen legges til det målte overberget. Volumet justeres i forhold til loggført tykkelse av sprøytebetong i salvelogg.

Kompensering ved sprøytebetong med tykkelse 80 mm og buelengde 22,47 meter:

$$\text{Buelengde} \cdot \text{tykkelse av sprøytebetong} = 22,47 \text{ m} \cdot 0,08 \text{ m} = 1,80 \text{ m}^2$$

1,80 m² vil dermed bli lagt til arealet av overberget på de profilene hvor tykkelse av sprøytebetong er på 80 mm.

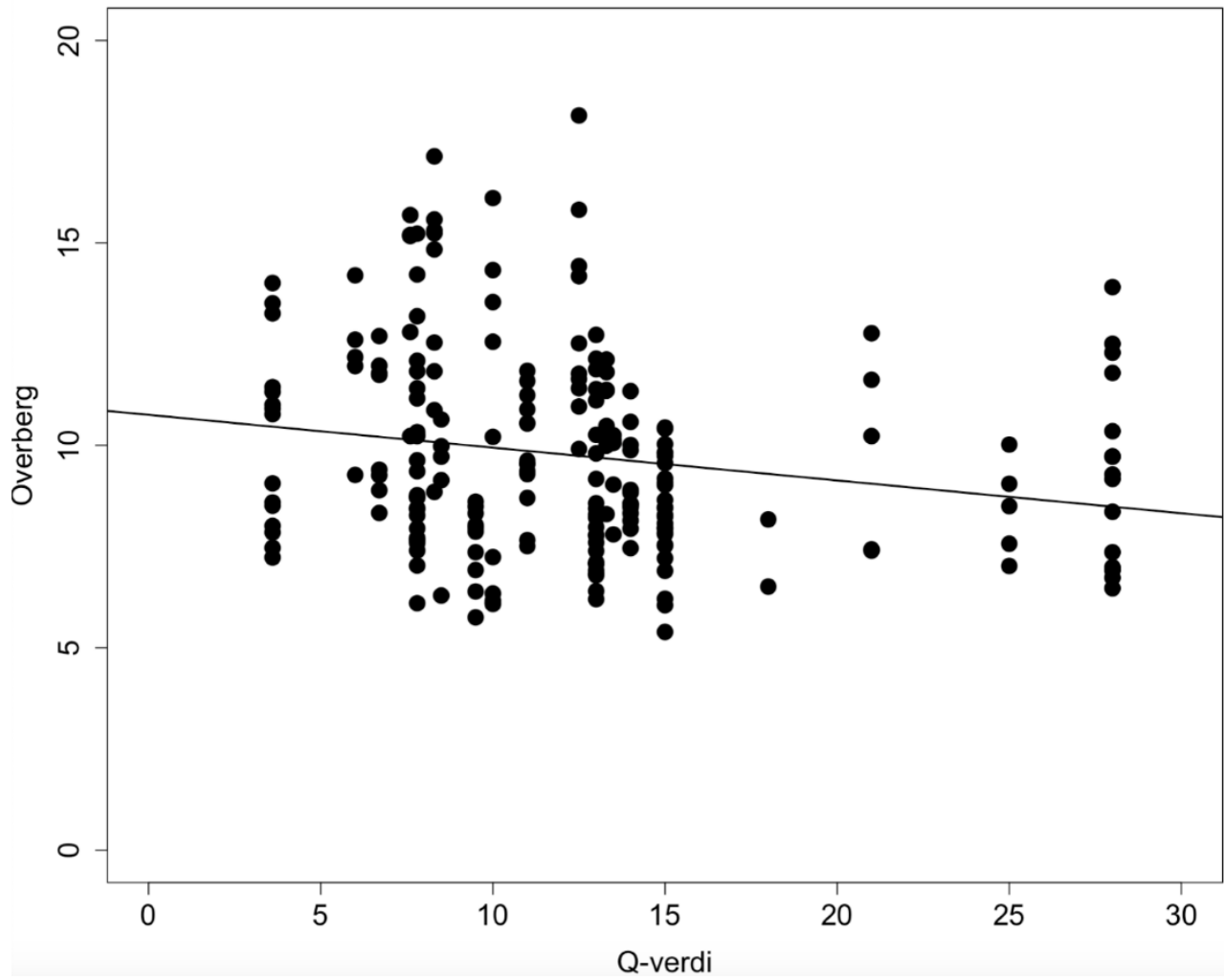
Kompensering ved sprøytebetong med tykkelse 100 mm og buelengde 22,47 meter:

$$\text{Buelengde} \cdot \text{tykkelse av sprøytebetong} = 22,47 \cdot 0,1 \text{ m} = 2,25 \text{ m}^2$$

2,25 m² legges til arealet av profiler med 100 mm loggført tykkelse på sprøytebetong.

Justeringene gjøres i Excel for alle profiler med tilhørende verdi for tykkelse på sprøytebetong.

Sammenheng mellom Q-verdi og overberg i Krokotunnelen



FIGUR 30: UTKLIPP AV PLOTT FOR Q-VERDIER OG OVERBERG MED REGRESJONSLINJE. UTKLIPP FRA RSTUDIO

Utdata av anlyse i RStudio utført av Janne Cathrin Hetle Aspheim:

```
Call:
lm(formula = tunell_ny2$Korrigert ~ tunell_ny2$`Q-verdi`)

Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q    Max
-4.2348 -1.7112 -0.4088  1.5382  8.4085

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   10.75508   0.37840  28.422 < 2e-16 ***
tunell_ny2$`Q-verdi` -0.08108   0.02757  -2.941  0.00362 ** P-verdi, sjanse for å observer slik
stor effect dersom det i nature ikke er en effekt. (H0 = ingen effekt)
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.434 on 222 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.0375, Adjusted R-squared:  0.03316
F-statistic: 8.649 on 1 and 222 DF, p-value: 0.003619
```

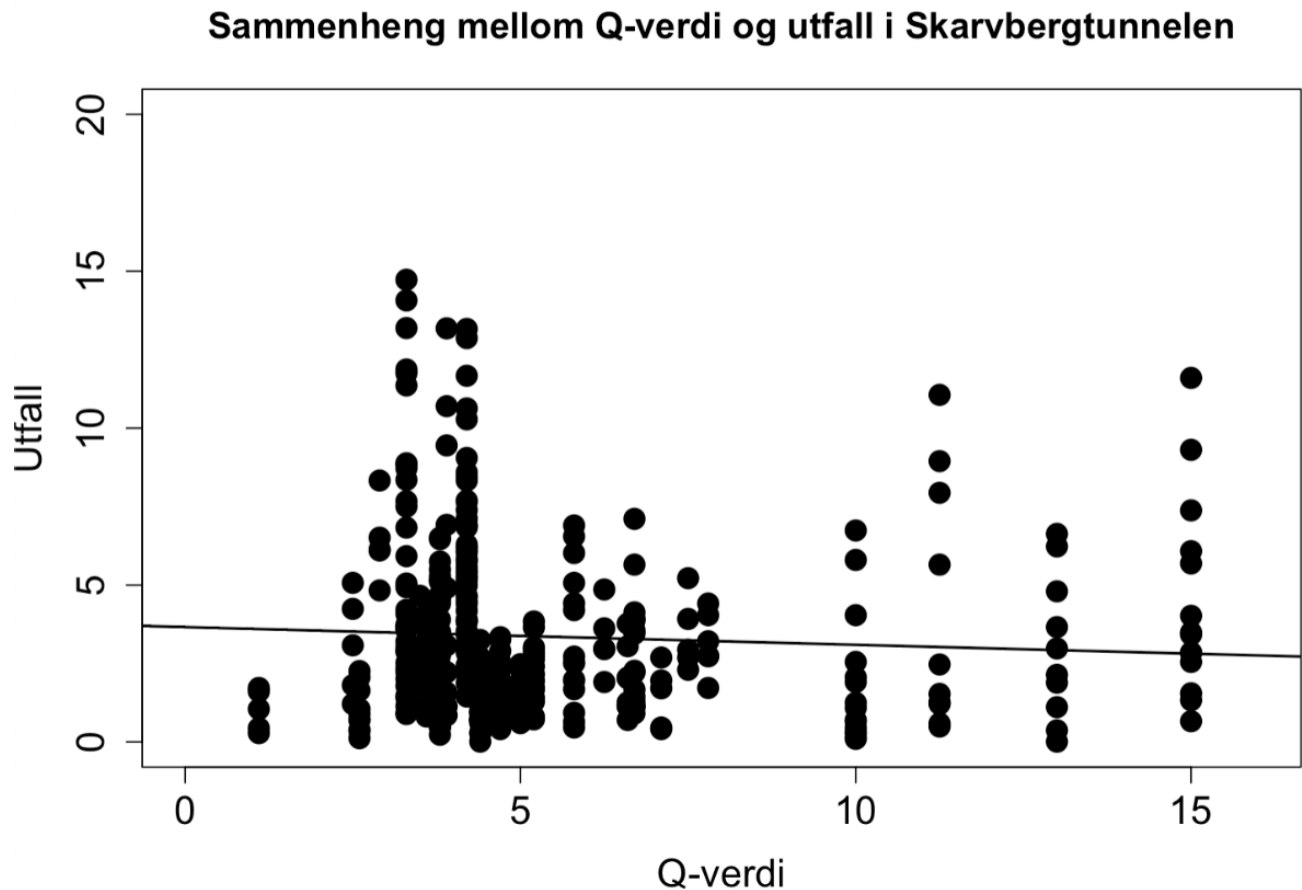
Kommentarer til resultat:

Den lineære regresjonen gir et stigningstall på -0,08108 som vil si at det forventes en reduksjon i overberg på 0,08 m² for hver gang Q øker med 1. Dette stigningstallet beskriver helningen på regresjonslinja i figur 30. R² sier noe om hvor mye av variasjonen i overberg som kan forklares ved bruk av modellen som her er 0,0375, fire prosent av variasjonen i overberg kan dermed forklares ved Q-verdi. P-verdien på 0,003619 sier at det er 0,36 prosent sjanse for å observere en

effekt dersom det i naturen ikke er en slik effekt. Dette resultatet er godt innenfor det som ofte anvendes som standard signifikansnivå i forskning på 5 prosent.

4.2 Sammenheng mellom Q-verdi og utfall

Statistikk for undersøkelse av sammenhengen mellom Q-verdi og utfall for Skarvberg tunnelen. Prosjektgruppa har her valgt å kun se på parseller uten forbolting grunnet en antagelse om at det vil ha en for stor innvirkning på resultatene til at de kan sammenlignes. For målingene av utfall viste det seg å være for komplisert å kompensere for ulik tykkelse av sprøytebetong.



FIGUR 31: UTKLIPP AV PLOTT FOR Q-VERDI OG UTFALL MED REGRESJONSLINJE FRA RSTUDIO.

Utdata av analyse i RStudio utført av Janne Cathrin Hetle Aspheim:

```
Call:
lm(formula = tunell$Utfall ~ tunell$Q)

Residuals:
    Min     1Q   Median     3Q      Max
-3.4082 -2.0188 -0.7834  1.1720 11.2491

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.66882   0.28772  12.751 <2e-16 ***
tunell$Q    -0.05695   0.04409  -1.292  0.197
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.791 on 370 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.004488,    Adjusted R-squared:  0.001798
F-statistic: 1.668 on 1 and 370 DF,  p-value: 0.1973
```

Ved hjelp av Janne Cathrin Hetle Aspheim ble det utført en tilsvarende analyse i RStudio av sammenhengen mellom Q-verdi og utfall som for Q-verdi og overberg. Resultatet av denne analysen gir et stigningstall på -0,0569 for den lineære regresjonen som vist i figur 31. Det vil si at det forventes en reduksjon i utfall på 0,06 m² dersom Q-verdien øker med 1. P-verdien i dette tilfellet er 0,1973, det vil si at det er 20 prosent sjanse for å observere denne sammenhengen selv om det i naturen ikke er noen sammenheng mellom verdiene. Ved et signifikansnivå på 5 prosent forkastes dermed hypotesen om at det er en sammenheng mellom parameterne.

4.3 Effekt av spiling

Gjennomsnittlig utfall for tverrprofiler med og uten spiling for et utvalg av profiler fra Skarvberg tunnelen er presentert i figur 32 og 33 med utklipp fra vedlagt Excel-fil.

Gjennomsnittlig utfall for tunnelprofiler uten spiling er beregnet for et utvalg på 372 profiler, uten utvidelser eller nisjer. Gjennomsnittlig utfall for tunnelprofiler med spiling er basert på et utvalg på 428 profiler og er hovedsakelig beregnet ut fra tunnelprofiler med utvidet profil, men ikke ved nisjer.

369	2261	2.90	4.83
370	2260	2.90	6.13
371	2259	2.90	8.33
372	2258	2.90	6.51
373	2257	2.90	6.10
374			
375	Gjennomsnitt	5.64	3.35
376			

FIGUR 32: GJENNOMSNIITTLIG Q-VERDI UTFALL FOR PROFILER UTEN SPILING SKARVBERGTUNNELEN

426	2758	0.70	0.21
427	2757	0.70	0.23
428	2756	0.70	0.19
429	2755	0.70	0.27
430			
431	Gjennomsnitt	0.59	0.69
432			

FIGUR 33: GJENNOMSNIITTLIG Q-VERDI OG UTFALL FOR PROFILER MED SPILING SKARVBERGTUNNELEN

Det er her altså et gjennomsnittlig utfall på 3,35 kubikk per meter tunnel for parseller uten spiling og 0,69 kubikk per meter for parseller med spiling som vist i figur 32 og 33. Samtidig er det en relativt god gjennomsnittlig Q-verdi på 5,64 for førstnevnte og en veldig dårlig gjennomsnittlig Q-verdi på 0,59 for sistnevnte.

4.4 Utført overberg for vegg og heng

221	4806.00	28.00	10.35
222	4807.00	28.00	9.73
223	4808.00	28.00	6.47
224	4809.00	18.00	6.51
225	4810.00	18.00	8.17
226			
227			
228	Gj. Snitt	12.39	9.75
229			

FIGUR 34: GJENNOMSNIITTLIG OVERBERG FOR KROKATUNNELEN.

Hele datagrunnlaget i Krokotunnelen gir et gjennomsnittlig overberg på 9,75 m² eller 9,75 kubikkmeter per meter tunnel som beregnet i Excel vist i figur 34. Det planlagte overberget for vegg og heng er 5,685 m² som tidligere beregnet.

$$9,75 \text{ m}^2 - 5,685 \text{ m}^2 = 4,07 \text{ m}^2$$

Sammenligning mellom det planlagte overberget for vegg og heng mot det utførte, gir oss et gjennomsnittlig utilsiktet overberg på 4,07 m².

$$100\% \cdot \frac{4,07}{9,75} = 42 \%$$

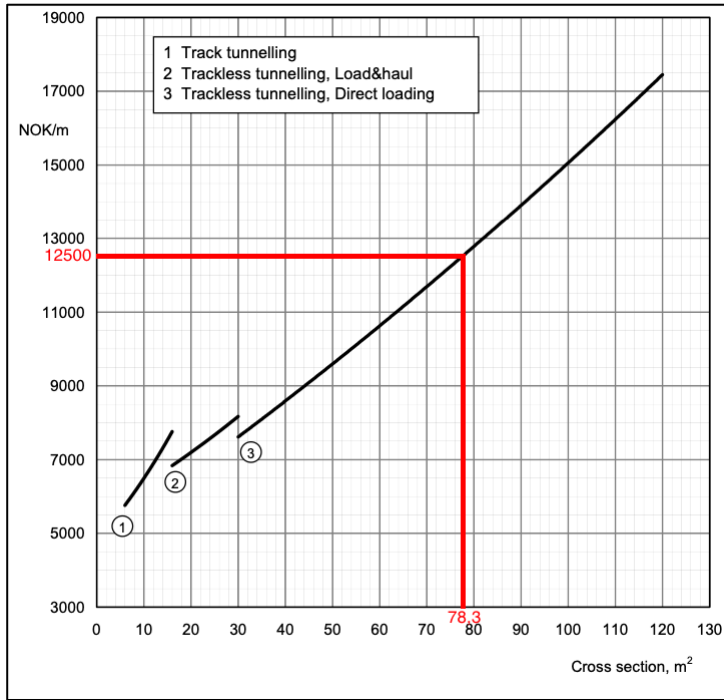
Dette betyr at overberget som ikke er planlagt for vegg og heng utgjør 42 prosent av det totale overberget for vegg og heng.

4.5 Potensiale for kostnadsbesparelse ved reduksjon av overberg

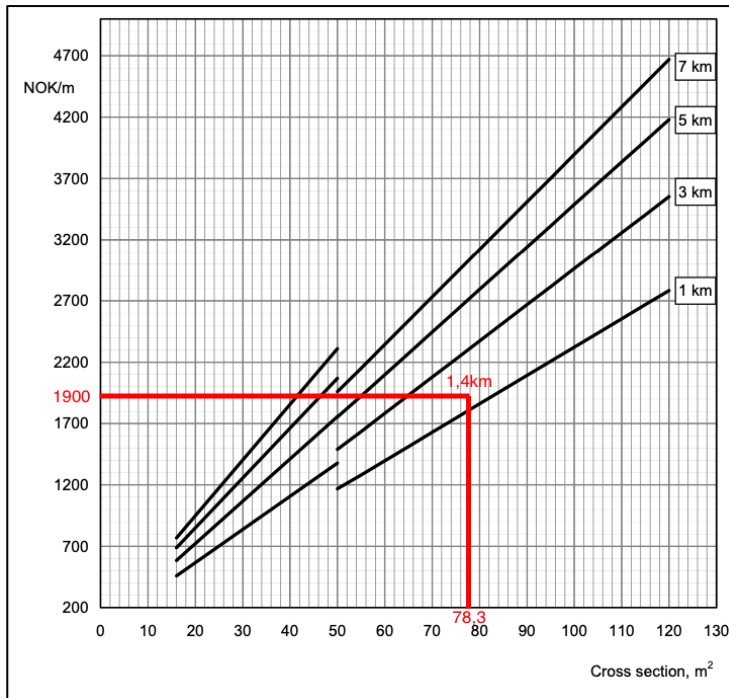
Det er gjort en antagelse om at kostnadene som blir mest påvirket ved at det blir tatt ut mer overberg, er boring, lading, lasting og transport.

Prisene som er hentet ut fra figurer inkluderer overberg for tverrsnittet. For å få ut prisen av planlagt og utført overberg ganges størrelsen av overberg i kvadratmeter med den indeksregulerte prisen og deler det på tverrsnittet. Får da ut den delen av prisen som antas å være overberget for tverrsnittet.

Henter ut pris på boring, lading, lasting og transport ut fra rapport 2C-05 Drill and blast tunneling costs figur 1.1 og 2.9 (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006)



FIGUR 35: PRIS FOR BORING, LADING OG LASTING (NTNU DEPARTMENT OF CIVIL AND TRANSPORT ENGINEERING, 2006).



FIGUR 36: PRIS FOR TRANSPORT (NTNU DEPARTMENT OF CIVIL AND TRANSPORT ENGINEERING, 2006).

Teoretisk tverrsnitt er beregnet til $78,3\text{m}^3$ der utregningene er utført og lagt under kapittel 2.4.7 Planlagt overberg.

Ut fra tilgjengelige data som skanning og teoretisk sprengningsprofilen fra Krokotunnelen, er det beregnet et planlagt overberg på $5,685\text{ m}^2$ og utført overberg på $9,75\text{ m}^2$ for vegg og heng. Det er rimelig å anta at det totale overberget er vesentlig høyere, siden overberget for ligg ikke er medregnet.

Siden prisen i kompendium er fra juni 2005 indeksjusteres den til mars 2022 ut fra kostnadsindeks for anleggsmaskiner utarbeidet av NTNU, anleggsdrift (NTNU, Anleggsdrift, 2022)

bruker ligning for P_{bet} (prisstigning fra basistidspunkt til betalingstidspunkt) hentet fra forelesningsnotater i faget TBA4150 Anleggsteknikk der $P_{\text{bet}} = 1 + f_p(p_{\text{nå}}/p_0 - 1)$ (NTNU, 2021)

Faktoren f_p bestemmes normalt i kontrakt til 0,67 som faktor for produktivitetsutvikling.

$$P_{\text{bet}} = 1 + 0,67 \left(\frac{664,3}{379,8} - 1 \right) = 1,502 = 50,2\%$$

Indeksjustert pris på boring, lading og sprengning:

$$12500\text{kr} \times 1,502 = 18775\text{kr}$$

Indeksjustert pris på transport:

$$1900\text{kr} \times 1,502 = 2853,8\text{kr}$$

Ønsker å finne pris på differanse mellom planlagt og utført overberg i vegg og heng, samtidig som prisen for totalt overberg beregnes.

Pris på planlagt overberg i vegg og heng for boring, lading og sprengning i kr/m tunnel.

$$\frac{18775\text{kr}/\text{m} \times 5,685\text{m}^2}{78,3\text{m}^2} = 1363,17\text{kr}/\text{m}$$

Pris på utført overberg i vegg og heng for boring, lading og sprengning i kr/m tunnel.

$$\frac{18775kr/m \times 9,75m^2}{78,3m^2} = 2337,88kr/m$$

Differanse på planlagt og utført overberg i vegg og heng for boring, lading og sprengning i kr/m tunnel:

$$2337,88kr/m - 1363,17kr/m = 974,71kr/m$$

Pris på planlagt overberg i vegg og heng for transport i kr/m tunnel.

$$\frac{2853,8kr/m \times 5,685m^2}{78,3m^2} = 207,20kr/m$$

Pris på utført overberg i vegg og heng for transport i kr/m tunnel.

$$\frac{2853,8kr/m \times 9,75m^2}{78,3m^2} = 355,36kr/m$$

Differanse på planlagt og utført overberg i vegg og heng på transport i kr/m tunnel:

$$355,36kr/m - 207,20kr/m = 148,16kr/m$$

Resultater presentert i tabell 3 viser total pris på planlagt/utført overberg av vegg og heng for hele tunnelen med en tunnallengde på 1400 meter.

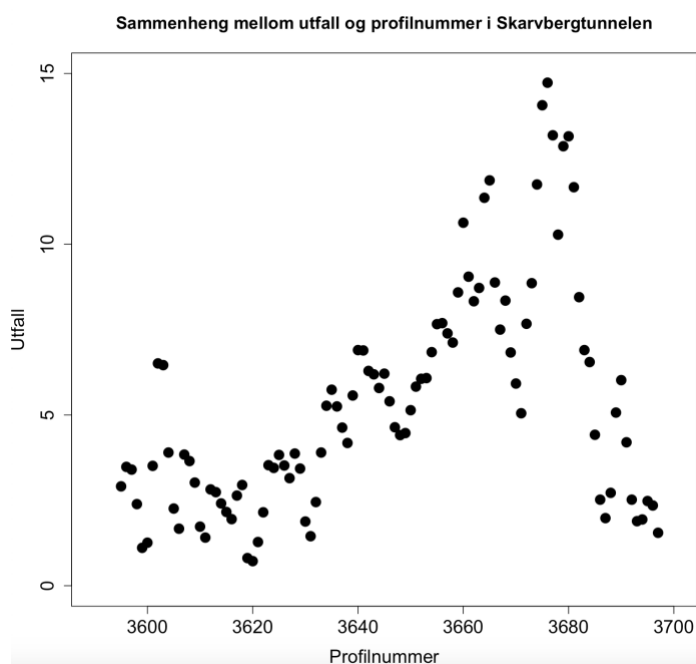
TABELL 3: KOSTNADER FOR BORING, LADING, SPRENGING OG TRANSPORT FOR PLANLAGT OG UTFØRT OVERBERG

	Boring	Transport	Total pris pr. m	Total pris på tunnel
Planlagt overberg	1363,17 kr/m	207,20 kr/m	1570,37 kr/m	2198518 kr
Utført overberg	2337,88 kr/m	355,36 kr/m	2693,24 kr/m	3770536 kr
differanse	974,71 kr/m	148,16 kr/m	1122,87 kr/m	1572018 kr

5 Diskusjon

5.1 Generelle observasjoner

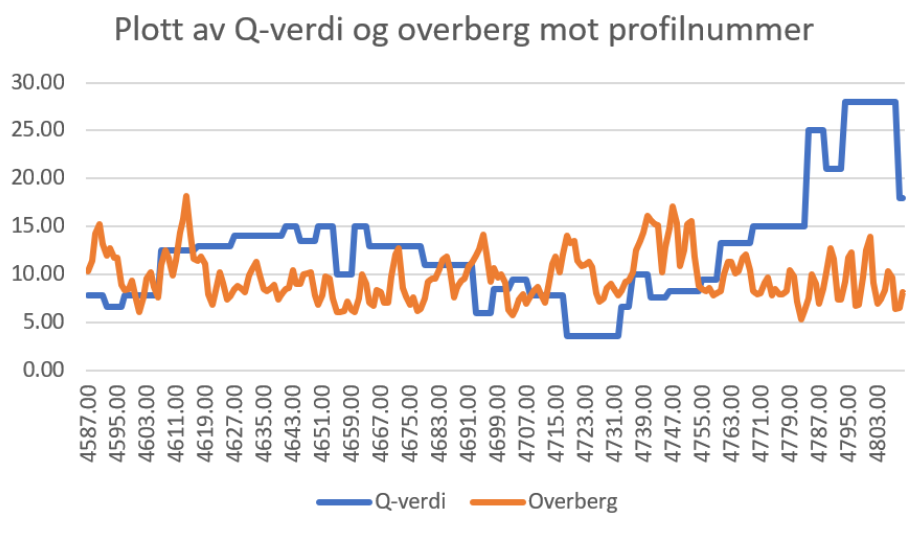
Statistisk sett er det viktig å anerkjenne, at Q-verdi og overberg/utfall ikke er uavhengig av parameterne i de foregående og etterkommende profiler. De innsamlede dataene avhenger i ulik grad av nærliggende profilnumre. Dette gjelder både for Q-verdi og for utfall eller overberg. Avhengigheten er forskjellig fra tunnel til tunnel, i tillegg til beliggenheten inne i tunnelene. Det kan sies at det er relativt stor avhengighet fra en salve til neste salve. Ved analyse av dataene gjøres det derimot allikevel en antagelse, om at dataene ikke er avhengige av de nærliggende profilene. I statistisk sammenheng er dette en forenkling som er veldig vanlig å gjøre, da de fleste data fra problemstillinger i virkeligheten vil være avhengige av hverandre. På figur 37 ses et tydelig eksempel på en svingning i utfall der det ser ut til at mengden av utfall i et profil er avhengig av mengden i de foregående og etterkommende profiler. Resultatene i oppgaven speiler gjennomgående at bergmasse kan være uforutsigbart å jobbe med og at det ikke er så lett å forutse resultatet av en salve for eksempel ved bruk av formler før den er utført.



FIGUR 37: SAMMENHENG MELLOM UTFALL OG PROFILNUMMER I SKARVBERGTUNNELEN

5.2 Sammenheng mellom Q-verdi og overberg

På figur 38 vises et plott fra Excel hvor Q-verdi og overberg er plottet mot profilnummer. Denne sammenligningen gir en indikasjon på at det grovt sett er lave Q-verdier der det er mye overberg og høye Q-verdier der det er lite overberg, som antatt i hypotesen.



FIGUR 38: PLOTT AV Q-VERDI OG OVERBERG MOT PROFILNUMMER

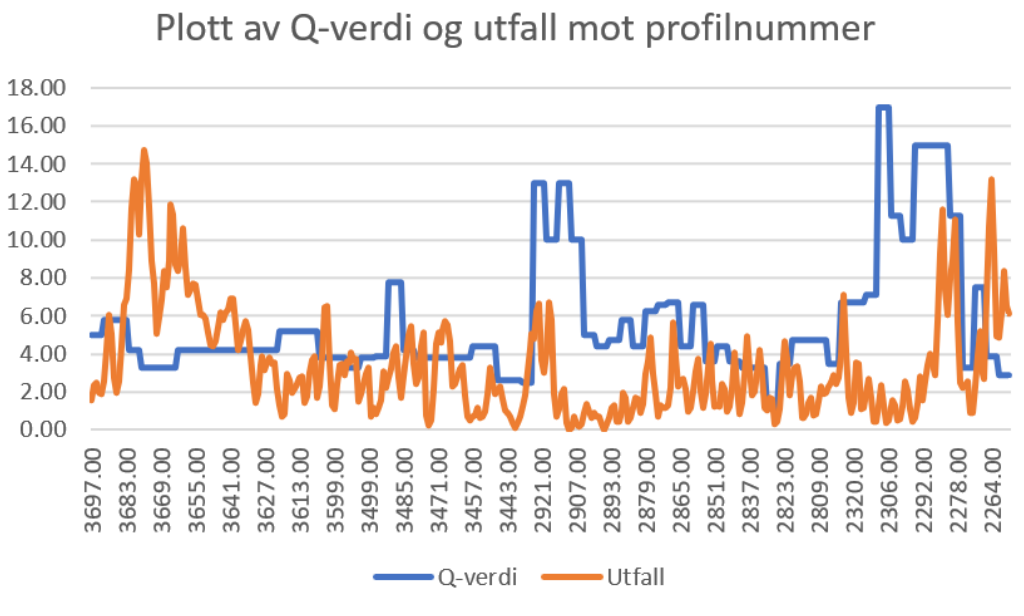
Analysen av sammenhengen mellom Q-verdi og overberg ga et resultat som bekrefter hypotesen i oppgaven. Det er en sammenheng mellom Q-verdi og overberg for prosjektet og det er en negativ korrelasjon mellom tallene. P-verdien på 0,003619 eller 0,36 prosent sier oss at dette kan fastlås med veldig god sikkerhet og at det er svært usannsynlig å finne denne effekten uten at den er reell. Tallet for R^2 eller R-squared fra den statistiske analysen viste at 4 prosent av variasjonen i overberg skyldes ulike Q-verdier. Dette kan høres lite ut, men kan utgjøre mye i kubikkmeter over lengre strekker med tunnel.

Det å bruke Q-verdi som tall for den geologiske kvaliteten på bergmassen gjør at det ikke tas hensyn til hvordan de inngående parameterne i beregningene forandrer seg. Det er naturlig å anta at enkelte av parameterne som inngår i beregningen av Q-verdien for gitte situasjoner vil ha større betydning av mengden overberg enn andre. Faktorer slik som sprekkens orientering inngår ikke i beregningen, og utgjør dermed en udokumentert faktor.

Sammenhengen som her er bekreftet kan ikke sees på som en universell sammenheng, men det kan fastslås at den er gjeldende for den lokasjonen hvor Krokatunnelen er under etablering.

5.3 Sammenheng mellom Q-verdi og utfall

Verdiene i analysen av denne sammenhengen kan tyde på en negativ korrelasjon mellom disse to verdiene slik som i hypotesen. Men det er ikke med stor nok sikkerhet, mulig å fastslå ved det satte signifikansnivået på fem prosent. Grunnen til dette er veldig sammensatt og kompleks, men ikke uventet med tanke på hvor stor spredning det var i dataene her.



FIGUR 39: PLOTT AV Q-VERDI OG UTFALL MOT PROFILNUMMER

Ved sammenligning av plottet for Q-verdi og utfall i Skarvbergtunnelen, mot plottet av Q-verdi og overberg i Krokatunnelen, kan det stadfestes at oppførselen for sistnevnte er noe mer uforutsigbar, tatt i betraktning de kraftigere svingningene i plottet, og at verdiene i mindre grad har en negativ samvariasjon.

Inntrykket av prosjektet som helhet er at det befinner seg helt på enden av skalaen, både når det gjelder utfall og Q-verdi, og at dette muligens bidrar til at det er noe uhandgripelig.

En annen feilkilde for analysen skyldes at det ble for komplisert å ta hensyn til tykkelse av sprøytebetong for målinger gjort i Skarvberg tunnelen. Samtidig har sannsynligvis tykkelse av sprøytebetong mindre betydning for målinger av utfall enn for målinger av overberg da utfall i større grad er begrenset til mindre deler av profilene.

5.4 Planlagt og utført overberg

Overberg beregnes i oppgaven av praktiske årsaker kun over såle, da det ikke vil være hensiktsmessig å renske sålen før skanning, dette vil gjøre at den målte mengden av overberg noe mindre enn den reelle. Dette skyldes at sålen ikke vil bli rensket for oppbygning av vegoverbygningen før selve tunneldriften er ferdig og har dermed ikke fått inkludert målinger for dette.

Det er allikevel interessant å sammenligne det planlagte overberget for vegg og heng opp imot det utførte for vegg og heng. Indirekte kan det sies at det planlagte overberget skyldes det praktiske med tanke på å ha tilstrekkelig plass for tunneldriften, mens det utilsiktede overberget påvirkes av en lang rekke faktorer. Dette være seg geologisk betinget utfall, lagdelinger som gjør at boreoperatør må tilpasse boringen, unøyaktighet ved instrumentering for borerigg og menneskelig unøyaktighet spesielt med tanke på boreoperatør.

5.5 Effekten av spiling

Det er tidligere beskrevet at spiling brukes hvor det er dårlig fjell og lav Q-verdi. Spiling eliminerer ikke observasjoner av utfall og overberg, men dette skyldes til en viss grad at det brukes under de verste omstendighetene, dermed kan utfall allikevel forekomme.

Beregningene gjort i oppgaven tyder på at spiling har en effekt når det gjelder å redusere utfall. Fjellet oppfører seg ulikt etter hvor man befinner seg, men det er rimelig å anta en viss sammenheng fra en salve til neste. Når man sammenligner salver som ligger etter hverandre hvor den ene er med, og den andre er uten spiling vises en nedgang i utfall og overberg for salven med spiling. Det sammen med andre beregningene gjort i oppgaven, tyder på at spiling har en effekt på å redusere utfall. Når alle verdiene med og uten spiling hvor Q-verdien er ganske lik og tilnærmet i samme sikringsklasse ble sammenlignet, ble det gjennomsnittlig en lavere mengde overberg og utfall med spiling. Tatt i betraktning at utfallet for profilene uten spiling er gjennomgående målt for profiler med relativt høye Q-verdier, mens profilene med spiling har lave Q-verdier bidrar dette også til å styrke påstanden om at spiling vil gi en reduksjon i utfall. Dette stemmer også godt med inntrykket prosjektgruppa fikk gjennom prosjektbesøk og intervju. Erfaringene avdekket under intervjuer er blitt gjort av folk som har jobbet lenge i tunnelbransjen, og vært med å drive tunnel i mange ulike typer fjell.

5.6 Miljøperspektiv

For å sette overberg i et miljøperspektiv, kan man se på overmasse som blir tatt ut og hvordan den utnyttes. Massen skal transporteres ut fra tunnelen til et mellomlager eller videre på tipp og lagres. Ved behov for fylling i dagen er det naturlig å benytte tunnelmasser til dette. Dersom steinkvaliteten er god nok kan tunnelmassen også fraksjoneres og brukes til vegoppbygging. Det blir laget et masseregnskap hvor det blir beskrevet masse tatt ut og hvor i veglinja det er behov for masse. For slike beregninger brukes ofte dataprogram som for eksempel Novapoint, her beregnes, skjæringer, uttatt tunnelmasse og behov for fylling. En god utnyttelse av fjellmassen som blir tatt ut, vil gjøre miljøregnskapet for tunnelen bedre. Og det blir mindre inngrep i naturen i form av mindre permanente deponier.

5.7 Kostnader

For tunneldriving blir kostnader beregnet etter teoretisk sprengningsprofil og overberg blir anslått ut fra erfaringstall. Det er opp til hver enkelt entreprenør å avgjøre hvor mye overberg som er nødvendig å ta ut for å få en riktig profil på tunnelen. Det ble ut fra NTNU-rapport (NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006) beregnet pris per meter tunnel drevet. Under slike beregninger må det tas hensyn til lengde på tunnel og tunneltversnitt. Beregninger gjort for en tunnel med tverrsnitt på $78,3 \text{ m}^2$ gir et forventet overberg i vegg og heng på $5,685 \text{ m}^2$. Ut fra tabell 5 utgjør det 2 198 518 kr for en tunnel på ca. 1,4 km. Men for overberg beregnet på Kroatunnelen med det datagrunnlaget som er hentet ut til nå, er det forventet et overberg for vegg og heng på $9,75 \text{ m}^2$ som utgjør en pris for hele tunnelen på 3 770 536 kr. Usikkerhet i differansen på teoretisk og utført overberget kan ha en sammenheng med at tunnelen ikke er drevet mer enn 20 prosent. Det kan være forhold i prosjektområdet som enda ikke er avdekket og vil kunne gi betydelige utslag på mengden av overberg. Jo lengre tunneldrivingen er gjennomført jo bedre estimat kan gjøres.

5.8 Videre arbeid

For videre arbeid kunne det vært interessant å dekomponere Q-verdien i større grad for å se hvordan de ulike parameterne påvirker mengden av overberg eller utfall. Datagrunnlaget i denne bacheloroppgaven er utvilsomt begrenset, og det har også vært interessant å gjøre en tilsvarende undersøkelse som gjort her, med et større tallmateriale som omfatter flere tunnelprosjekter. Et annet moment vil være å undersøke utfall koblet opp mot masser utenfor den borede konturen ved hjelp av MWD-borelogger, og slik undersøke om Q-verdien da vil ha større betydning. Det kunne og vært aktuelt å legge opp til et opplegg med forsøkssalver for å teste innvirkningene ulike faktorer har. Enkeltfaktorer kan da med hensikt endres, og sånn undersøke innvirkningen denne endringen har. I tilfelle må nytten denne forskningen kan gi veies opp mot kostnaden ved utføringen.

6 Konklusjon

Det er påvist en signifikant negativ korrelasjon mellom Q-verdi og overberg for Krokotunnelen og den lokasjonen som prosjektet befinner seg i, det vil si at hypotesen for undersøkelsene som er gjort ble bekreftet. Ulike usikkerhetsfaktorer gjør det vanskelig å fastslå at dette er en universell sammenheng som gjelder for alle tunnel- og bergromsprosjekter. Det vil kreve analyse av et større utvalg tunnelprofiler og tunneler, for å kunne lage en modell som kan forutsi forventet mengde overberg basert på Q-verdi.

Analyse av dataene med Q-verdi og utfall for Skarvberg tunnelen er ikke signifikante nok til å fastslå en sammenheng med god sikkerhet. Selv om det er en negativ korrelasjon mellom Q-verdi og utfall for prosjektet, kan ikke hypotesen bekreftes grunnet for dårlig signifikans. Allikevel er det nærliggende å anta at det kan være en slik sammenheng.

Kan utvilsomt fastslå at forspiling har en god effekt på reduksjon av utfall basert på erfaringer fra personell på tunnelprosjekter og dataene innsamlet.

For å redusere overberg i fremtiden, vil det være hensiktsmessig å loggføre overberg. På denne måten fås en oversikt over flere prosjekter. Som igjen kan gjøre det mulig å innføre systemer der det gis insentiver til entreprenører for å ta ut mindre overberg, på samme måte som klimaregnskap vektlegges i anbudprosesser.

Det er ikke utenkelig at det i fremtiden vil stilles krav til å redusere mengden overberg på tunnelprosjekter. Ut fra et miljøperspektiv sett i form av sparte karbonutslipp, og tanken om å gjøre minst mulig inngrep i naturen, i dette tilfellet mindre fyllinger.

Kunnskap om tunneldrift bør baseres på erfaring, forskning og statistikk. Noen ganger kan disse innfallsvinklene mot tunneldriften være motsigende, og det vil da være mest hensiktsmessig å basere seg på erfaring.

Det er en sammenheng mellom Q-verdi og overberg for en salve. Men det er også mange andre faktorer med stor variasjon som spiller inn på overberg og utfall, for eksempel usikkerhetsfaktorene med nøyaktig boring og lademengde.

Kostnadene for boring, lading, lasting og transport er beregnet for teoretisk og utført profil. Beregninger er basert på en 1400 meter lang tunnel, hvor det for praktiske formål brukes kvadratmeter (Statens Vegvesen, 2021c) i vegg og heng. Kostnaden for det totale utførte overberget for vegg og heng kommer på 3 770 636 kr. Det er 1 572 118 kr mer enn kostnaden for det planlagte overberget for vegg og heng.

7 Bibliografi

AMV, 2022. *amv-as*. [Internett]

Available at: <https://www.amv-as.no/underground-drilling>

[Funnet 5 mai 2022].

Bjørnstad, J., 2018. *Store norske leksikon - Hypotesetesting*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/hypotesetesting - statistikk>

[Funnet 8 Mai 2022].

Bruland, A., 2013. *Anleggskompendium Prosjektrapport 17-91 Tunneldrift*, Trondheim: NTNU.

Dalland, O., 2007. *Metode og oppgaveskriving for studenter*. 4 red. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS.

Dokken, A., 2022. [Intervju] (28 April 2022).

Entreprenørforeningen - Bygg og Anlegg, 2021. *Anskaffelser*. [Internett]

Available at: <https://anskaffelser.no/sites/default/files/veileder.pdf>

[Funnet 6 Mai 2022].

Fiskum, S., 2022. [Intervju] (28 April 2022).

Foamrox, 2022. *Foamrox - produktenskaper*. [Internett]

Available at: <https://www.foamrox.no/produktenskaper/>

[Funnet 5 mai 2022].

Haga, T. S., 2022. *Geologi* [Intervju] (28 april 2022).

Jacobsen, P., 2021. *blackboard*. [Internett]

Available at: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-1509573-dt-content-rid-40129767_1/xid-40129767_1

[Funnet 22 april 2022].

Jakobsen, P. & Oosterhout, D., 2018. *Kort innføring i borparametertolkning for anleggsdrift. Teknisk rapport 18*, Oslo: NFF.

NFF, 2008. *Tung bergsikring i undergrunnsanlegg*. [Internett]

Available at: https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_05.pdf

[Funnet 4. mai 2022].

NFF, 2012. *Konturkvalitet i sprengte tunneler - teknisk rapport 12*, Oslo : NFF.

NFF, 2016. *Sikkerhet ved arbeider i tunneler og bergrom. Håndbok 10*. [Internett]
Available at: https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2020/04/Haandbok_10.pdf
[Funnet 22 April 2022].

NFF, 2019. *Elektroniske tennere i tunnel - teknisk rapport nr. 19*, Oslo: NFF - Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk.

NGI, 2015. *Bruk av Q-systemet*, Oslo: NGI.

NGU, 2015. *ngu - Gneis*. [Internett]
Available at: <https://www.ngu.no/emne/gneis>
[Funnet 14. mai 2022].

NGU, 2018. *Sonderboring*. [Internett]
Available at: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/bronnboring/sonderboring>
[Funnet 3 Mai 2022].

Nilsen, B., 2016. *Ingniørgeoolgi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: akademika.

NTNU Department of Civil and Transport Engineering, 2006. *Report 2C-05 DRILL AND BLAST TUNNELLING costs*, Trondheim: NTNU.

NTNU, Anleggsdrift, 2022. *Maskinentreprenørenes forbund*. [Internett]
Available at: <https://www.mef.no/artikkel/2022-04-05/oppdatert-kostnadsindeks-for-mars-2022>
[Funnet 8 mai 2022].

NTNU, 2021. *Anleggsnotater - Blackboard*. [Internett]
Available at: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/11899111?X-Blackboard-Expiration=1652205600000&X-Blackboard-Signature=%2FhID6%2BAcaFZxyyN6rb%2BbTDZsZq8mvxg3x0%2BaHKujRR4%3D&X-Blackboard-Client-Id=303508&response-cach>
[Funnet 20 april 2022].

Olsen, V., 2002a. *Kompendium Del 1 Kontursprengning*, Trondheim: NTNU.

Olsen, V., 2002b. *Kompendium i anleggsteknikk - fjellsprenningsteknikk - Tennmidler*, Trondheim: NTNU.

Olsen, V., 2011. *nff.no*. [Internett]
Available at: <https://nff.no/publikasjoner/tekniske-rapporter/>
[Funnet 23 april 2022].

Orica, 2019. *bulksprengstoff/Bulksystemer underjord*, Oslo: Orica.

Sabri, O., 2019. *Tennmidler notater*, Trondheim: NTNU, Byggingeniør - Anleggsteknikk.

Sabri, O., 2021. *Ingeniørgeologi-sprekker og svakhetssoner*, Trondheim : NTNU.

Sciencedirect, 2001. *Sciencedirect*. [Internett]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rock-mass-rating>
[Funnet 5 Mai 2022].

Skoglund, J., 2021. *Gjennomslag i Skarvberg tunnelen i dag*. [Internett]

Available at: <https://www.veier24.no/artikler/jubel-i-nord-gjennomslag-i-skarvberg-tunnelen-i-dag/509872>

[Funnet 6 Mai 2022].

Skretting, E., 2021. *blackboard*. [Internett]

Available at: https://ntnu.blackboard.com/ultra/courses/_30029_1/cl/outline
[Funnet 4 Mai 2022].

Statens vegvesen, 2018. *Håndbok R761*. [Internett]

Available at: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r761-prosesskode-1-05072018.pdf>

[Funnet 22 April 2022].

Statens Vegvesen, 2021a. *N100 Veg-og gateutforming*. [Internett]

Available at: <https://svv-cm-sv-apppublic-prod.azurewebsites.net/product/859922?filePath=N100%202021.pdf>

[Funnet 22 April 2022].

Statens Vegvesen, 2021b. *Håndbok N500 Vegtunneler*. [Internett]

Available at: <https://svv-cm-sv-apppublic-prod.azurewebsites.net/product/859934?filePath=b777a007-22d9-4ba5-ba06-9fb5b0aab49d.pdf>

[Funnet 5 Mars 2022].

Statens Vegvesen, 2021c. *Definisjonsliste for statens vegvesens håndbøker*. [Internett]

Available at: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/definisjoner/>

[Funnet 22 april 2022].

Steinehaugen, O. H., 2022. *Tunneldriving* [Intervju] (29 April 2022).

SWECO, 2021. *Geologisk rapport for Kroatunnelen, Fv500 - Prosjekteringsfase*, Bergen: SWECO.

8 Vedlegg

1 Intervjuer

1.1 Bas for tunnellag Ole Henrik

1.2 Senior produksjonsleder Arne

1.3 Prosjektingeniør Steinar

1.4 Geomatiker John Åge

1.5 Geolog Torbjørn

2 Samlet data

3 Poster

4 Artikkel